

JAHRESBERICHT 2023

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.....	32	Short Pulses / Nanostructures	32
Optik / Kurze Wellenlängen.....	50	Optics / Short Wavelengths	50
Photonische Sensorik.....	64	Photonic Sensor Technologies	64
Projekte.....	86	Projects.....	86
Publikationen.....	88	Publications.....	88
Buchbeiträge	90	Book Contributions	90
Patente.....	90	Patents.....	90
Konferenzbeiträge.....	92	Conference Contributions	92
Abschlussarbeiten	96	Final Thesis	96
Ausgewählte Kooperationspartner	97	Selected Cooperation Partners.....	97
Messen und Veranstaltungen	98	Exhibitions and Events.....	98

Vorwort

Preface

Liebe Leserinnen und Leser,

nachdem unsere Arbeit in den vergangenen Jahren zunächst durch die Corona-Pandemie und dann durch den Anstieg der Energiepreise und die damit verbundene Notwendigkeit von CO₂-Einsparung geprägt gewesen war, ist die Forschung 2023 endlich in ruhigere Fahrwasser zurückgekehrt.

Ein Höhepunkt 2023 war für das Institut die von uns ausgerichtete Schnelltest-Tagung. Die Region Göttingen ist mit dem „Südniedersachsen Point-of-Care Cluster“ (SNIPOCC) bei der Entwicklung extrem sensitiver und genauer Schnelltests bundesweit ganz vorne dabei. In dem vom IFNANO initiierten Bündnis, das 13 regional ansässige Akteure umfasst, werden nachhaltige, hochsensitive Schnelltests mit hochinnovativen Produktkonzepten und Funktionalitäten für die Bereiche Human- und Veterinärmedizin, Forensik sowie Umwelt- und Gefahrstoffanalytik entwickelt. Bei der zweitägigen Tagung wurden den Teilnehmenden aus ganz Deutschland 16 Vorträge namhafter Experten sowie diverse Diskussionsrunden geboten. Themen waren dabei unter anderem „Forensik und Sicherheit“, „Umweltanalytik, Lebensmittelsicherheit und Tierhaltung“, „Nachhaltigkeit“ oder „Vor-Ort-Diagnostik und Mikrofluidische Systeme“. Parallel zu der Tagung fand eine Hausmesse mit Produkten der Bündispartner statt. Ehrengäste waren der niedersächsische Wissenschaftsminister Falko Mohrs und der Landrat des Landkreises Göttingen Marcel Riethig, die ihren Besuch bei der Tagung auch dazu nutzten, mit den Ausstellern ins Gespräch zu kommen.

Einen echten Erfolg konnten wir im Bereich der Auflösungssteigerung in der Reflexionsmikroskopie feiern. In der Materialwissenschaft hängen die Eigenschaften von Verbundwerkstoffen von mikrostrukturellen Merkmalen ab, deren Größe von Mikrometern bis zu Nanometern reicht. Für die Materialcharakterisierung wird dabei häufig die Reflexionsmikroskopie eingesetzt, da sie einfache Probenvorbereitung erlaubt und kosteneffizient ist. Moderne Materialien mit Strukturgrößen unter 250 Nanometern erfordern jedoch anspruchsvollere und aufwändigere Beobachtungsmethoden wie beispielsweise die Elektronenmikroskopie. Zusammen mit unseren Partnern von der TU Clausthal und dem Max-Planck-Institut für Multidisziplinäre Naturwissenschaften ist es uns gelungen, die Auflösung der Reflexionsmikroskopie durch die Modulation der Absorption dünner photochromer Filme um das 2,4-fache zu steigern. Damit erbrachten wir unseres Wissens erstmals den experimentellen Nachweis,

Dear Readers,

After our work in recent years was initially shaped by the COVID-19 pandemic and then by the explosive increase in energy prices and the associated need for CO₂ reduction, research finally returned to calmer waters in 2023.

A highlight of 2023 for the institute was the rapid test conference we hosted. The Göttingen region is at the forefront nationwide in the development of extremely sensitive and accurate rapid tests with the “Southern Lower Saxony Point-of-Care Cluster” (SNIPOCC). In the alliance initiated by IFNANO, which comprises 13 locally based actors, sustainable, highly sensitive rapid tests with product concepts and functionalities well beyond the state of the art are being developed for human and veterinary medicine and forensics, as well as environmental and hazardous substance analysis. The two-day conference offered participants from all over Germany 16 presentations by renowned experts and various roundtable discussions. Topics included “Forensics and Security,” “Environmental Analysis, Food Safety, and Animal Husbandry,” “Sustainability”, and “On-Site Diagnostics and Microfluidic Systems.” Parallel to the conference, a trade show featuring products from the alliance partners was held. Honored guests included the Lower Saxony Minister for Science, Falko Mohrs, and the District Administrator of Göttingen, Marcel Riethig, who used their visit to the conference to engage in discussions with the exhibitors.

We achieved real success in the area of resolution enhancement in reflection microscopy. In materials science, the properties of composite materials depend on microstructural features ranging in size from micrometers to nanometers. Reflection microscopy is often used for material characterization because it allows for easy sample preparation and is cost-effective. However, modern materials with structure sizes below 250 nanometers require more sophisticated and expensive observation methods such as electron microscopy. In a collaborative project funded by the German Research Foundation with our partners from the Clausthal University of Technology and the Max Planck Institute for Multidisciplinary Sciences, we succeeded in increasing the resolution of reflection microscopy by modulating the absorption of thin photochromic films 2.4-fold. To our knowledge, this is the first experimental proof that the resolution limit in optical reflection microscopy can be circumvented using the principle of absorption modulation.

Vorwort

Preface

dass die Auflösungsgrenze in der optischen Reflexionsmikroskopie unter Verwendung des Prinzips der Absorptionsmodulation umgangen werden kann.

Aber natürlich waren wir mit unseren Forschungen auch auf anderen Gebieten aktiv. Ein Thema war dabei die Erzeugung hochaufgelöster diffraktiver Nanoschriften, Bilder und Codes auf Metallen durch direkte Kurzpuls-Laser-Ablation. Die individuelle, fälschungssichere Kennzeichnung hochwertiger, sicherheitsrelevanter oder gesundheitsrelevanter Gegenstände gewinnt in der heutigen Wirtschaftswelt zunehmend an Bedeutung. Am IFNANO wurde jetzt eine Schreibtechnologie entwickelt, mit der ein QR-Code mit einer Kantenlänge von weniger als 100 Mikrometern geschrieben werden kann und mit der sämtliche Informationen über den Gegenstand oder das Bauteil gespeichert werden können. Auch hoch aufgelöste Logos und Klarschriften können dadurch realisiert werden. Das Besondere dieser Markierungen ist, dass die geschriebenen Muster zusätzlich eine diffraktive Substruktur beinhalten, wodurch unter entsprechender Beleuchtung ein extrem hoher Auslesekontrast erreicht wird, während das Muster ansonsten nahezu unsichtbar ist. Hierdurch wird die Fälschungssicherheit erheblich erhöht.

In einem weiteren Projekt beschäftigten wir uns mit der Inaktivierung von Mikroorganismen auf Schüttgütern. Unsere Arbeit fokussierte sich auf Bioprodukte wie Kräuter, Tee oder Gewürze. Diese Produkte werden oft durch Kleinstorganismen wie Pilze, Bakterien oder Milben kontaminiert. Wir untersuchten die Produkte vor und nach der Inaktivierung durch UV-Licht oder durch Plasmen. Zum Einsatz kommen dabei gaschromatographische Techniken sowie Halbleitersensoren, die das Ausgasverhalten der Bioprodukte beschreiben können.

Mein besonderer Dank gilt auch diesmal wieder unseren hochqualifizierten Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern, ohne deren vorbildlichen Einsatz und Brillanz die vielen wissenschaftlichen Durchbrüche und hervorragenden Projektergebnisse gar nicht zustande gekommen wären. 2023 konnte das IFNANO mit einem Betriebshaushaltsvolumen von 4,76 Millionen Euro sein Ergebnis im Vergleich zum Vorjahr erneut leicht steigern und dabei 67,4 Prozent des Haushaltes durch Drittmittel erwirtschaften. Die direkten Auftragsentnahmen aus der Industrie trugen hierzu mit rund 13 Prozent bei.

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

Ihr



But, of course, we were also active in our research in other areas. One topic was the generation of high-resolution diffractive nano-writings, images, and codes on metals through direct short-pulse laser ablation. The individual, tamper-proof marking of high-quality, safety-relevant or health-relevant items is becoming increasingly important in today's economy. At IFNANO, a writing technology has now been developed that can write a QR code with a side length of less than 100 micrometers, storing all the information about the item or component. High-resolution logos and clear writings can also be realized. What makes these markings special is that the written patterns additionally include a diffractive substructure, achieving an extremely high readout contrast under appropriate lighting conditions, while the pattern is otherwise almost invisible. At the same time, the tamper resistance is significantly increased by the special diffractive structures.

In another project, we focused on the inactivation of microorganisms on bulk goods. Our work focused on organic products such as herbs, tea, and spices. These products are often contaminated by microorganisms such as fungi, bacteria, and mites. We examined the products before and after inactivation through UV light or plasmas. Gas chromatographic techniques and semiconductor sensors were used to describe the outgassing behavior of the organic products.

Once again, my special thanks go to our highly qualified staff, whose exemplary dedication and brilliance were indispensable for the many scientific breakthroughs and excellent project results. In 2023, IFNANO was able to slightly increase its results compared to the previous year with an operating budget volume of 4.76 million euros and generated 67.4 percent of the budget through third-party funds. Direct contract revenues from industry contributed about 13 percent to this.

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

Yours



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)

Trägerverein - Vorstand



Prof. Dr. J. Troe
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. Peter Loosen**

Vorsitzender
Fraunhofer Institut für Lasertechnik
Aachen

**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. Thomas A. Klar**

Kurator
Universität Linz
Österreich

**Prof. Dr. Andrea Koch**

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

**Prof. Dr. Sarah Köster**

Kuratorin
Georg-August-Universität
Göttingen

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

Tatjana Kasten

Uwe Lampe

Andreas Spata

Stefanie Wegener

Anette Zwingmann



Betriebshaushalt

Der Betriebshaushalt im Jahr 2023 hatte ein Volumen von 4,76 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 67,4 %. Die Einnahmen aus der Industrie trugen mit 12,8 % zur Finanzierung bei.

Investitionen

Im Jahr 2023 wurden Investitionen in die kontinuierliche Erweiterung der technologischen Ausstattung im Gesamtvolumen von 1,66 Millionen Euro getätigt.

Personal

Am Institut für Nanophotonik Göttingen waren zum Stichtag 31.12.2023 insgesamt 51 Mitarbeiter beschäftigt, davon 41 Wissenschaftler und Techniker, was einem Anteil von 80,4 % 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 2023 wurden 4 wissenschaftliche und studentische Hilfskräfte betreut. Darüber hinaus konnten am IFNANO in 2023 zwei Promotionen in Kooperation mit der Georg-August-Universität Göttingen abgeschlossen werden.

Operating budget

The operating budget in 2023 had a volume of 4.76 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 67.4 %. Industry revenues contributed 12.8 % to the financing.

Investments

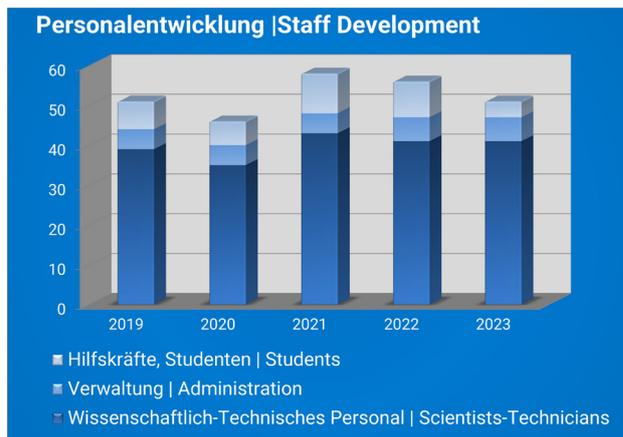
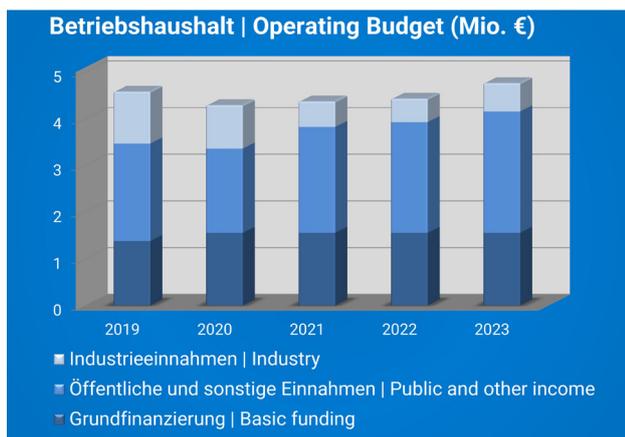
In 2023, a total of 1.66 million euros was invested in the continuous expansion of the technological equipment.

Staff

At year-end 2023, Institut für Nanophotonik Göttingen had 51 employees, 41 of them scientists and technicians, which corresponds to 80.4 % 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 2023, 4 students and research assistants were supported at the IFNANO. In addition, two doctoral candidates concluded their fellowship at the IFNANO in 2023 in cooperation with the Georg August University Göttingen.



ANO

IFNANO

IFNANO

IFNANO

IF

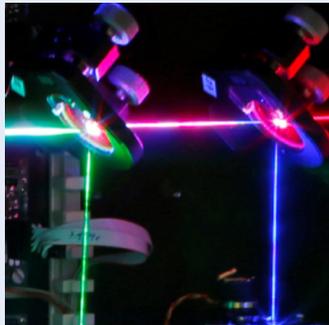
IFNANO

Die Abteilungen

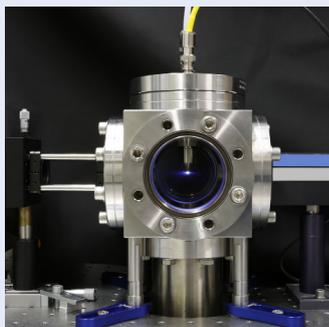
The Departments



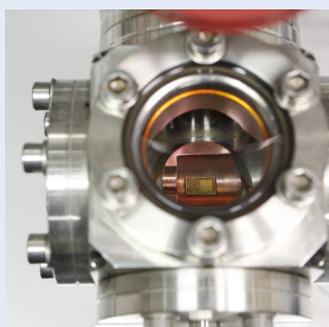
Optische Nanoskopie
Optical Nanoscopy



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

Dr. Debadrita Ghosh

Dr. Carola Gregor

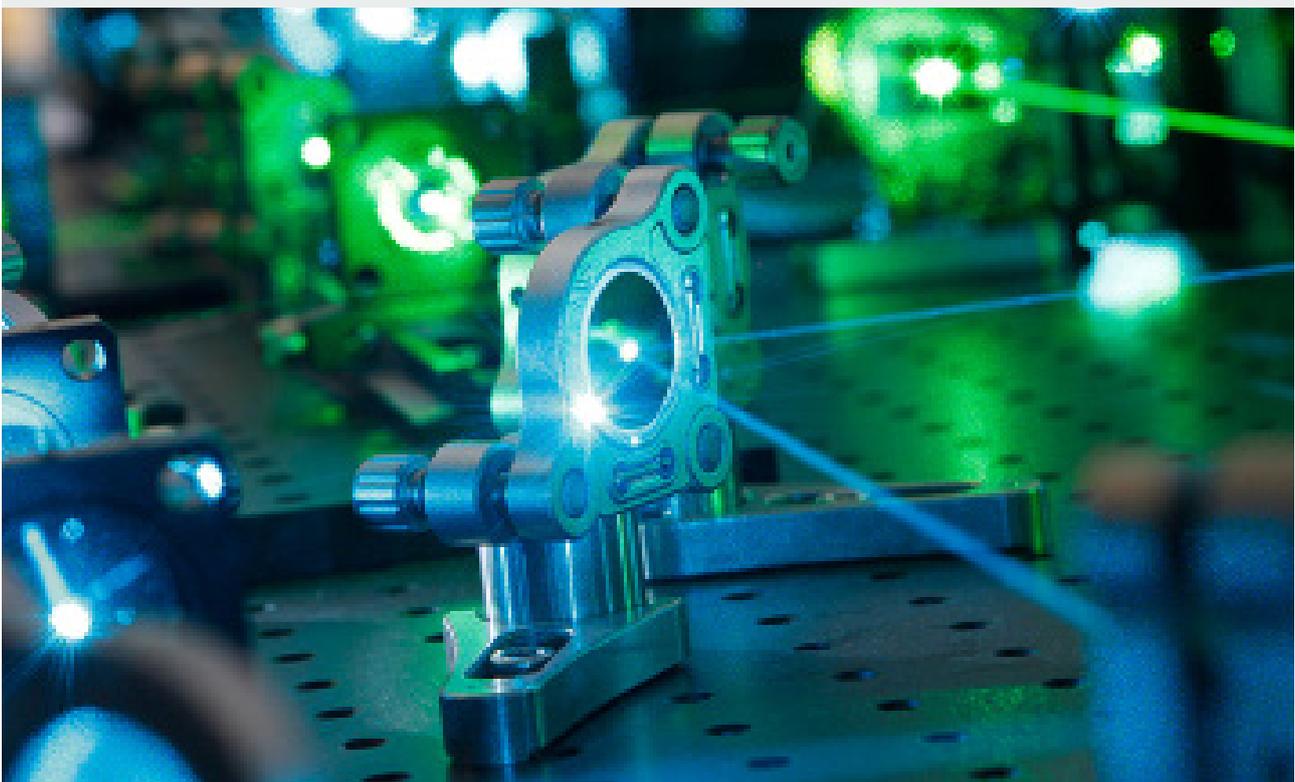
Dr. Parul Jain

Dr. René Siegmund

Ayiben Nuerbahati

Theresa Brinker

Lenny Reinkensmeier



Optische Nanoskopie

Optical Nanoscopy

Das Beobachten der Nanowelt im Inneren von biologischen Zellen eröffnet beispiellose Möglichkeiten zum Verständnis der dort ablaufenden molekularen Prozesse. Dieser Erkenntnisgewinn ist einer der Schlüssel für die Aufklärung von Krankheitsmechanismen und für die Entwicklung innovativer diagnostischer Verfahren sowie neuer Medikamente, einschließlich deren therapeutischer Anwendung.

Die konventionelle Lichtmikroskopie hat sich in den Lebenswissenschaften als ein unverzichtbares Werkzeug bewährt, obwohl sie einer wesentlichen Einschränkung unterliegt. Ihre Auflösung ist aufgrund der Wellennatur des Lichts auf 200 bis 300 Nanometer begrenzt, was dem Beobachter den Zugang zur entscheidenden Größenskala verwehrt: Die Nanowelt bleibt verborgen.

Die hochauflösende Fluoreszenzmikroskopie umgeht diese Limitierung und bedient sich hierzu eines Tricks. Sie macht sich die Eigenschaften fluoreszierender Markermoleküle zunutze, 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 erweitert kontinuierlich das Methodenspektrum der hochauflösenden Fluoreszenzmikroskopie.

Observing the nanoworld within biological cells provides unparalleled opportunities for understanding molecular processes occurring therein. This gain in knowledge is one of the keys to uncovering mechanisms behind diseases and for the development of innovative diagnostic tools as well as novel drugs, including their therapeutic uses.

Conventional light microscopy has established itself as an indispensable tool in the life sciences, yet it faces a significant limitation. The light microscope's resolution is limited to 200 - 300 nanometers due to the wave nature of light, which prevents observers from accessing the crucial size scale: the nanoworld remains hidden.

Super-resolution fluorescence microscopy circumvents this limitation by employing a trick. It utilizes the properties of fluorescent marker molecules to read out the information within a diffraction-limited spot in a sequential manner. In this way, the resolution of an "optical nanoscope" is no longer limited by light diffraction, thus sharpening our view into the nanoworld.

In 2014, Stefan W. Hell, Eric Betzig, and William E. Moerner were awarded the Nobel Prize in Chemistry for their pioneering work in the development of super-resolution fluorescence microscopy. The "Optical Nanoscopy" department focuses on applied basic research in this area, continuously expanding the scope of methods available for super-resolution fluorescence microscopy.

Optische Nanoskopie

Optical Nanoscopy

MINFLUX-Nanoskopie für die dreidimensionale Bildgebung mit nanoskaliger Auflösung

Die höchstauflösende Fluoreszenzmikroskopie, auch als Nanoskopie bekannt, hat die Art und Weise revolutioniert, in der Forschende biologische Proben untersuchen und analysieren, da sie eine Detailgenauigkeit bietet, die zuvor mit Lichtmikroskopie unerreicht war. Die MINFLUX-Nanoskopie, eine der neuesten Methoden auf diesem Gebiet, erreicht eine bemerkenswerte Präzision bei der Lokalisierung von fluoreszierenden Markern bis hinunter zu 1 bis 3 nm und erlaubt damit die Visualisierung einzelner Proteine.

Die Grundidee der MINFLUX-Nanoskopie besteht darin, das detektierte Fluoreszenzsignal zu minimieren und dies für die Ortsbestimmung einzelner Marker zu nutzen. Dazu wird die Probe in einem vordefinierten Muster systematisch mit einem ringförmigen Anregungsstrahl abgetastet. Durch iterative Anpassungen von Durchmesser und Position dieses Musters wird diejenige Position identifiziert, an der keine Fluoreszenz detektiert wird und demzufolge das Zentrum des Rings mit dem Fluorophor überlagert ist.

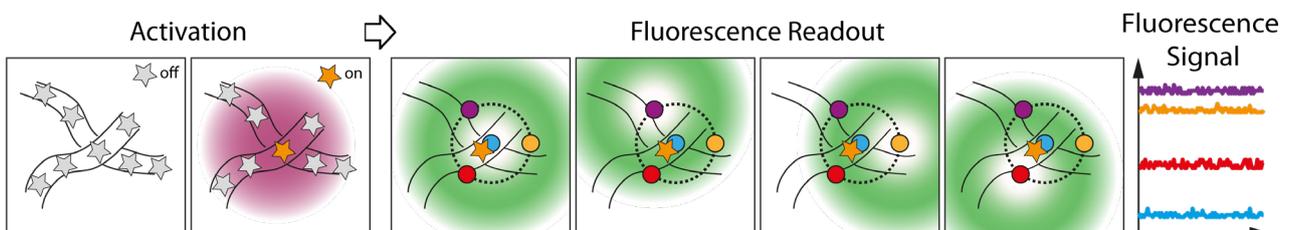
In Zusammenarbeit mit Partnern aus Schweden, der Schweiz und Deutschland arbeiten wir im Rahmen des EU-geförderten Projekts NanoVIB an der methodischen Weiterentwicklung der MINFLUX-Nanoskopie.

MINFLUX nanoscopy for three-dimensional imaging with nanoscale resolution

Super-resolution fluorescence microscopy, also known as nanoscopy, has revolutionized the way in which researchers study and analyze biological samples by providing a level of detail previously unattainable with light microscopy. MINFLUX nanoscopy, one of the latest methods in this field, achieves remarkable precision in the localization of fluorescent markers down to 1 to 3 nm, allowing the visualization of individual proteins.

The fundamental concept of MINFLUX nanoscopy is to minimize the detected fluorescence signal and to employ this process to determine the location of individual markers. This is achieved by systematically scanning the sample in a predefined pattern, using a ring-shaped excitation beam. Through iterative adjustments of the pattern's diameter and position, the position is identified at which no fluorescence is detected, indicating the overlay of the ring center with the fluorophore.

In collaboration with partners from Sweden, Switzerland, and Germany, and within the scope of the EU-funded project NanoVIB, we are working on the ongoing methodological advancement of MINFLUX nanoscopy.



▲ Prinzip der MINFLUX-Nanoskopie. Ein einzelnes Molekül wird zunächst zufällig in einen fluoreszenzfähigen Zustand geschaltet. Anschließend wird ein ringförmiger Anregungsfokus iterativ um das angeschaltete Molekül herum positioniert. Die Molekülposition kann daraufhin berechnet werden, da sich das jeweils detektierte Fluoreszenzsignal mit dem Abstand der Intensitätsnullstelle des Fokus von der Molekülposition ändert.

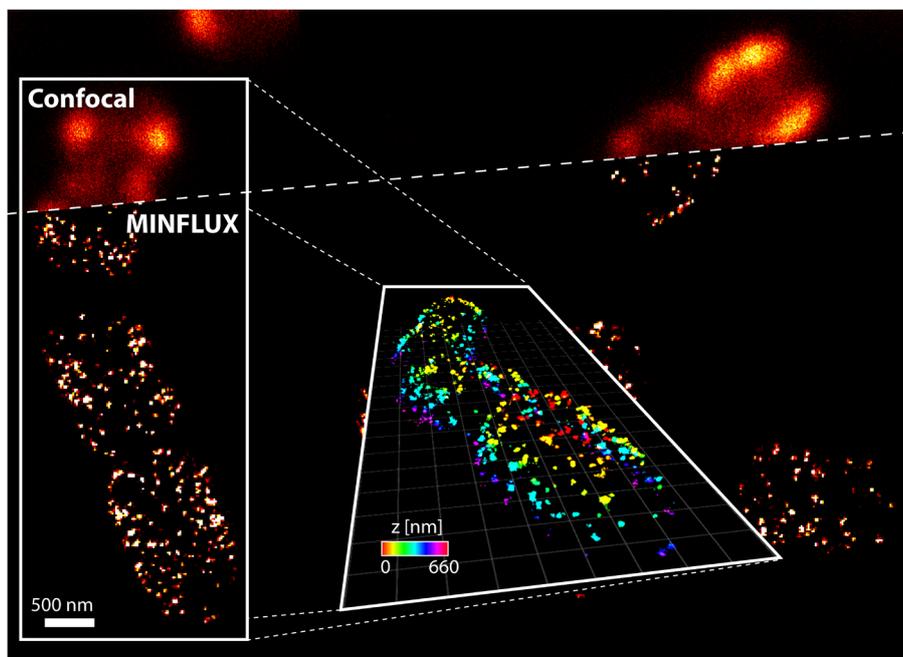
Concept of MINFLUX nanoscopy. First, an individual molecule is switched to its fluorescent state. Then, a ring-shaped excitation focus is iteratively positioned around the activated molecule. The molecule's location can now be calculated since the fluorescence signal detected in each case changes with the distance of the zero-intensity position of the focus from the molecule location.

Optische Nanoskopie

Optical Nanoscopy

Ziel des Projekts ist die Entwicklung einer fortschrittlichen Bildgebungsplattform, die modernste Methoden der Fluoreszenzmikroskopie wie MINFLUX, Zwei-Photonen-Anregung (TPE) und TPE-Transient-State-Imaging vereint. Zusätzlich wird die Analyse der chemischen Eigenschaften einer Probe auf Basis von stimulierter Raman-Streuung integriert. Diese innovative Bildgebungsplattform soll eingesetzt werden, um die molekularen Mechanismen zu untersuchen, die Pneumokokken-Erkrankungen zugrunde liegen – schweren Infektionen, die erheblich zur weltweiten Morbidität und Mortalität beitragen. Wir erwarten, dass unser komplementärer Ansatz einen entscheidenden Schritt hin zu einer wirksamen Behandlung von bakteriellen Infektionen und somit zur Vorbeugung von schweren Verläufen darstellt. Perspektivisch dürften sich auch für andere Krankheiten neue Wege zum Verständnis, zur Diagnose und zur Vorbeugung eröffnen.

The project's aim is to develop an advanced imaging platform that combines state-of-the-art fluorescence microscopy methods such as MINFLUX, two-photon excitation (TPE), and TPE-transient state imaging. Additionally, the analysis of the chemical properties of a sample through stimulated Raman scattering will be integrated. This innovative imaging platform will be used to investigate the molecular mechanisms underlying pneumococcal diseases - serious infections that contribute significantly to global morbidity and mortality. We anticipate that our complementary approach will constitute a major step towards effective treatment for bacterial infections, thereby contributing to the prevention of severe outcomes. In future, new avenues for understanding, diagnosing, and preventing other diseases are likely to emerge.



▲ Konfokal- und MINFLUX-Aufnahme des Pneumokokken-Oberflächenproteins PspC2. Erst im MINFLUX-Bild wird die genaue Verteilung der gefärbten Proteine, die im Konfokalbild nicht zu erkennen ist, sichtbar. Das Einsatzbild zeigt das dreidimensionale Auflösungsvermögen des MINFLUX-Nanoskops.
Confocal and MINFLUX image of the pneumococcal surface protein PspC2. The MINFLUX image reveals the precise distribution of the labeled proteins, not discernable in the confocal image. The inset illustrates the three-dimensional resolution capability of the MINFLUX nanoscope.

Optische Nanoskopie

Optical Nanoscopy

Schnelle Aberrationskorrektur für die STED-Mikroskopie

Die STED-Mikroskopie gilt als prominenteste Variante der ensemblebasierten Nanoskopiemethoden und erreicht routinemäßig eine optische Auflösung, die das Beugungslimit um mindestens eine Größenordnung übertrifft. Ihr Prinzip basiert darauf, dass ein ringförmiger Laserfokus, der mit einem Anregungsfokus überlagert ist, die Größe des fluoreszenzfähigen Bereichs mittels stimulierter Emission einengt, was einer Verbesserung der Auflösung gleichkommt.

Der Trend in der biomedizinischen Forschung hin zu minimalinvasiver Probenpräparation, zum Beispiel für die Untersuchung von Gewebeschnitten oder Modellorganismen, stellt für die Nanoskopie im Allgemeinen und für die STED-Mikroskopie im Besonderen eine immer größer werdende Herausforderung dar. Dies liegt an probeninduzierten Aberrationen, also Verzerrungen der Wellenfront, die die Fokussierung des Lichts erheblich beeinträchtigen können, wodurch die Bildqualität signifikant verschlechtert werden und der Auflösungsgewinn verloren gehen kann.

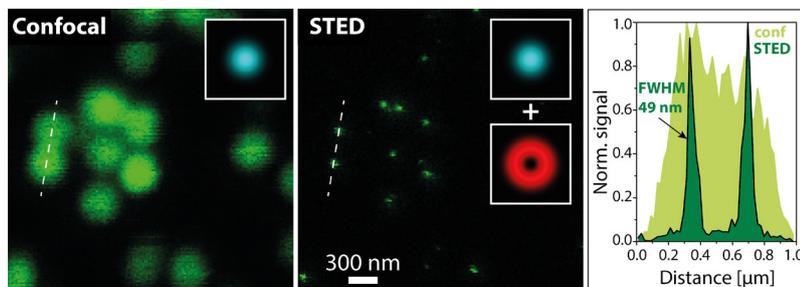
Der Einsatz von adaptiven Optiken (AO) bietet hier eine Lösung, da mit ihnen Wellenfronten dynamisch modifiziert werden können. Hierbei liegt die Herausforderung in der geeigneten Wahl der Modifikation, die die Bildqualität bestmöglich wiederherstellt.

Fast aberration correction for STED microscopy

STED microscopy is considered the most prominent variant of the ensemble-based nanoscopy methods and routinely achieves an optical resolution that surpasses the diffraction limit by at least one order of magnitude. The underlying principle of this technique involves a ring-shaped laser focus overlapping with an excitation focus, effectively reducing the size of the area capable of fluorescence through stimulated emission. This confinement represents an improvement in resolution.

The trend in biomedical research towards minimally invasive sample preparation, for example for the examination of tissue sections or model organisms, presents an increasingly challenging task for nanoscopy in general, and STED microscopy in particular. This is due to sample-induced aberrations, namely distortions of the wave front, that can severely impair the focusing of light, leading to a substantial degradation of image quality and a potential loss of the resolution increase.

Utilizing adaptive optics (AO) presents a viable solution to this issue because they have the ability to dynamically alter wave fronts. The key challenge is selecting the most effective modification to optimally restore the image quality.



Konfokales (links) und STED-Bild (Mitte) von fluoreszierenden Kugeln. Die Einsatzbilder zeigen die jeweils verwendeten fokalen Intensitätsverteilungen (Anregung: cyan, STED: rot). Der Graph rechts veranschaulicht die Auflösungsverbesserung anhand von Intensitätsprofilen entlang der gestrichelten weißen Linien.

Confocal (left) and STED image (center) of fluorescent microspheres. The insets show the focal intensity distributions used in each case (excitation: cyan, STED: red). The graph (right) illustrates the resolution improvement by means of intensity profiles along the dashed white lines.

Optische Nanoskopie

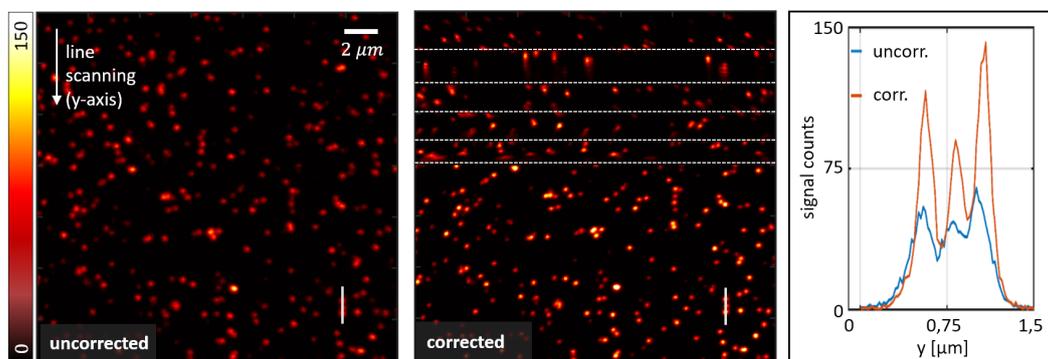
Optical Nanoscopy

Dies erfordert entweder eine direkte Messung der Wellenfront oder eine Analyse des detektierten Fluoreszenzsignal, um aus diesem eine geeignete Maßzahl abzuleiten. Bisher wurden Bildeigenschaften wie Helligkeit und Schärfe für eine solche Metrik verwendet, was wiederholte Bildaufnahmen erfordert. Dieser Ansatz ist daher langsam und führt zu einem verstärkten Photobleichen, was nicht nur Fehler bei der Aberrationskorrektur, sondern auch eine stark reduzierte Bildhelligkeit verursachen kann.

Statt eine Bildmetrik für die AO-basierte Aberrationskorrektur zu verwenden, analysieren wir den Fluoreszenz-Photonenstrom und nutzen dabei die Tatsache aus, dass die beobachtete Fluoreszenzlebensdauer von der lokalen STED-Intensität abhängt. Ist der STED-Fokus aberriert, so sinkt seine Maximalintensität, was wiederum 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 erlaubt daher eine schnelle und ortsabhängige Aberrationskorrektur, die während der STED-Bilderfassung durchgeführt werden kann und das begrenzte Budget an Fluoreszenzphotonen effizient nutzt.

To achieve this, it is necessary to either directly measure the wave front, or to analyze the detected fluorescence signal itself and derive a suitable metric from it. So far, image characteristics such as brightness and sharpness have been used for such a metric, necessitating repeated image captures. This approach is therefore slow and leads to increased photobleaching, potentially leading to aberration correction errors and significantly reduced image brightness.

Our approach diverts from using such an image-based metric for aberration correction with adaptive optics. Instead, we focus on analyzing the fluorescence photon stream, capitalizing on the fact that the observed fluorescence lifetime varies with the local STED intensity. If the STED focus is aberrated, its maximum intensity decreases, affecting the fluorescence decay curve. By suitably evaluating the exact moment of fluorescence emission with a resolution in the range of a few tens of picoseconds, a metric is obtained for which, in principle, the analysis of the signal in a single image pixel is sufficient. This photon stream-based metric therefore enables fast and locationspecific aberration correction, which can be performed during STED image acquisition and efficiently uses the limited budget of fluorescence photons.



▲ Schnelle Aberrationskorrektur. Links: Unkorrigiertes STED-Bild von Goldnanokügelchen. Mitte: Aberrationskorrektur während einer STED-Messung desselben Bereichs wie in a) unter Verwendung von fünf Aberrationsmoden. Die horizontalen Linien markieren den für die Korrektur jeweils einer Mode verwendeten Bildbereich. Das restliche STED-Bild weist die optimierte Bildqualität auf. Rechts: Die Linienprofile entlang der weißen Linien verdeutlichen die Verbesserung der Bildqualität.

Fast aberration correction. Left: Uncorrected STED image of gold nanoparticles. Center: Aberration correction during a STED measurement of the same area as in a), using five aberration modes. The horizontal lines mark the image area used for the correction of each mode. The rest of the STED image exhibits optimized image quality. Right: The line profiles along the white lines illustrate the improvement in image quality.

Optische Nanoskopie

Optical Nanoscopy

Zellgängige organische Fluorophore für die STED-Mikroskopie von lebenden Zellen

Für die Aufnahme von Fluoreszenzbildern ist es in der Regel erforderlich, dass die zu untersuchenden Proteine mit fluoreszierenden Markern versehen sind. Bei lebenden Zellen besteht die Herausforderung darin, dass diese Marker entweder von der Zelle selbst exprimiert oder durch die intakte Zellmembran in die Zelle eingebracht und an das Zielprotein gebunden werden müssen.

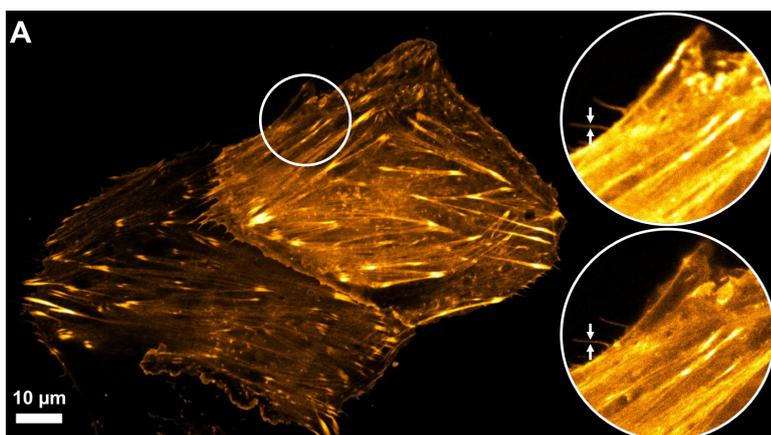
Die STED-Mikroskopie erlaubt es, dynamische Vorgänge in lebenden Zellen und Geweben mit einer Auflösung im Bereich von mehreren zehn Nanometern zu beobachten, und benötigt insbesondere für Zeitrafferaufnahmen fluoreszierende Marker mit besonders hoher Photostabilität. Hierfür sind organische Fluoreszenzfarbstoffe die erste Wahl. Diese lassen sich jedoch nicht wie fluoreszierende Proteine genetisch mit dem Zielprotein fusionieren, was den Einsatz alternativer Markierungsstrategien erforderlich macht.

Das Ziel eines gemeinsamen Forschungsprojekts mit unserem Kooperationspartner Abberior war es, das Spektrum an verfügbaren Markern für die STED-Bildgebung lebender Zellen zu erweitern. Wir entwickelten eine neue Serie von zellgängigen Fluoreszenzfarbstoffen und verknüpften diese mit einer auf der sogenannten Click-Chemie basierenden Methode zur Proteinmarkierung, bei der der Fluorophor direkt an das zu untersuchende Protein bindet.

Cell-permeable organic fluorophores for live-cell STED nanoscopy

For recording fluorescence images, it is typically required that the proteins under investigation are labeled with fluorescent markers. In the case of living cells, the challenge lies in the necessity for these markers to be either expressed by the cell itself or transported through the intact cell membrane and bound to the target protein.

STED microscopy enables the observation of dynamic processes within living cells and tissues with a resolution in the range of several tens of nanometers. Particularly for time-lapse imaging, this technique requires fluorescent markers with exceptionally high photostability. For this purpose, organic fluorescent dyes are the preferred choice. However, unlike fluorescent proteins, these dyes cannot be genetically fused to the target protein, which makes it necessary to employ alternative labeling strategies. The goal of a joint research project with our collaboration partner Abberior was to expand the spectrum of available markers for STED imaging in living cells. We developed a novel series of cell-permeable fluorophores and coupled these with a protein labeling method based on so-called click-chemistry, which allows the fluorophore to bind directly to the protein under investigation.



◀ Fluoreszenzbildgebung von lebenden CV-1-Zellen, in denen Aktinfilamente mit der Click-Chemie-basierten Methode fluoreszenzmarkiert wurden. Die Einsatzbilder zeigen ein konfokales (oben) und ein STED-Bild (unten) der markierten Region.

Fluorescence imaging of click-labeled actin filaments in living CV-1 cells with confocal (top) and STED (bottom) close-ups.

Optische Nanoskopie

Optical Nanoscopy

Diese Strategie ermöglicht die hochspezifische Markierung des Zielproteins bei kleinstmöglicher Größe des Markers und hat daher den Vorteil, dass dessen Einfluss auf die Proteinfunktion auf das notwendige Minimum beschränkt wird.

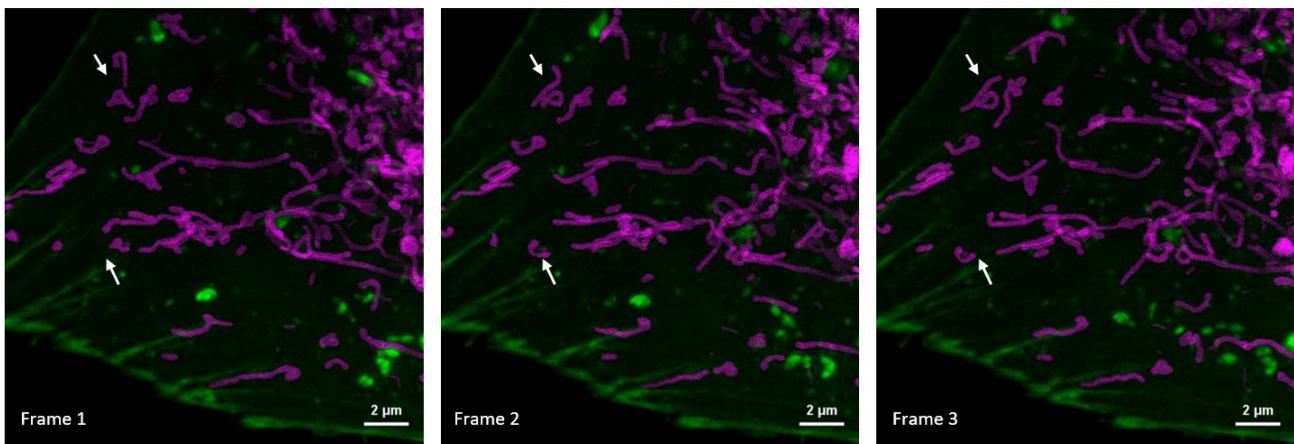
Unter Verwendung der neuen Farbstoffserie und der Click-Chemie-basierten Markierungsmethode führten wir nicht nur erfolgreich Zeitraffer-STED-Messungen in lebenden Zellen durch, sondern demonstrierten auch Zweifarben-STED-Mikroskopie verschiedener Strukturen, indem wir unsere Markierungsstrategie mit anderen orthogonalen und hochspezifischen Markierungsmethoden kombinierten. Wir konnten auf diese Weise zeigen, dass auch in lebenden Proben eine langzeitige STED-Bildgebung verschiedener Zielstrukturen möglich ist.

Unsere Ergebnisse stellen eine wichtige Erweiterung des "Markierungsbaukastens" dar und wir gehen davon aus, dass die Click-Chemie-basierte Markierungsmethode in Zukunft verstärkt für die höchstauflösende Fluoreszenzmikroskopie eingesetzt werden wird. Dies liegt vor allem an den jüngsten Entwicklungen wie beispielsweise der MINFLUX-Mikroskopie, für die die Verfügbarkeit kleinster Marker mit minimalem Abstand zum Zielprotein immer wichtiger werden wird.

This strategy enables the highly specific labeling of the target protein with the smallest possible size of the marker and therefore has the advantage of restricting its influence on the protein function to only what is absolutely necessary.

Utilizing the newly developed series of fluorophores and the click-chemistry-based labeling method, we not only successfully performed time-lapse STED measurements in living cells, but also demonstrated two-color STED microscopy of various structures. This was achieved by combining our labeling strategy with other orthogonal and highly specific labeling methods. In this way, we were able to show that long-term STED imaging of different target structures is also possible in living specimens.

Our results represent an important extension of the existing "labeling toolkit". We believe that the click-chemistry-based labeling method will be widely employed for super-resolution fluorescence microscopy in the future. This is mainly due to the latest developments such as MINFLUX microscopy, for which the availability of small labels with minimal distance to the target protein will become increasingly important.



▲
Zeitraum von zweifarbigem STED-Aufnahmen von lebenden CV-1-Zellen, in denen Aktinfilamente (grün) und Mitochondrien (magenta) fluoreszenzmarkiert sind. Die Pfeile markieren in jedem Bild die gleiche Zellregion und heben so die Bewegung der Mitochondrien über einen Zeitraum von 30 Sekunden zwischen den einzelnen Aufnahmen hervor.

Time series of two-color STED images of living CV-1 cells, in which the actin filaments (green) and mitochondria (magenta) are fluorescently labelled. The arrows in each image mark the same cell region, highlighting the movement of the mitochondria over a time period of 30 seconds between individual recordings.

Optische Nanoskopie Optical Nanoscopy

Quantitative Nanoskopie: Bestimmung der Fluorophoranzahl

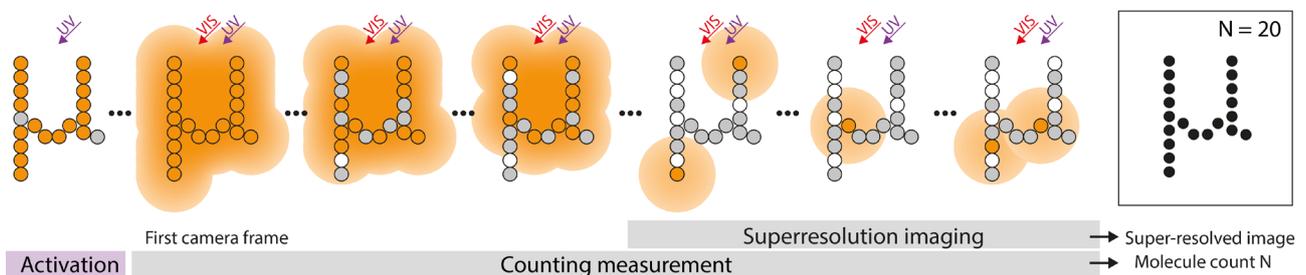
In den Lebenswissenschaften gewinnt die Nanoskopie aufgrund ihres überragenden Auflösungsvermögens als analytisches Werkzeug zunehmend an Bedeutung, obwohl die Bilder in der Regel keine Informationen über die Anzahl der abgebildeten Moleküle liefern. Um solche quantitativen Informationen aus den Messdaten zu extrahieren, muss die zeitliche und räumliche Verteilung der beobachteten Fluoreszenzphotonen analysiert werden. Diese hängt nicht nur von den photophysikalischen Eigenschaften der Fluoreszenzmoleküle ab, sondern auch davon, wie sie ausgelesen werden: räumlich gezielt wie bei der STED-Mikroskopie oder räumlich stochastisch wie bei Methoden, die auf dem Schalten einzelner Marker beruhen.

Bei Letzteren werden einzelne Fluorophore zufällig zum Aufleuchten gebracht und anschließend wieder ausgeschaltet. Anhand von Kameraaufnahmen solcher sogenannter Blinkereignisse können die jeweiligen Molekülpositionen in der Regel mit einer Genauigkeit von einigen 10 nm bestimmt werden. Wenn dieser Prozess ausreichend oft wiederholt wird, ergibt das Histogramm der Molekülpositionen eine hochaufgelöste Darstellung der zugrunde liegenden Fluorophorverteilung.

Quantitative nanoscopy: fluorophore counting

In the life sciences, nanoscopy is increasingly gaining importance as an analytical tool due to its outstanding resolution capability, although the images usually do not contain information about the number of imaged molecules. To derive such quantitative information from the measurement data, the temporal and spatial distribution of the observed fluorescence photons must be analyzed. The nature of this distribution depends not only on the photophysical properties of the fluorescence molecules, but also on how they are read out: either spatially targeted, as in STED microscopy, or spatially stochastic, as in methods that are based on the switching of individual markers.

In the latter approach, individual fluorophores are randomly caused to light up and are subsequently switched off. Based on camera recordings of such so-called blinking events, the respective molecule positions can typically be determined with a precision of a few tens of nanometers. If this process is repeated often enough, the histogram of molecule positions provides a highly resolved representation of the underlying fluorophore distribution.



Bildgebungsprotokoll: Zu Beginn werden alle Fluorophore mittels UV-Beleuchtung in ihren hellen, fluoreszenzfähigen Zustand versetzt. Anschließend führt zusätzliche Beleuchtung mit sichtbarem Licht zur Emission von Fluoreszenz, die von einer Kamera detektiert wird. Sobald das Blinken ausreichend vereinzelt ist, werden die Kamerabilder nicht nur zum Zählen, sondern auch für die höchstauflösende Bildgebung verwendet. Die Farben der Kreise stellen den photophysikalischen Zustand jedes Fluorophors dar: hell (orange), dunkel (grau), gelblich (weiß). Rechts: Höchstaufgelöstes Bild und Anzahl der gezählten Fluorophore.

Imaging protocol: Initially, all fluorophores are brought into a bright state capable of fluorescence using UV illumination. Subsequent illumination with visible light leads to the emission of fluorescence, which is detected by a camera. Once the blinking is sufficiently sparse, the camera frames are not only used for counting purposes, but also for super-resolution imaging. The circle colors indicate the photophysical state of each fluorophore: bright (orange), dark (gray), and bleached (white). Right: Super-resolved image and fluorophore count.

Optische Nanoskopie

Optical Nanoscopy

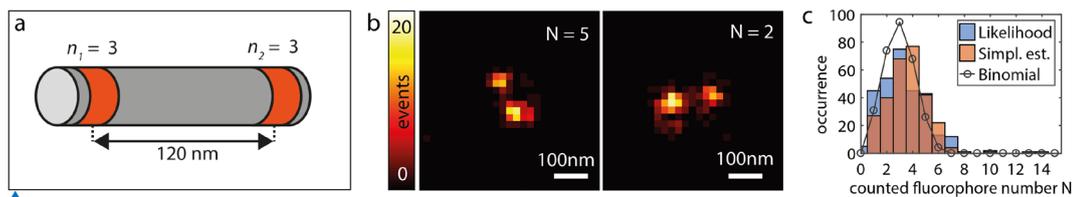
Obwohl in diesem Schema einzelne Fluorophore lokalisiert werden, ist das Zählen der Fluorophore nicht so einfach, wie es scheint. Die Anzahl der Moleküle kann aufgrund des gleichzeitigen Aufleuchtens mehrerer dicht beieinanderliegender Fluorophore oder des mehrfachen Blinkens desselben Fluorophors unter- oder überschätzt werden. Gemeinsam mit unseren Partnern vom Institut für Mathematische Stochastik haben wir einen vollständig datenbasierten Ansatz zum Zählen von Fluorophoren entwickelt. Dieser basiert auf der Analyse von Zeitspuren der Fluoreszenzintensität und beschreibt die Zustandsänderung der Fluorophore auf zwei Zeitskalen: einer schnellen innerhalb einer Kameraaufnahme und einer langsamen zwischen verschiedenen Kameraaufnahmen. Wir validierten unser Modell anhand von Einzelmolekülexperimenten und konnten darüber hinaus für DNA-Origami-Strukturen mit bekannter Anzahl an Bindungsstellen erfolgreich die Anzahl der gebundenen Fluorophore ermitteln.

Der Vorteil unserer Methode besteht darin, dass sie den Bildgebungsprozess vollständig statistisch modelliert und nicht auf der Analyse von - möglicherweise fehlerhaft identifizierten - Blinkereignissen basiert. Daher stellt sie einen vielversprechenden Ansatz dar, um die Anzahl an Fluorophoren auch in biologischen Proben erfolgreich zu bestimmen und dann – bei bekannter Effizienz und Stöchiometrie der Fluoreszenzmarkierung – Rückschlüsse auf die räumliche Organisation und die Funktionalität der markierten Strukturen zu ziehen.

Although individual fluorophores are localized within this scheme, counting the fluorophores is not as straightforward as it seems. The number of molecules can be underestimated or overestimated due to the simultaneous blinking of several closely spaced fluorophores or due to the multiple blinking of the same fluorophore.

In collaboration with our partners from the Institute of Mathematical Stochastics, we have developed a fully data-driven approach for counting fluorophores. It is based on the analysis of time traces of the fluorescence intensity and describes the state change of the fluorophores on two distinct timescales: a fast one within a camera exposure and a slow one between different camera frames. We validated our model using single-molecule experiments and were additionally able to determine the number of fluorophores bound to DNA origami structures with a known number of labeling sites.

The advantage of our method is that it models the imaging process completely statistically and does not rely on the analysis of - potentially erroneously identified - blinking events. It therefore represents a promising approach to successfully determine the number of fluorophores even in biological samples and then – given known efficiency and stoichiometry of the fluorescence labeling – draw conclusions about the spatial organization and functionality of the labeled structures.



Zählen von Fluorophoren. Links: Design einer Origami-Struktur mit zwei Bereichen, die jeweils drei Bindungsstellen aufweisen. Mitte: Superaufgelöste Bilder einzelner, fluoreszenzmarkierter Origami-Strukturen mit Anzahl der gezählten Fluorophore. Aufgrund unvollständiger Markierung ist die Anzahl geringer als die Anzahl der verfügbaren Bindungsstellen. Rechts: Das Histogramm von 297 analysierten Origami-Strukturen stimmt gut mit der erwarteten Verteilung (schwarz) für eine Bindungseffizienz von 49 % überein.

Fluorophore counting. Left: Design of origami structure with two areas featuring three labeling sites each. Center: Super-resolved images of single, fluorescently labeled origami structures, with number of counted fluorophores. Due to incomplete labelling, the fluorophore counts are less than the number of available labeling sites. Right: The histogram of 297 analyzed origami structures shows good agreement with the expected distribution (black) for a labeling efficiency of 49 %.

Optische Nanoskopie

Optical Nanoscopy

COMET – schnelle Driftkorrektur für die Nanoskopie

Objekte, die auf makroskopischer Ebene unbewegt erscheinen, können auf einer Größenordnung von Nanometern dennoch Bewegung zeigen. Dies gilt auch für Mikroskope, die aufgrund von Wärmeausdehnung, mechanischen Spannungen und anderen Kräften ständig nanoskopische Bewegungen erfahren. Mit der Entwicklung der hochauflösenden Fluoreszenzmikroskopie stellen diese Effekte eine große Herausforderung dar, da die Bildqualität durch kleinste Bewegungen der beobachteten Probe relativ zur Objektivlinse stark beeinträchtigt werden kann.

Methoden wie STORM und MINFLUX, die auf dem Lokalisieren einzelner Moleküle beruhen und daher im Folgenden unter dem Begriff SMLM (single molecule localization microscopy) zusammengefasst werden, akkumulieren Molekülkoordinaten über lange Zeiträume und sind daher besonders anfällig für solche Driftbewegungen. Um diese auszugleichen, wurden sogenannte "Driftkorrektur"-Algorithmen entwickelt, die in der Lage sind, die Drift abzuschätzen und die daraus resultierende Unschärfe im Bild zu korrigieren. Die etablierten, auf Kreuzkorrelation basierenden Driftkorrekturverfahren für SMLM-Methoden haben sich als robust erwiesen, sind jedoch auf eine grobe zeitliche Segmentierung angewiesen und können daher die Drift nur auf längeren Zeitskalen korrigieren.

COMET – fast drift correction for nanoscopy

Objects that appear to be stationary on a macroscopic level may still show motion at the nanometer scale. This also holds true for microscopes, which undergo nanoscopic motions due to thermal expansion, mechanical creep, and other forces. With the development of super-resolution light microscopy methods, these effects pose a significant challenge because the image quality can be easily degraded by the slightest motion of the observed specimen in relation to the objective lens.

Methods based on single molecule localization such as STORM and MINFLUX, which will be collectively referred to as Single Molecule Localization Microscopy (SMLM) hereafter, are especially sensitive because the measurement of the molecular coordinates is intrinsically spread out over long periods of time, during which sample drift may occur. To counter this effect, so-called "drift correction" algorithms were developed, which are capable of estimating the 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 drift on slow time scales.

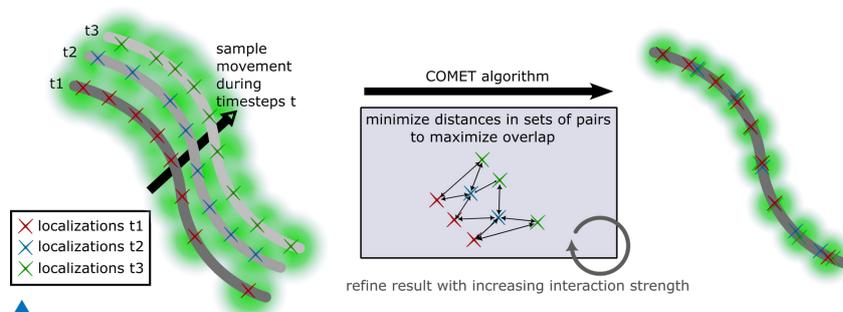


Abbildung 1: Schematische Darstellung der Driftkorrektur-Methode COMET. In SMLM-Messungen werden die Lokalisationen über die Zeit verwischt, wodurch sich die erreichbare Bildqualität erheblich verschlechtert. Der COMET-Algorithmus betrachtet jede Lokalisation im Kontext ihres Aufnahmezeitpunkts, um genau diejenige räumliche Verschiebung zu finden, die die meisten Lokalisationen überlappt und den negativen Effekt der Probendrift ausgleicht.

Figure 1: Schematic representation of COMET drift correction method. In SMLM measurements, localizations are blurred over time, significantly degrading the achievable image quality. The COMET algorithm considers each localization in the context of its acquisition time to precisely determine the spatial shift which overlaps most localizations and compensates for the negative effects of sample drift.

Optische Nanoskopie

Optical Nanoscopy

Wir haben einen neuen Ansatz zur Driftkorrektur für SMLM-Datensätze entwickelt, der die Daten optimal nutzt, um die Drift auf viel kürzeren Zeitskalen zu korrigieren. Unsere Methode mit dem Namen "Cost-Optimized Maximal Overlap Drift Estimation" (COMET) basiert auf folgendem Postulat: Der einzige zeitlich veränderliche Driftvektor, der die molekularen Lokalisationen im Datensatz maximal überlappt, entspricht der tatsächlichen Drift (Abbildung 1). Unter Verwendung einer Kostenfunktion, die die Überlappung der Molekülkoordinaten misst, und eines Optimierungsalgorithmus kann so der optimale Driftvektor gefunden werden. Damit konnten wir im direkten Vergleich zu konventionellen Methoden eine 50-fache Verbesserung der zeitlichen Auflösung des Driftschätzers zeigen. Dies führt direkt zu einer verbesserten Bildauflösung, da der Unschärfeeffect der Probendrift vollständig eliminiert wird (Abbildung 2). Darüber hinaus ist der COMET-Ansatz 100-mal schneller als die aktuellen, auf Kreuzkorrelation basierenden Methoden zur Driftschätzung. Dies kann Stunden an Datenverarbeitungszeit einsparen und einen viel höheren Bilddurchsatz für SMLM ermöglichen. COMET ist auf alle bestehenden SMLM-Datensätze anwendbar, die nun neu verarbeitet werden können, um ein schärferes, driftfreies Bild zu erhalten.

We have recently developed a new approach to drift correction in SMLM, which makes optimally efficient use of the data in order to estimate sample drift at much faster time scales. Our method, called "Cost-Optimized Maximal Overlap Drift Estimation" (COMET), is based on a postulate: the unique time-varying drift vector which maximally overlaps the molecular localizations in the dataset is the true experimental drift (Figure 1). Such a vector can be accounted for by using a cost function which measures the degree of spatial overlap of the molecule coordinates, and a large-scale optimization algorithm. With this, we were able to show that the time resolution of the drift estimate could be improved by up to 50 times using COMET compared to other methods. This directly results in improved image resolution, because the blurring effects of sample drift are fully eliminated (Figure 2). Moreover, COMET is much faster, with a calculation time 100 times shorter than the current state-of-the-art drift correction methods. This saves hours of data processing time, and allows higher image throughput for SMLM. COMET, now an open-source online tool, is immediately applicable to all existing SMLM datasets, which can now be reprocessed to obtain a sharper, drift-free images.

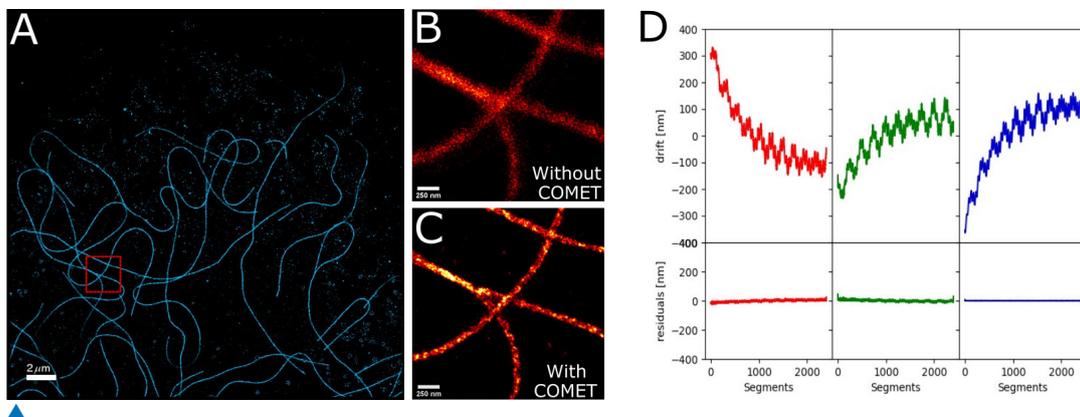


Abbildung 2: COMET-Anwendungsbeispiel. (A) SMLM-Messung an alpha-Tubulin-Filamenten mit simulierter Drift auf kurzen Zeitskalen. (B, C) zeigen die in (A) rot markierte Region ohne und mit COMET-Driftkorrektur. (D) zeigt die von COMET bestimmte Driftschätzung (oben) in X- (rot), Y- (grün) und Z-Richtung (blau) sowie die verbliebende Abweichung vom COMET-Ergebnis zur wahren Drift (unten).
 Figure 2: COMET application example. (A) SMLM measurement on alpha tubulin filaments with simulated drift on slow time scales. (B, C) Zoomed in view of the boxed region in (A), with and without COMET drift correction. (D) The drift estimate determined by COMET (top) in X (red), Y (green), and Z (blue) direction, as well as the residual deviations of the COMET result to the true drift (bottom).

Optische Nanoskopie

Optical Nanoscopy

Biolumineszierende Bakterien mit verbesserter Helligkeit

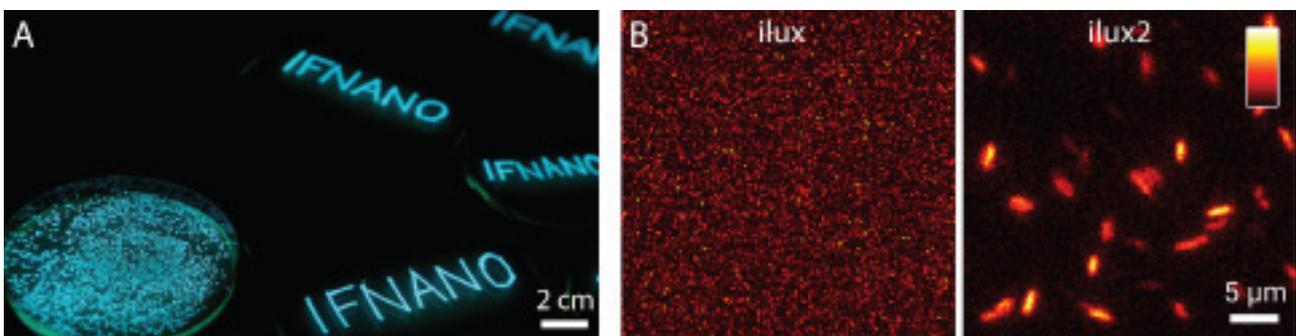
Lebende Zellen sind in der Lage, unter Verwendung des Prozesses der Biolumineszenz eigenständig Licht zu erzeugen. Dieser Vorgang findet in der Natur in einer Vielzahl verschiedener Lebewesen wie beispielsweise Glühwürmchen statt und kann auch zur Abbildung von Zellen in der Mikroskopie genutzt werden. Im Gegensatz zur Fluoreszenzmikroskopie und zu anderen lichtmikroskopischen Verfahren ist es bei der Biolumineszenz-Bildgebung nicht erforderlich, die Probe von außen mit Licht zu beleuchten. Dies bietet den Vorteil, dass lebende Zellen auch über lange Zeiträume ohne Photobleichen und phototoxische Effekte beobachtet werden können.

Das Biolumineszenzlicht wird in den Zellen durch die Oxidation eines Substrats erzeugt, welches als Luciferin bezeichnet wird. Bei dieser Reaktion entsteht ein Produkt in einem elektronisch angeregten Zustand, das bei der Rückkehr in den Grundzustand ein Photon aussendet und somit Biolumineszenzlicht erzeugt. Für die Reaktion ist außerdem ein Enzym erforderlich, das als Luciferase bezeichnet wird. Während in der Natur das Luciferin in der Regel von den Zellen selbst produziert wird, wird es bei der Bildgebung im Labor meist von außen zugegeben.

Bioluminescent bacteria with enhanced brightness

Living cells are capable of generating light on their own through the process of bioluminescence. This phenomenon occurs in nature in a wide variety of different living organisms, including fireflies, and can also be used for cell imaging in microscopy. Unlike fluorescence microscopy and other light microscopy techniques, bioluminescence imaging does not require illuminating the sample with external light. This offers the advantage that living cells can be observed over long periods of time without the risk of photobleaching or phototoxic effects.

The bioluminescence light is generated within cells through the oxidation of a substrate known as luciferin. This reaction creates a product in an electronically excited state, that, upon returning to the ground state, emits a photon, thereby generating bioluminescence light. The reaction also requires the presence of an enzyme, referred to as luciferase. In the natural environment, cells usually produce the luciferin themselves; however, for imaging in the laboratory, it is typically supplied from external sources.



Biolumineszenz von Bakterien: A) Fotografie von Petrischalen mit biolumineszierenden Bakterienkolonien. B) Biolumineszenz einzelner Bakterien, die eine bereits etablierte Version des Systems (links) bzw. das verbesserte System (rechts) enthalten.

Bioluminescence of bacteria: A) Photograph of petri dishes with bioluminescent bacterial colonies. B) Bioluminescence of individual bacteria containing an established version of the system (left) and the improved system.

Optische Nanoskopie

Optical Nanoscopy

Dies erhöht den Aufwand bei der Probenvorbereitung und erschwert darüber hinaus die Quantifizierung des Signals bei Langzeitmessungen, da das Luciferin durch die Biolumineszenzreaktion verbraucht wird und dadurch seine Konzentration mit der Zeit abnimmt.

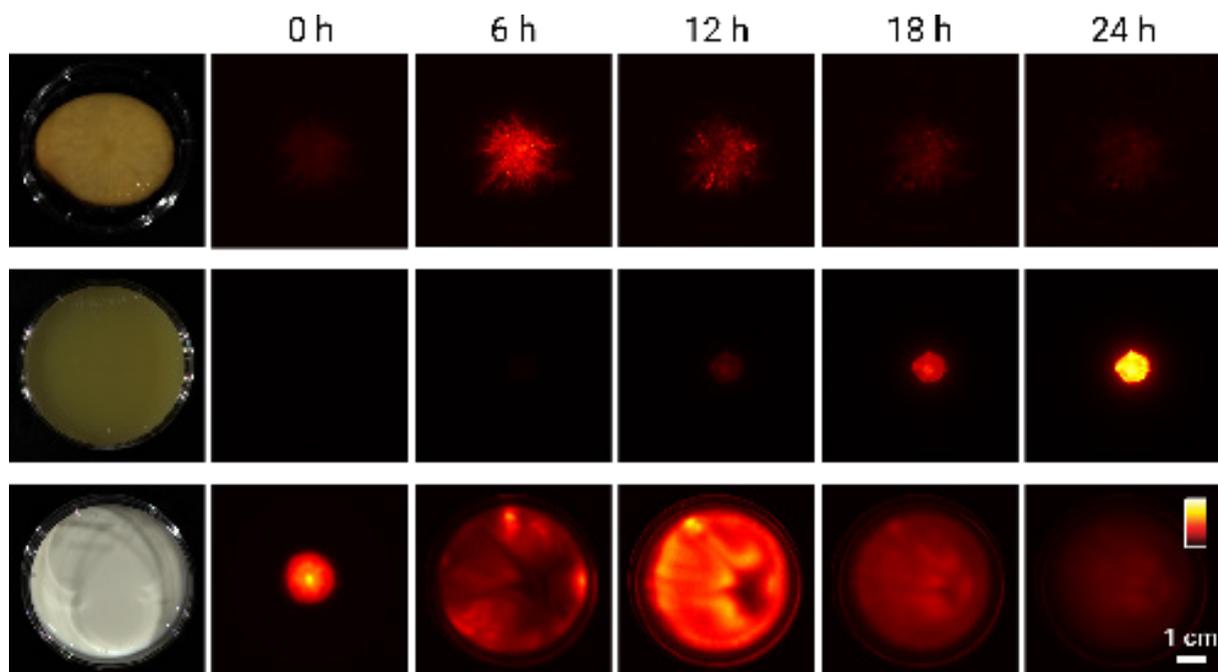
Durch Verwendung des Biolumineszenzsystems aus Bakterien kann die Luciferinzugabe umgangen werden. Da beim bakteriellen System alle Enzyme für die zelluläre Produktion des Luciferins bekannt sind, können diese zusammen mit der Luciferase in beliebige Zellen eingebracht und die Zellen dadurch kontinuierlich zum Leuchten gebracht werden.

Mit Hilfe eines optimierten Mutagenese-Verfahrens konnten wir die beteiligten Enzyme verbessern, sodass die Lichtemission stabil markierter biolumineszenter Bakterienstämme deutlich gesteigert werden konnte. Dies kann beispielsweise genutzt werden, um einzelne Bakterien mittels Biolumineszenz-Mikroskopie abzubilden oder um das Wachstum von Bakterien auf Lebensmittelproben zu untersuchen.

This increases the effort required for sample preparation and also complicates the quantification of the signal in long-term measurements, as luciferin is consumed by the bioluminescence reaction, leading to a gradual decrease in its concentration over time.

By using the bioluminescence system from bacteria, the addition of luciferin can be circumvented. Since all enzymes required for the cellular production of luciferin are known for the bacterial system, they can be co-introduced with luciferase into any cells, thereby enabling the cells to emit light continuously.

Using an optimized mutagenesis method, we were able to improve the involved enzymes, thereby significantly increasing the light emission of stably labeled bioluminescent bacterial strains. This can be used, for example, to image single bacteria through bioluminescence microscopy or to investigate the growth of bacteria on food samples.



Wachstum stabil biolumineszierender Bakterien auf unterschiedlichen Lebensmittelproben (von oben nach unten: rohe Kartoffel, Kartoffelbrei, Milch).

Growth of stable bioluminescent bacteria on different food samples (from top to bottom: raw potato, mashed potatoes, milk).

Optische Nanoskopie Optical Nanoscopy

Biochemische Bildgebung durch stimulierte Raman-Streuung

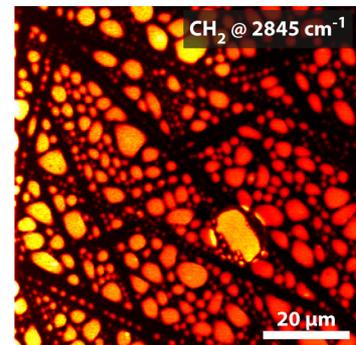
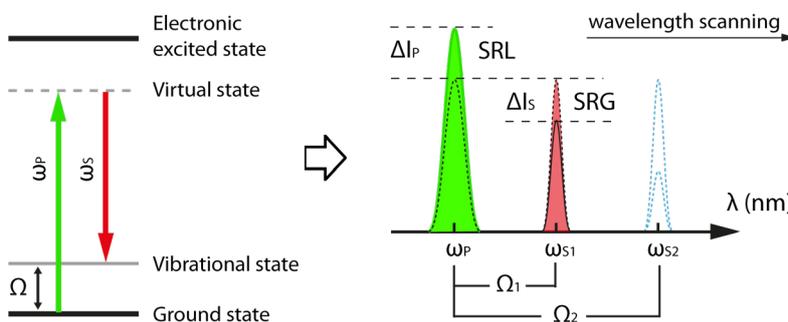
Informationen zu biochemischen und strukturellen Eigenschaften von biologischen Zellen sind von entscheidender Bedeutung für die Analyse und für das Verständnis von zellulären Prozessen, einschließlich morphologischer Veränderungen und metabolischer Vorgänge. Unter Ausnutzung des Effekts der stimulierten Raman-Streuung (SRS) stellt die sogenannte SRS-Mikroskopie eine dafür geeignete Kontrastmethode dar. Im Vergleich zu fluoreszenzmikroskopischen Techniken benötigt sie keine Marker, um Informationen über die Probe zu erhalten.

In einem SRS-Mikroskop wird die Probe mit zwei gepulsten, miteinander räumlich und zeitlich überlagerten Laserstrahlen unterschiedlicher optischer Frequenz beleuchtet. Der Pumpstrahl (mit Frequenz ω_p) kann ein Molekül in der Probe aus dem elektronischen Grundzustand in ein virtuelles Niveau anregen. Durch den Stokes-Strahl (mit Frequenz ω_s) wird das Molekül mittels stimulierter Emission zurück in ein höheres Vibrationslevel des Grundzustandes gebracht. Die Energiedifferenz von Pump- und Stokesphoton entspricht dabei dem Energieniveau des untersuchten Vibrationszustands.

Biochemical imaging through stimulated Raman scattering

Information about biochemical and structural properties of biological cells is of significant importance for analyzing and understanding cellular processes, including morphological changes and metabolic processes. By exploiting the effect of stimulated Raman scattering (SRS), the so-called SRS microscopy is a suitable contrast method for this purpose. Compared to fluorescence microscopy techniques, it does not require any markers to obtain information about the sample.

In an SRS microscope, the sample is illuminated by two pulsed, spatially and temporally overlapping laser beams of different optical frequencies. The pump beam (with frequency ω_p) can excite a molecule in the sample from its electronic ground state to a virtual state. The Stokes beam (with frequency ω_s) drives the molecule back to a higher vibrational level of the ground state by means of stimulated emission. The energy difference between the pump and Stokes photon corresponds to the energy level of the vibrational state under investigation.

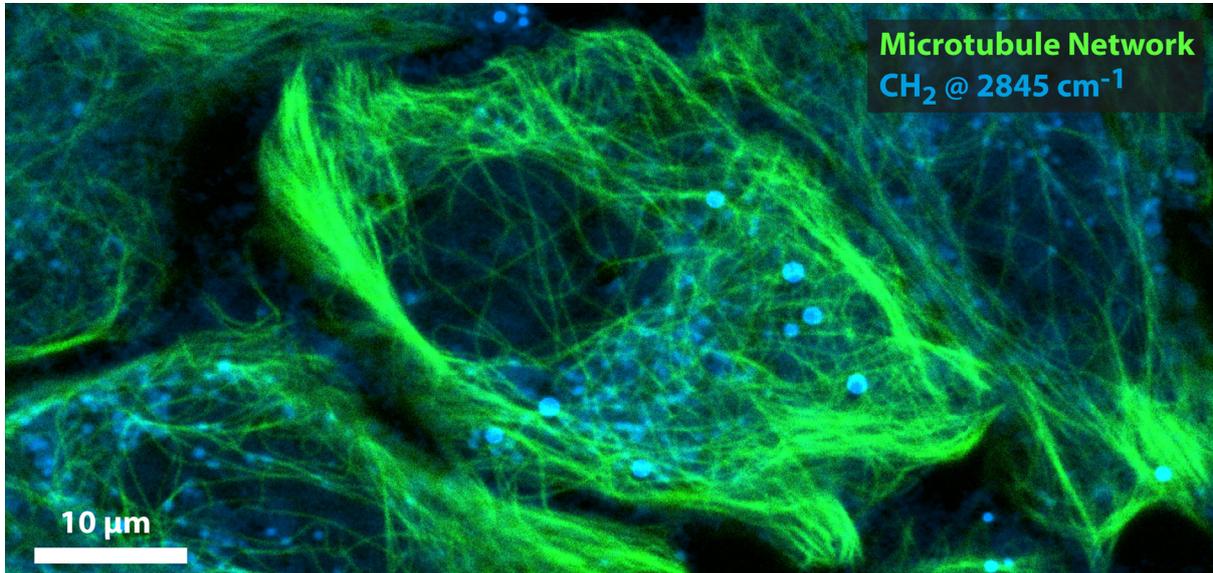


Prinzip der stimulierten Raman-Streuung (SRS). Ein Molekül im elektronischen Grundzustand wird mit Hilfe des Pumpstrahls (ω_p), in ein virtuelles Niveau überführt. Ein zweiter Laserstrahl, der sogenannte Stokes-Strahl (ω_s), zwingt das Molekül mittels stimulierter Emission eines Photons in den Grundzustand. Der Intensitätsgewinn des Stokes-Strahls (stimulated Raman gain, SRG) oder Intensitätsverlust des Pumpstrahls (stimulated Raman loss, SRL) wird detektiert. Die rechte Abbildung zeigt das SRS-Signal (SRL) einer Wasser-Öl-Immersion bei 2845 cm^{-1} . Die Öltröpfchen sind als helle Bereiche zu erkennen.

Principle of stimulated Raman scattering (SRS). A molecule in its electronic ground state is elevated to a virtual level with the aid of the pump beam (ω_p). A second laser beam, the so-called Stokes beam (ω_s), forces the molecule back to the ground state through stimulated emission of a photon. The intensity gain of the Stokes beam (Stimulated Raman Gain, SRG) or intensity loss of the pump beam (Stimulated Raman Loss, SRL) is detected. The right illustration shows the SRS signal (SRL) of a water-oil immersion at 2845 cm^{-1} . Bright areas correspond to the oil droplets.

Optische Nanoskopie

Optical Nanoscopy



▲ Überlagerung eines konfokalen Fluoreszenzbildes des Mikrotubuli-Netzwerks (grün) und eines SRS-Bilds der CH_2 -Streckschwingung von Lipiden bei 2845 cm^{-1} (blau) in lebenden HeLa-Zellen.
Superposition of a confocal fluorescence image of the microtubule network (green) and the SRS image of the CH_2 stretching oscillation of lipids at 2845 cm^{-1} (blue) in living HeLa cells.

Durch Veränderung der Pumpwellenlänge können verschiedene Vibrationsniveaus untersucht werden und somit die spektroskopischen Fingerabdrücke verschiedener Moleküle und Molekülbindungen orts aufgelöst dargestellt werden.

Im Rahmen des EU-Projekts NanoVIB kombinieren wir die SRS-Bildgebung mit der komplementären, fluoreszenzbasierten MINFLUX-Nanoskopie und erarbeiten in Kooperation mit unseren Projektpartnern speziell angepasste und optimierte Färbe-, Beleuchtungs- und Bildgebungsstrategien.

Diese Kombination molekulspektroskopischer und höchst aufgelöster, fluoreszenzbasierter Bildgebung ermöglicht es, neue Einblicke in biologische Prozesse zu erhalten. So kann beispielsweise der Einfluss der chemischen Umgebung auf die Anordnung verschiedener Proteine in Zellen, Bakterien und Viren untersucht werden.

Die gewonnenen Erkenntnisse bilden die Grundlage für das Verständnis der Mechanismen, durch die Bakterien menschliche Zellen infizieren, und werden zukünftig die Entwicklung krankheitsspezifischer Arzneimittel wie Medikamente und Impfstoffe ermöglichen.

By changing the pump wavelength, various vibration levels can be probed, allowing to depict the spectroscopic fingerprints of different molecules and molecular bonds to be depicted in a spatially resolved manner.

As part of the EU project NanoVIB we combine SRS imaging with the complementary, fluorescence-based MINFLUX nanoscopy and develop tailored and optimized staining, illumination and imaging strategies in collaboration with our project partners. This combination of molecular spectroscopy and super-resolution fluorescence microscopy provides new insights into biological processes. For instance, it allows exploration into how the chemical environment influences the organization of various proteins in cells, bacteria, and viruses.

These new findings form the basis for understanding the mechanisms by which bacteria infect human cells, and will enable future development of disease-specific pharmaceutical products such as drugs and vaccines.

Optische Nanoskopie

Optical Nanoscopy

Auflösungssteigerung in der Reflexionsmikroskopie von opaken Proben

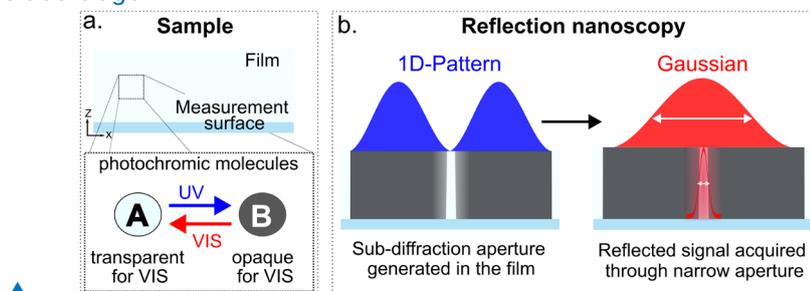
In der Materialwissenschaft hängen die Eigenschaften von Verbundwerkstoffen von mikrostrukturellen Merkmalen ab, deren Größen von Mikrometern bis zu Nanometern reichen. Für die Materialcharakterisierung wird häufig die Reflexionsmikroskopie eingesetzt, da sie einfache Probenvorbereitung erlaubt und kosteneffizient ist. Moderne Materialien mit Strukturgrößen unter 250 nm erfordern jedoch aufgrund der durch Beugung begrenzten Auflösung optischer Mikroskope anspruchsvollere und aufwändigere Beobachtungsmethoden wie beispielsweise die Rasterelektronenmikroskopie.

In den letzten Jahren hat die Fluoreszenzmikroskopie eine transformative Entwicklung durchlaufen und erreicht nun molekulare Auflösung, indem sie das reversible Schalten von Fluorophoren nutzt. Die direkte Übertragung dieses Prinzips von der Fluoreszenz- auf die Reflexionsmikroskopie ist jedoch herausfordernd, da die Oberfläche von Materialien in der Regel nicht mit fluoreszierenden Markern markiert werden kann. Erkenntnisse aus der optischen Lithographie zeigen, dass die Auflösung durch die Modulation der Absorption dünner photochromer Filme verbessert werden kann. Dieser Ansatz wurde bereits von anderen Forschungsgruppen experimentell auf die Transmissions-, nicht aber auf die Reflexionsmikroskopie übertragen.

Resolution improvement in reflection microscopy of opaque samples

In materials science, the properties of composite materials are intricately linked to microstructural features, spanning from micrometers to nanometers. Reflective optical microscopy is widely employed for material characterization, owing to its straightforward sample preparation and cost-effectiveness. Modern materials with feature sizes below 250 nm, however, necessitate more advanced imaging techniques, such as scanning electron microscopy, because of the diffraction-limited resolution of optical microscopes.

In recent years, fluorescence microscopy has undergone a transformative evolution and now achieves molecular resolution by utilizing reversible switching of fluorophores. Transferring this principle directly from fluorescence to reflection microscopy is challenging because the surfaces of materials typically cannot be labelled with fluorescent markers. Insights from optical lithography demonstrate that the resolution can be improved by modulating the absorption of thin photo-chromic films. Other research groups have already experimentally employed this approach in transmission microscopy, but not in reflection microscopy.



Auflösungsverbesserung in der Reflexionsmikroskopie. a) Ein Film mit photochromen Molekülen kann optisch zwischen transparent und opak hin und hergeschaltet werden. b) Mit einem Laserfokus mit zentraler Nullstelle wird in diesem Film eine transparente, enge Nahfeldblende erzeugt. Durch diese Blende, deren Breite die Auflösung bestimmt, erfolgt die Reflexionsmessung der Oberfläche.

Resolution improvement in reflection microscopy. a) A film with photochromic molecules can be optically switched between transparent and opaque. b) Using a laser focus with a central zero, a transparent, narrow near-field aperture is generated in the film. Subsequently, reflection measurements on the surface are performed through this aperture, whose width determines the resolution.

Optische Nanoskopie

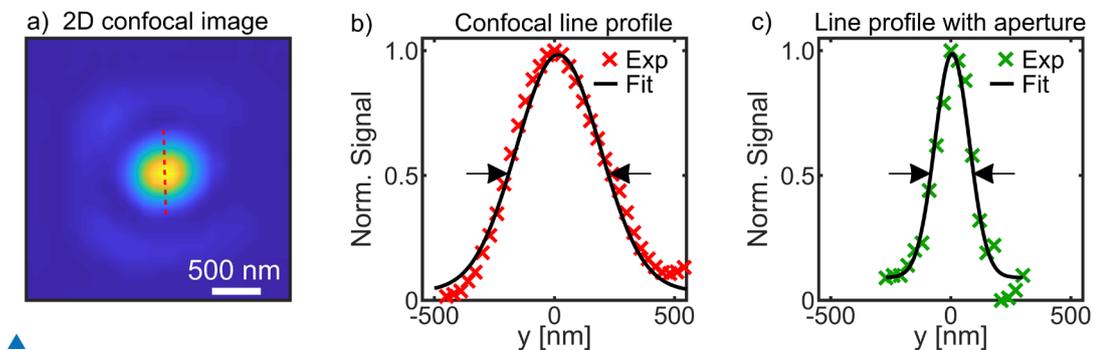
Optical Nanoscopy

Im Rahmen eines von der DFG geförderten Verbundprojekts arbeiten wir zusammen mit unseren Partnern von der TU Clausthal und dem MPI-NAT an der experimentellen Umsetzung dieses Ansatzes für die Reflexionsmikroskopie. Das verwendete Messprinzip funktioniert wie folgt: Zunächst wird die zu untersuchende Oberfläche mit einer dünnen photochromen Schicht beschichtet, die bei Bestrahlung mit Licht reversibel ihre Absorptionseigenschaften ändern kann. Anschließend werden reversible Nahfeldblenden in diese Schicht eingeschrieben, wodurch der reflektierende Bereich der Oberfläche räumlich begrenzt wird. Auf diese Weise konnten wir bereits eine 2,4-fache Auflösungsverbesserung im Vergleich zum Beugungslimit demonstrieren und erbrachten unseres Wissens damit erstmals den experimentellen Nachweis, dass die Auflösungsgrenze in der optischen Reflexionsmikroskopie unter Verwendung des Prinzips der Absorptionsmodulation umgangen werden kann.

In unserem interdisziplinären Verbund, der Expertisen aus den Bereichen Organische und Physikalische Chemie, Materialtechnologie, Optik und Mikroskopie vereint, forschen wir derzeit an der weiteren Verbesserung der Auflösung. Unser Ziel ist, die Methode zu einem leistungsstarken Werkzeug zur nanoskaligen Untersuchung von Oberflächen opaker Materialien weiterzuentwickeln.

Within the framework of a DFG-funded joint project, we are working on the experimental realization of this approach for reflection microscopy in cooperation with our partners from TU Clausthal and the MPI-NAT. The utilized measurement principle works as follows: First, the surface under investigation is coated with a thin photochromic layer, capable of undergoing reversible changes in its absorption properties upon exposure to light. Then, reversible near-field apertures are inscribed in this layer, effectively confining the reflective region of the surface. In this manner, we have already demonstrated a remarkable 2.4-fold enhancement in resolution beyond the diffraction limit. To our knowledge, this marks the first experimental evidence that the resolution limit in optical reflection microscopy can be circumvented using the principle of absorption modulation.

Within our interdisciplinary alliance, integrating expertise from organic and physical chemistry, materials technology, optics, and microscopy, we are currently researching the further improvement of the achievable resolution. Our goal is to advance the method into a powerful tool for studying surfaces of opaque materials at the nanoscale.



Reflexionsnanoskopie. a) Beugungsbegrenztes 2D-Bild einer einzelnen Goldnanokugel. b) Das Linienprofil entlang der gepunkteten Linie in a) weist eine Breite von 412 nm auf. c) Unter Verwendung einer Nahfeldblende reduziert sich die Breite des gemessenen Linienprofils auf 170 nm, was einer 2,4-fachen Auflösungsverbesserung entspricht.

Reflection nanoscopy. a) Diffraction-limited 2D image of a single gold nanosphere. b) The line profile along the dotted line in a) has a width of 412 nm. c) By means of a near-field aperture the width of the measured line profile is reduced to 170 nm, corresponding to a 2.4-fold improvement in resolution.

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

Dr. Lukas Janos Richter

Jan-Hendrik Klein-Wiele

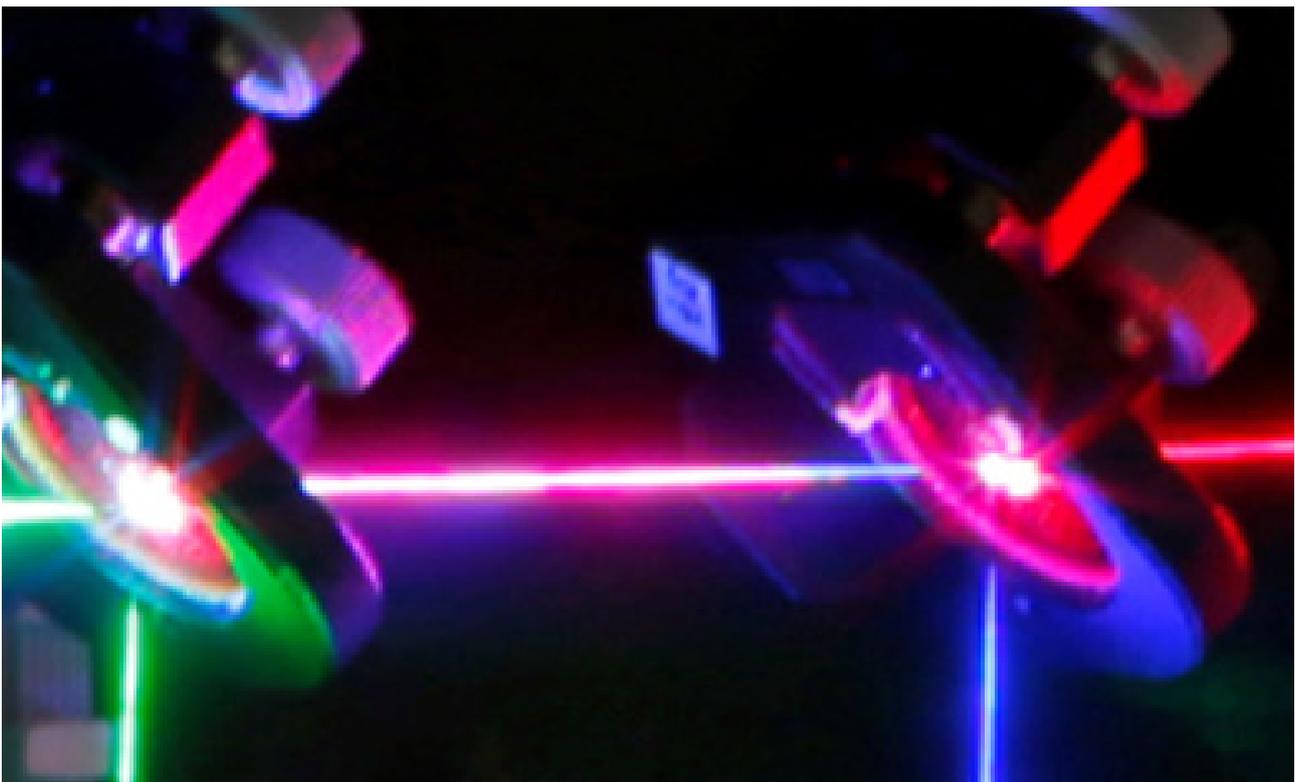
Nastaran Bakhtiari

Jay Jadvani

Frederick Kleinwort

Andreas Röben

Hendrik Wrigge



Kurze Pulse / Nanostrukturen

Short Pulses / Nanostructures

Materialmodifikation durch Laserbestrahlung ermöglicht die Erzeugung besonderer Strukturen an Werkstoffoberflächen und im Inneren transparenter Materialien und eröffnet somit die Möglichkeit, vielfältige neue Funktionalitäten zu generieren. Dadurch eignet sich dieses berührungslose Verfahren für zahlreiche optische und medizintechnische Anwendungen sowie für den Einsatz in Mikrofluidik und Tribologie.

Durch den Einsatz von kurzen und insbesondere ultrakurzen Laserpulsen lässt sich dabei die Strukturauflösung verbessern und eine unerwünschte Wärmebeeinflussung der bestrahlten Werkstücke verhindern.

Spezielle, den Anwendungen angepasste Bestrahlungsstrategien, bei denen Maskenprojektion, scannende Verfahren oder interferenzbasierte Strahlmanipulation kombiniert werden können, bieten die Möglichkeit, Sub- μm -Präzision routinemäßig zu erreichen. Für die Qualitäts- und Effizienzsteigerung in bestehenden und für die Erschließung neuer Anwendungen ist die ständige Weiterentwicklung der laserbasierten Techniken unabdingbar. Dabei stehen der Einsatz leistungsstarker kurzer und ultrakurzer Pulse für die Herstellung von periodischen Nanostrukturen auf technischen Oberflächen im Mittelpunkt.

Aktuelle Themen sind die zeitaufgelöste Messung der Reflektivität von Metallen und Halbleitern, die diffraktive Laserbeschriftung von 3D-Freifformflächen mit ultrakurzen Pulsen und die Entwicklung von Methoden zur Erzeugung hochaufgelöster individualisierbarer computergenerierter Hologramme. Weitere Arbeiten befassen sich mit der Erzeugung und Anordnung von plasmonischen Nanopartikeln und Silizium-Nanokristallen. Darüber hinaus werden die laserbasierte Herstellung optischer Komponenten und die Formgebung und Formkorrektur von Glassubstraten für optische Anwendungen untersucht.

Material modification by laser irradiation enables the creation of special structures on material surfaces and inside transparent materials, thus opening up the possibility of generating a wide range of new functionalities. This noncontact process is therefore suitable for numerous optical and medical technology applications as well as for use in microfluidics and tribology.

The use of short and, in particular, ultrashort laser pulses makes it possible to improve the structure resolution and prevent undesirable heat effects in the surroundings of the irradiated area.

Special irradiation strategies adapted to the specific applications, in which mask projection, scanning processes, or interference-based beam manipulation can be combined, offer the possibility of routinely achieving sub- μm precision. An ongoing further development of laser-based techniques is essential for increasing quality and efficiency in existing applications and for opening up new ones. Our focus is placed on the utilization of powerful short and ultrashort pulses for the fabrication of periodic nanostructures on technical surfaces.

Current topics include time-resolved reflectivity measurement on metals and semiconductors, diffractive laser marking of 3D free-form surfaces with ultrashort pulses, and the development of laser processing techniques for the fabrication of computer-generated holograms. Further work is concerned with the generation and arrangement of plasmonic nanoparticles and silicon nanocrystals. In addition, the laser-based production of optical components 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

Das Vorhaben, beliebige reflektierende Probenmaterialien zeitaufgelöst und spektral breitbandig auf die Änderung ihrer Eigenschaften während einer Anregung mit einem Femtosekundenpuls zu untersuchen, stellt hohe Anforderungen an das benötigte Messsystem. Das zu diesem Zweck in unserer Abteilung entwickelte Pump-Probe-System ist in der Lage, Materialoberflächen mit einem 80 fs langen Puls bei 780 nm und variabel einstellbarer Anregungsstärke (aktuell max. 1000 mJ/cm²) zu bestrahlen. Die Reaktion des Materials auf diese Anregung kann dann mit einem zweiten, sehr viel kürzeren (< 10 fs) Probe-Puls untersucht werden. Dieser verläuft coaxial zum Anregungspuls und trifft mit variabler Verzögerung auf die Probe. Die zeitaufgelöste Reflektivitätsänderung kann dann mit einem Spektrometernaufbau vermessen werden. Eine Besonderheit des Aufbaus ist dabei die hohe spektrale Bandbreite und damit gleichzeitig ermöglichte hohe Komprimierbarkeit des Probe-Pulses. So kann eine Pulslänge von 7 fs erreicht werden, wobei ein Großteil des sichtbaren Spektrums der Reflektivitätsmessung zur Verfügung steht (Abb. 1).

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

The spectrally broadband investigation of time resolved reflectivity changes of materials is a challenging task and poses high demands on the required measuring system. The pump-probe system developed in our department for this purpose is capable of irradiating material surfaces with 80 fs pulses at 780 nm with variable excitation fluence (currently max. 1000 mJ/cm²). The reaction of the material to this excitation can then be examined with a second, much shorter (< 10 fs) probe pulse. This is adjusted coaxially to the excitation pulse and hits the sample with a variable delay. The time-resolved change in reflectivity can then be measured using a spectrometer setup. A special feature of the setup is the large spectral bandwidth and thus the high compressibility of the probe pulse. A pulse length of 7 fs can be achieved, making a large part of the visible spectrum available for the reflectivity measurement (Fig. 1). These pulse parameters are achieved by a two-stage post-compression of the initial 80 fs long pulses (Ti:Sa-CPA system). This setup uses two stretched hollow fibers developed and manufactured in our department. After broadening, the pulses are compressed by a dispersive mirror compressor.

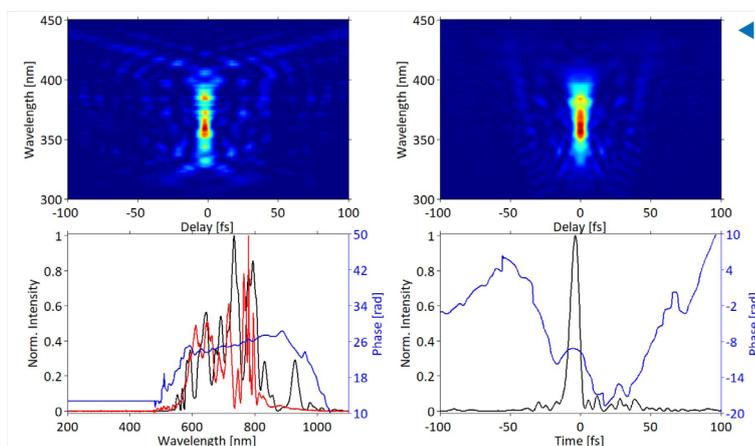


Abb. 1: FROG-Auswertungsergebnisse. Oben links ist das gemessene FROG-Trace dargestellt. Oben rechts ist der vom Auswertungsalgorithmus rückgerechnete Datensatz gezeigt, aus dem sich die spektralen und zeitlichen Intensitätsverteilungen (schwarz) inklusive Phaseninformationen (blau) ableiten lassen (untere Reihe). Links: Spektrum des Pulses. Rechts: Zeitlicher Verlauf des komprimierten Pulses. Die rote Kurve unten links zeigt das gemessene Spektrum. Fig. 1: FROG evaluation results. Top row: Measured (left) and retrieved (right) FROG traces. The retrieval algorithm delivers the spectral and temporal intensity (black) distribution including phase information (blue), shown in the bottom row. Left: Spectrum of the pulse. Right: Temporal evolution of the compressed pulse. The red curve at the bottom left shows the measured spectrum.

Kurze Pulse / Nanostrukturen

Short Pulses / Nanostructures

Erreicht werden diese Pulsparameter durch eine zweistufige Nachkomprimierung des initialen 80 fs langen Pulses (Ti:Sa-CPA System). Diese nutzt zur Verbreiterung zwei in der Abteilung entwickelte und gefertigte gestreckte Hohlfasern. Die Pulse werden nach der Verbreiterung durch Spiegelkompressoren komprimiert.

Die Bestimmung des absoluten Zeitnullpunktes der Messung, also des Zeitpunkts, an dem Pump- und Probe-Puls gleichzeitig die Probe erreichen, ist eine zentrale Aufgabe zur vollständigen Einordnung der Messergebnisse in den physikalischen Kontext. Da dieser Zeitpunkt nicht unmittelbar aus der Pump-Probe-Messung hervorgeht, wurde zu diesem Zweck der in Abbildung 2 gezeigte Aufbau realisiert. Dabei wird ein parametrischer Prozess, die sogenannte „sum-frequency generation“ (SFG), ausgenutzt, welcher auftritt, wenn zwei hochenergetische Lichtpulse (hier Pump- und Probe-Puls) in einem nichtlinearen Kristall (z.B. BBO) räumlich und zeitlich überlagert werden. Die Wechselwirkung der beiden Pulse mit dem Kristall führen zu der Erzeugung neuer Spektralkomponenten. Durch einen Scan der zeitlichen Verzögerung lässt sich so mit hoher Genauigkeit die zeitliche Überlappung bestimmen (Abb. 3).

Determining the absolute time zero of the measurement, i.e. the time at which the pump and probe pulses reach the sample simultaneously, is a central task for qualifying the measurement setup and putting the measurement results in a physical context. As this point in time cannot be directly deduced from the time-resolved reflectivity measurement, the setup shown in Figure 2 was implemented for this purpose. This utilizes a parametric process (sum-frequency generation, SFG), which occurs when two high-energy light pulses (pump and probe pulses in this case) are superimposed in space and time in a nonlinear crystal (e.g. BBO). The interaction of the two pulses with the crystal leads to the generation of new spectral components. By scanning the time delay, the temporal overlap can be determined with high accuracy (Fig. 3).

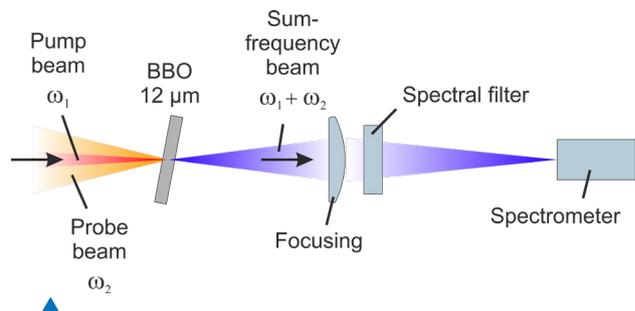


Abb. 2: Schematische Darstellung der Messung des absoluten Zeitnullpunktes des Pump-Probe-Aufbaus. Die kollinear laufenden Strahlen werden in ein BBO-Kristall fokussiert. Das Signal, das bei der zeitlichen Überlappung durch Frequenzmischung entsteht, wird von einem Spektrometer detektiert.

Fig. 2: Schematic layout of the measurement scheme for determining the absolute time zero of the pump-probe setup. The collinear beams are focused into a BBO crystal. The frequency mixing signal generated during temporal overlap of the pulses is detected by a spectrometer.

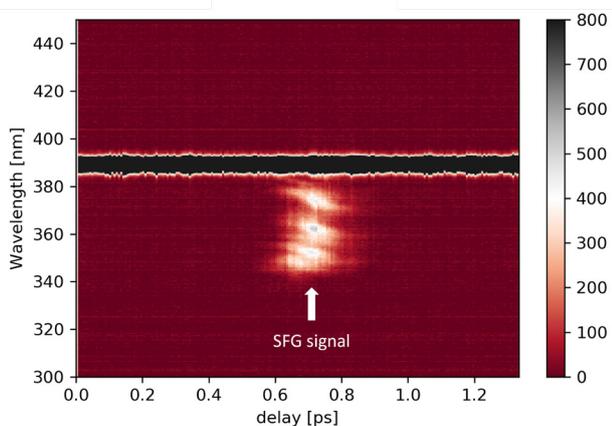


Abb. 3: 2D-Darstellung der durch die in Abb. 2 skizzierte Anordnung aufgenommenen Spektren unter Variation der Pump-Probe-Verzögerung. Das Maximum des Signals durch Frequenzmischung markiert den absoluten Zeitnullpunkt des Pump-Probe-Aufbaus. (Der schwarze Streifen repräsentiert das frequenzverdoppelte Signal des Pumppulses, wodurch das Spektrometer übersteuert wird.)

Fig. 3: 2D representation of the spectra recorded by the arrangement shown in Fig. 2 with variation of the pump-probe delay. The maximum of the frequency mixing signal marks the absolute time zero of the pump-probe setup. (The black stripe represents the frequency-doubled signal of the pump pulse, which saturates the spectrometer).

Kurze Pulse / Nanostrukturen

Short Pulses / Nanostructures

Erzeugung lichtbeugender Strukturen auf gekrümmten Flächen mit ultrakurzen Pulsen

Diffraktiv wirkende Merkmale auf Oberflächen verschiedenster Produkte finden eine breite Anwendung und haben sich zum Fälschungsschutz in vielen Bereichen fest etabliert. Auf diesem Gebiet ist unser Institut seit vielen Jahren tätig und hat diverse lasergestützte Verfahren zur Herstellung solcher Merkmale basierend auf einem sog. Gitterinterferometer entwickelt. Im Rahmen eines kürzlich abgeschlossenen Projektes („TITULUS“) sollte nun eine Lösung zur hochdynamischen Z-Verschiebung der Bearbeitungsebene (Interferenzebene) bei der diffraktiven Beschriftung gekrümmter Flächen entwickelt und validiert werden, insbesondere unter Verwendung von ultrakurzen Pulsen (< 100 fs). Hierfür wurde die in Abbildung 1 skizzierte Versuchsanordnung aufgebaut.

Zur Z-Verschiebung der Interferenzebene wird das zweite Element des Gitterinterferometers durch eine motorisierte Einheit axial bewegt. Der Bearbeitungsstrahl wird durch eine einfache Linse auf das Werkstück fokussiert, wobei die axiale Fokusposition durch einen „Focus Shifter“ (VarioScan) nachgeführt wird.

Abb. 1: Schematische Darstellung des experimentellen Aufbaus.

Fig. 1: Schematic representation of the experimental setup.

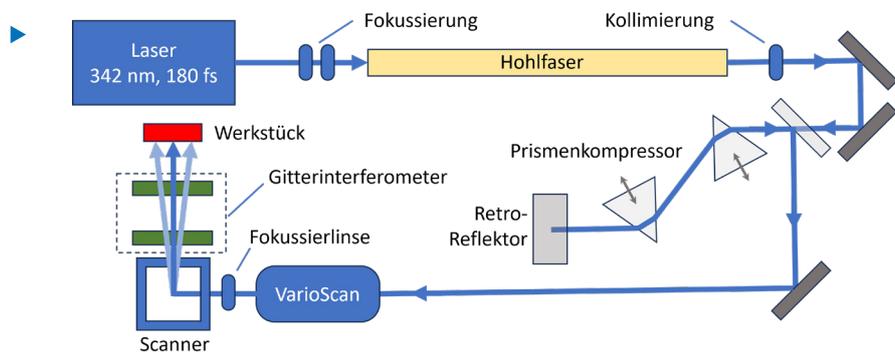


Abb. 2: Gezeigt werden zwei SD-FROG-Auswertungsergebnisse. In der jeweils oberen linken Ecke ist das gemessene FROG-Trace dargestellt. Jeweils oben rechts der vom Auswertungsalgorithmus rückgerechnete Datensatz, aus dem sich die spektrale und zeitliche Intensitätsverteilung inklusive Phaseninformationen ableiten lässt (untere Reihe). Links: Initialer Puls direkt aus dem Laser, Pulslänge ~ 180 fs. Rechts: Aufnahme des spektral verbreiterten und komprimierten Pulses, Pulslänge: 38,6 fs.

Fig. 2: SD-FROG evaluation results. Top row: Measured and retrieved FROG traces. Bottom row: Retrieved spectral and temporal intensity distribution including phase information. Left: Initial pulse directly from the laser, pulse length ~ 180 fs. Right: Spectrally broadened and compressed pulse, pulse length: 38.6 fs.

Kurze Pulse / Nanostrukturen

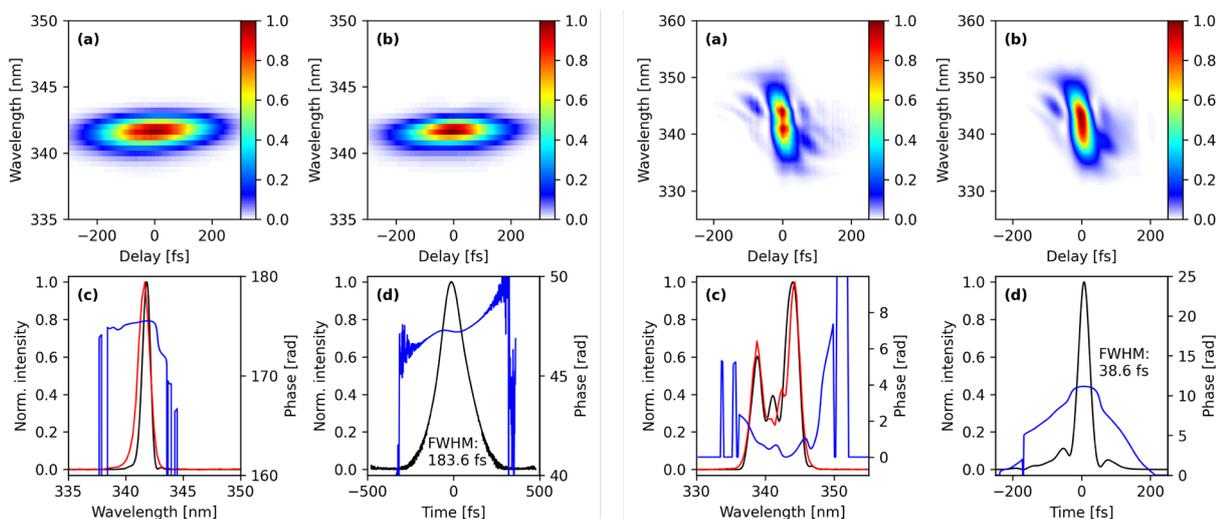
Short Pulses / Nanostructures

Zur Bereitstellung der ultrakurzen Pulse kommt eine gasgefüllte, gestreckte Hohlfiber mit nachgeschaltetem Pulskompressor zum Einsatz. Zur Vermessung der Pulslängen im Experiment wurde die SD-FROG (Self-diffraction-frequency-resolved-optical-gating) Methode verwendet. Die so ermittelte Ausgangspulslänge des Lasersystems vor der spektralen Verbreiterung durch die Hohlfiber beträgt 180 fs. Der Erfolg der spektralen Verbreiterung und anschließenden Kompression durch einen Prismenkompressor ließ sich in einer weiteren FROG-Messung nachweisen. Die Pulslänge nach dem Kompressor betrug 38,6 fs (Abb. 2).

Bestrahlungstests an transparenten Materialien, wie z.B. PMMA, wurden mit zwei unterschiedlichen Pulsdauern durchgeführt. Dabei wurden periodische Strukturen hergestellt und die Ergebnisse, erzielt mit den ursprünglichen 180-fs-Pulsen des Lasers und den komprimierten Pulsen (< 50 fs), miteinander verglichen. Es wurde festgestellt, dass die Komprimierung der Pulse auf eine Dauer von < 50 fs das Prozessfenster für die Bearbeitung deutlich vergrößert. Dies ermöglicht die Erzeugung von kontrastreichen periodischen Oberflächenstrukturen auf transparenten Materialien.

The ultrashort pulses are generated in a gas-filled, stretched hollow fiber followed by a pulse compressor. For the pulse width measurement, the SD-FROG (self-diffraction - frequency resolved optical gating) method was used. The length of the pulses out of the laser system before spectral broadening was found to be 180 fs. The success of the spectral broadening and the subsequent pulse compression by a prism pair was demonstrated in a further FROG measurement. The pulse length after the compressor was 38.6 fs (Fig. 2).

Irradiation tests on transparent materials, such as PMMA, were carried out with two different pulse durations. Periodic structures were produced and the results achieved with the 180 fs long pulses directly from the laser and the compressed pulses (< 50 fs) were compared. It was found that compressing the pulses down to a duration of < 50 fs significantly increases the process window for the surface fabrication. This enables the creation of high-contrast periodic surface structures on transparent materials.

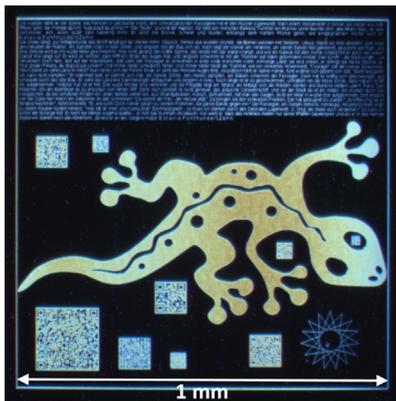


Kurze Pulse / Nanostrukturen

Short Pulses / Nanostructures

Erzeugung hochaufgelöster diffraktiver Nano-schriften, Bilder und Codes auf Metallen durch direkte Kurzpuls-Laser-Ablation

Die individuelle, fälschungssichere Kennzeichnung hochwertiger (z.B. Edelmetallbarren, Schmuck, Wertgegenstände), sicherheitsrelevanter (z.B. spezielle, hochbelastete Originalteile im Anlagenbau sowie in Luft- und Raumfahrt) und gesundheitsrelevanter (Medikamente, Spezialinstrumente) Gegenstände gewinnt in der heutigen Wirtschaftswelt zunehmend an Bedeutung. Dabei wird zwischen dynamischen und statischen Markierungen unterschieden. Erstere verweisen lediglich auf eine Datenbank, in der die Informationen über das Bauteil gespeichert sind und die sich jederzeit anpassen lassen. Sie kommen daher mit einer sehr kleinen Datenmenge aus. Allerdings kann nicht gewährleistet werden, dass die Information, tatsächlich korrekt abgelegt wurde oder nach einiger Zeit verloren geht. Dem gegenüber beinhalten statische Markierungen alle relevanten Informationen die dann permanent dem Bauteil zugeordnet sind. In vielen Fällen, vor allem vor dem Hintergrund zunehmender Fälschungsproblematik, ist es wünschenswert bzw. erforderlich, die bauteilspezifischen Daten in Form eines direkt in die Oberfläche geschriebenen, statischen Codes direkt in das Bauteil zu integrieren. Da statische Codes alle relevanten Informationen beinhalten müssen, kann die dazu notwendige Datenmenge erheblich sein, so dass entsprechend viel Platz auf der Werkstückoberfläche vorhanden sein muss.



Generation of high-resolution diffractive nano-texts, images, and codes on metals by direct short-pulse laser ablation

The individual, forgery-proof labelling of high-quality (e.g. precious metal bars, jewellery, valuables), safety-relevant (e.g. special, highly loaded original parts in plant engineering and in aerospace) and health-relevant (medications, special instruments) items is becoming increasingly important in the economic world of today. A distinction is made between dynamic and static markings. The former simply refer to a database in which the information about the component is stored and which can be adjusted at any time. The amount of data required for this is relatively small. However, there is no guarantee that the information is stored correctly or that it won't be lost after some time. In contrast, static markings contain all relevant information which is then permanently assigned to the component. In many cases, especially given the increasing problem of counterfeiting, it is desirable or necessary to integrate the component-specific data directly into the component in the form of a static code written directly into the surface of the part. Since static codes must contain all relevant information, the amount of data required can be considerable. The required amount of space on the surface of the part can therefore be significant. Current laser marking systems reach their limits here, especially in the case of very small components, having only a small suitable marking area, or if the marking should not be visible to the naked eye.

◀ Abbildung 1: Lichtmikroskop-Aufnahme lasergeschriebener Muster auf Edelstahl am Beispiel von Nanoschriften, QR-Codes und dem Logo des UKPL-Netzwerkes (Gecko). Die beschriftete quadratische Fläche hat eine Kantenlänge von 1 mm.

Figure 1: Light microscope image of laser-written patterns on stainless steel, showing examples of nano-text, QR codes, and the logo of the UKPL network (gecko). The laser-written square area has a size of 1 mm.

Abbildung 2: Vergrößerter Ausschnitt von Abb. 1 zur besseren Sichtbarkeit des geschriebenen Nanotexts. ▶

Figure 2: Enlarged section of Fig. 1 for better visibility of the written nano-text.

Kurze Pulse / Nanostrukturen

Short Pulses / Nanostructures

Vor allem im Falle sehr kleiner Bauteile, die nur eine kleine geeignete Markierungsfläche aufweisen, oder falls die Markierung mit bloßem Auge nicht erkennbar sein soll, stoßen aktuelle Lasermarkieranlagen hier an ihre Grenzen. So ist es zurzeit nicht möglich, QR-Codes mit einem Informationsinhalt von mindestens 200 Zeichen und hoher Redundanz auf einer Fläche von wenigen mm² zu erzeugen.

Am IFNANO wurde jetzt eine Schreibtechnologie entwickelt, mit der ein entsprechender QR-Code mit einer Kantenlänge von weniger als 100 µm geschrieben werden kann. Ebenfalls können hoch aufgelöste Logos und Klarschriften realisiert werden. Das Besondere dieser Markierungen ist, dass die geschriebenen Muster zusätzlich eine diffraktive Substruktur beinhalten. Dadurch kann, unter entsprechenden Beleuchtungsbedingungen, ein extrem hoher Auslesekontrast erreicht werden, während das Muster ansonsten nahezu unsichtbar ist. Gleichzeitig wird die Fälschungssicherheit durch die speziellen diffraktiven Strukturen erheblich erhöht.

Entsprechende Beispiele sind in den folgenden Lichtmikroskop-Aufnahmen dargestellt. Abbildung 1 zeigt eine Schreibfläche von 1 mm², auf der ein Nanotext (die komplette Ballade „Die Vergeltung“ von Annette von Droste-Hülshoff), das Logo des UKPL-Netzwerkes (Gecko) sowie diverse QR-Codes auf Edelstahl geschrieben wurden. Abbildung 2 zeigt eine Aufnahme mit höherer Vergrößerung, so dass der Text klar erkennbar ist. Abbildung 3 zeigt die Detailaufnahme einer Nanoschrift mit 10 µm Buchstabenhöhe und 1,5 µm Linienstärke.



It is currently not possible to create QR codes with an information content of at least 200 characters and a high level of redundancy on an area of a few mm².

At IFNANO, a new writing technology has recently been developed with which a corresponding QR code with an edge length of less than 100 µm can be written. High-resolution logos and plain text can also be created. The speciality of these markings is that the written patterns also contain a diffractive substructure. This means that, under appropriate lighting conditions, an extremely high readout contrast can be achieved, while the pattern is otherwise almost invisible. At the same time, the security against counterfeiting is significantly increased thanks to the special diffractive structures.

Corresponding examples are shown in the following light microscope images. Figure 1 shows a processed surface of 1 mm² on which a nanotext (the complete ballad "The Retaliation" by Annette von Droste-Hülshoff), the logo of the UKPL network (Gecko), and various QR codes were written on stainless steel. Figure 2 shows an image at higher magnification so that the text can be clearly seen. Figure 3 shows a detailed image of a nano-text with a letter height of 10 µm and a line thickness of 1.5 µm.

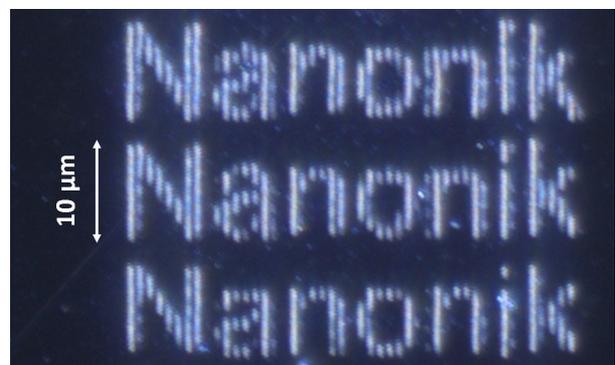


Abbildung 3: Lichtmikroskopische Aufnahme von lasergeschriebenen Nanobuchstaben auf Edelstahl mit einer Buchstabenhöhe von 10 µm und einer Linienbreite von etwa 1,5 µm.
Figure 3: Light microscope image of laser-written nanoletters on stainless steel having a letter height of 10 µm and a line width of about 1.5 µm.

Kurze Pulse / Nanostrukturen

Short Pulses / Nanostructures

Höhenkontrolle laserinduzierter periodischer Oberflächenstrukturen (LIPSS)

Die Bestrahlung eines Materials mit einem Laserstrahl kann zur Bildung periodischer Strukturen auf der Probenoberfläche führen, deren Perioden in der Größenordnung der Laserwellenlänge liegen. Diese Strukturen sind als laserinduzierte periodische Oberflächenstrukturen (LIPSS) bekannt. LIPSS können zur Funktionalisierung von Oberflächen in vielen Bereichen eingesetzt werden, darunter industrielle, medizinische, biologische und optische Anwendungen. Eine etablierte Theorie zur Erklärung der Bildung von LIPSS auf Metalloberflächen basiert auf dem Beitrag von Oberflächenplasmon-Polaritonen (SPP), d. h. elektromagnetischen Wellen, die vom Laserstrahl an Oberflächendefekten angeregt werden und sich entlang der Grenzfläche zwischen Dielektrikum und Metall ausbreiten. Die SPP interferieren mit dem einfallenden Laserpuls und führen zu einer periodisch modulierten Energiedeposition auf der Probe.

Height control of laser-induced periodic surface structures (LIPSS)

Irradiating a material with a laser beam may lead to the formation of periodic structures on the sample surface with periods in the order of the laser wavelength. These structures are well-known as laser induced periodic surface structures (LIPSS). LIPSS can be used for the functionalization of surfaces in many fields, including industrial, medical, biological, and optical applications.

One established theory to explain the formation of LIPSS on metal surfaces is based on the contribution of surface plasmon polaritons (SPP), i.e. electromagnetic waves excited by the laser beam at surface defects and propagating along the dielectric/metal interface. The SPP will interfere with the incoming laser pulse and result in a periodically modulated energy deposition onto the sample.

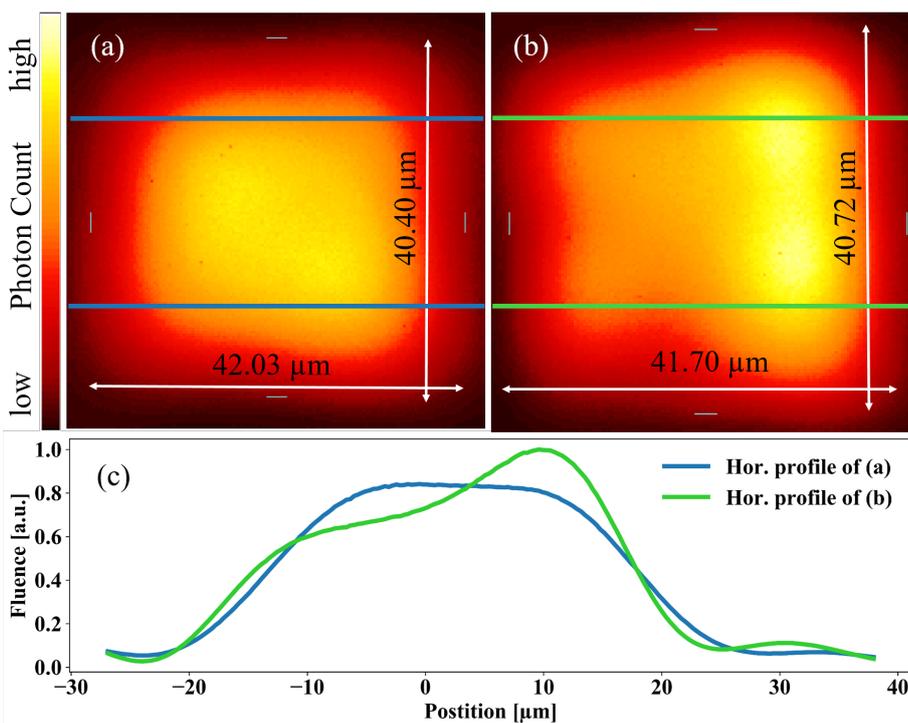


Abb. 1: Für Bestrahlungen verwendete Strahlprofile. (a) Ein homogenes Strahlprofil und (b) ein Profil mit einer Fluenzsteigung. (c) zeigt die Fluenzverteilung entlang einer horizontalen Linie für beide Strahlprofile.

Fig. 1: Beam profiles used for irradiations. (a) A homogeneous beam profile and (b) a profile with a fluence slope. (c) shows the fluence distribution along a horizontal line for both beam profiles.

Kurze Pulse / Nanostrukturen

Short Pulses / Nanostructures

Die Möglichkeit, die Eigenschaften von LIPSS zu steuern, kann für viele Anwendungen von Vorteil sein. Wir haben die durch Oberflächenplasmon-Polaritonen unterstützte Erzeugung von LIPSS in der Nähe einer vorgefertigten Goldstufenkante mit Hilfe von Einzelpuls-Femtosekundenlaserbestrahlung untersucht. Die nach Bestrahlung mit einem homogenen (flat top) Strahlprofil entstehenden LIPSS nehmen mit zunehmendem Abstand von der Stufenkante an Höhe ab. Dieser Höhenabfall wird auch von der Plasmentheorie vorhergesagt. Er kann reduziert oder ganz vermieden werden, indem die Fluenz mit zunehmendem Abstand von der Stufenkante erhöht wird. Abb. 1 zeigt das Strahlprofil mit (a) homogener und (b) räumlich zunehmender Fluenzverteilung. Die Höhenamplitude der entsprechenden LIPSS nimmt ab (Abb. 2 (oben)) bzw. ist nahezu konstant (Abb. 2 (unten)). Somit konnten wir zeigen, dass die Höhen von LIPSS durch Anpassen der Intensitätsverteilung im Laserstrahlprofil manipuliert werden können.

The ability to control the properties of LIPSS is highly demanded for advanced technologies. We have studied the surface plasmon polariton assisted creation of LIPSS in the vicinity of a pre-designed gold step edge applying single-pulse femtosecond laser irradiation. The LIPSS emerging after irradiation with a homogeneous (flat top) beam profile decrease in height with increasing distance from the step edge. This decay in height is also predicted by the plasmonic theory. It can be reduced or completely prevented by increasing the fluence with increasing distance from the step edge. Fig. 1 shows the beam profile with (a) the flat top and (b) the spatially increasing fluence distribution. The height amplitude of the corresponding LIPSS is decreasing (Fig. 2 (top)) or nearly constant (Fig. 2 (bottom)), respectively. Thus, we have shown that the height of LIPSS can be manipulated by adjusting the intensity profile of the laser beam.

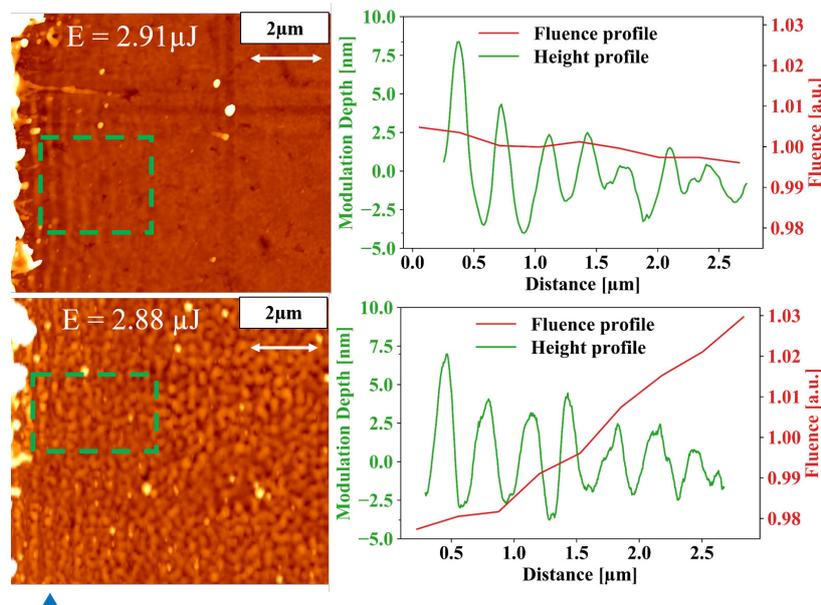


Abb. 2: Links: AFM-Bilder von LIPSS, die sich an einer bereits vorhandenen Stufenkante einer Goldprobe bilden, nach einer einzelnen 200-fs-Pulsbestrahlung bei 343 nm und konstanter Fluenz (oben) und räumlich zunehmender Fluenz (unten) (Strahlprofile dargestellt in Abb. 1 (a) bzw. (b)). In beiden Fällen beträgt die mittlere Fluenz etwa 170 mJ/cm². Der Pfeil gibt die Richtung der Polarisation des Strahls an, das grüne Kästchen die Position, an der die Höhen gemessen wurden. Rechts werden die entsprechenden AFM-Höhenmessungen (grüne Kurve) angezeigt.

Fig. 2: Left: AFM images of LIPSS forming on a preexisting step edge on a gold sample after single 200 fs pulse irradiation at 343 nm and constant fluence of (top) and spatially increasing fluence (bottom) (beam profiles shown in Fig. 1 (a) and (b), respectively). In both cases the mean fluence is about 170 mJ/cm². The arrow indicates the direction of the polarization of the beam, the green box the position at which the heights were measured. On the right the corresponding AFM height measurements (green curve) are displayed.

Kurze Pulse / Nanostrukturen

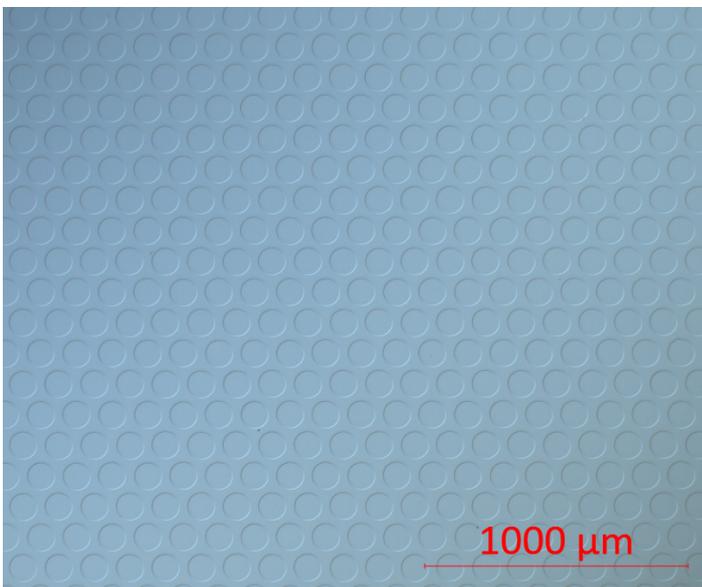
Short Pulses / Nanostructures

Phasenmasken für Laserinterferenz-Strukturierung

Laserinterferenz-Strukturierung ist eine effiziente Methode für die schnelle und kostengünstige Erzeugung regelmäßiger Mikrostrukturen auf großen Flächen. Zwei oder mehr Teilstrahlen eines gepulsten Lasers werden auf dem zu strukturierenden Werkstück zur Interferenz gebracht. Das entstehende Interferenzmuster überträgt sich per Ablation in die Oberfläche. Voraussetzung der Methode ist eine Aufspaltung des primären Laserstrahls in mehrere Teilstrahlen, Führung dieser Teilstrahlen auf verschiedenen Wegen im optischen Aufbau und Rekombination auf dem Werkstück unter Wahrung der optischen Weglängengleichheit. Das kann durch Strahlteiler und Spiegel erfolgen, was jedoch unflexibel und aufwändig ist. Viel effizienter ist eine Strahlteilung durch Phasenmasken. Hierbei wird der primäre Laserstrahl an einer periodischen Mikrostruktur in verschiedene Beugungsordnungen aufgespalten, welche die Rolle der Teilstrahlen übernehmen. Durch Abbildung der Phasenmaske auf das Werkstück werden die Beugungsordnungen zur Interferenz gebracht. Die Abbildung stellt dabei gleichzeitig die optische Weglängengleichheit aller Beugungsordnungen untereinander sicher.

Phase masks for laser interference patterning

Laser interference patterning is an efficient method for the rapid and cost-effective creation of regular microstructures on large areas. Two or more partial beams of a pulsed laser are caused to interfere on the workpiece to be structured. The resulting interference pattern is transferred to the surface via ablation. The prerequisite for the method is that the primary laser beam is split into several partial beams, these partial beams are guided along different paths in the optical structure and recombined on the workpiece while maintaining the same optical path length. This can be done using beam splitters and mirrors, but this is inflexible and complex. Beam splitting using phase masks is much more efficient. Here, the primary laser beam is split into different diffraction orders on a periodic microstructure, which take on the role of the partial beams. By imaging the phase mask onto the workpiece, the diffraction orders are caused to interfere. At the same time, the imaging ensures that the optical path lengths of all diffraction orders are equal to one another.



◀ Abb. 1: Phasenmaske mit hexagonalem Beugungsgitter.
Fig. 1: Phase mask with hexagonal diffraction grating.

Kurze Pulse / Nanostrukturen

Short Pulses / Nanostructures

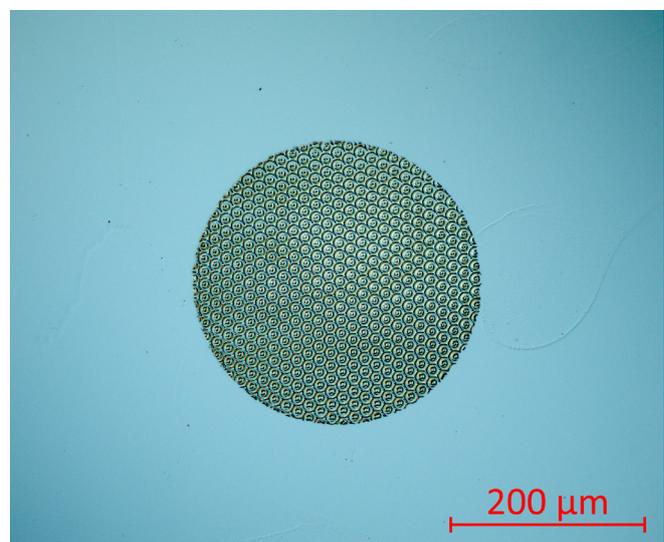
Ein Vorteil des Verfahrens liegt in der Ökonomie des optischen Aufbaus. Im einfachsten Fall werden nur zwei Komponenten benötigt, Phasenmaske und Abbildungsoptik – selbst, wenn eine größere Anzahl von Teilstrahlen für die Erzeugung des Interferenzmusters benötigt wird. Ein weiterer Vorteil liegt in der Einstellbarkeit des Teilungsverhältnisses bei der Aufspaltung des Primärstrahls. Während herkömmliche Strahlteiler in der Regel im Verhältnis 1 : 1 teilen, lässt sich durch entsprechendes Design der beugenden Mikrostruktur erreichen, dass die Teilstrahlen vorgegebene Intensitätsverhältnisse aufweisen. Eine Änderung der Beugungswinkel ist durch Anpassung der Periode der Mikrostruktur möglich. Verschiedene Strukturperioden auf dem Werkstück können durch einen einfachen Austausch der Phasenmaske realisiert werden, was automatisiert während der Bearbeitung erfolgen kann und keine Veränderungen an der Strahlführung erfordert.

Die Arbeitsgruppe stellt Phasenmasken aus Quarzglas her, sowohl für die eigene Forschung als auch für Industriekunden. Abbildung 1 zeigt eine Phasenmaske, deren beugende Mikrostruktur eine hexagonale Symmetrie aufweist. Mit dieser Phasenmaske lassen sich regelmäßige Topfstrukturen strukturieren, wie in Abbildung 2 gezeigt. Derzeit werden diese Topfstrukturen zur Verbesserung der tribologischen Eigenschaften von Oberflächen untersucht, die Reibkorrosion unterliegen.

One advantage of the process lies in the economy of the optical setup. In the simplest case, only two components are required, a phase mask and imaging optics, even if a larger number of partial beams are required to generate the interference pattern. Another advantage lies in the adjustability of the division ratio when splitting the primary beam. While conventional beam splitters usually divide in a ratio of 1 : 1, appropriate design of the diffractive microstructure can ensure that the partial beams have predetermined intensity ratios. Changing the diffraction angles is possible by adjusting the period of the microstructure. Different structural periods on the workpiece can be realized by simply replacing the phase mask, which can be done automatically during processing and does not require any changes to the beam guidance.

The group produces phase masks made of quartz glass, both for its own research and for industrial customers. Figure 1 shows a phase mask whose diffraction microstructure has hexagonal symmetry. This phase mask can be used to structure regular pot structures, as shown in Figure 2. These pot structures are currently being investigated to improve the tribological properties of surfaces subject to fretting corrosion.

Abb. 2: Einzelspot-Ablation auf Kalknatronglas mit der Phasenmaske aus Abb. 1. ▶
 Fig. 2: Single spot ablation on soda lime glass with the phase mask from Fig. 1.



Kurze Pulse / Nanostrukturen

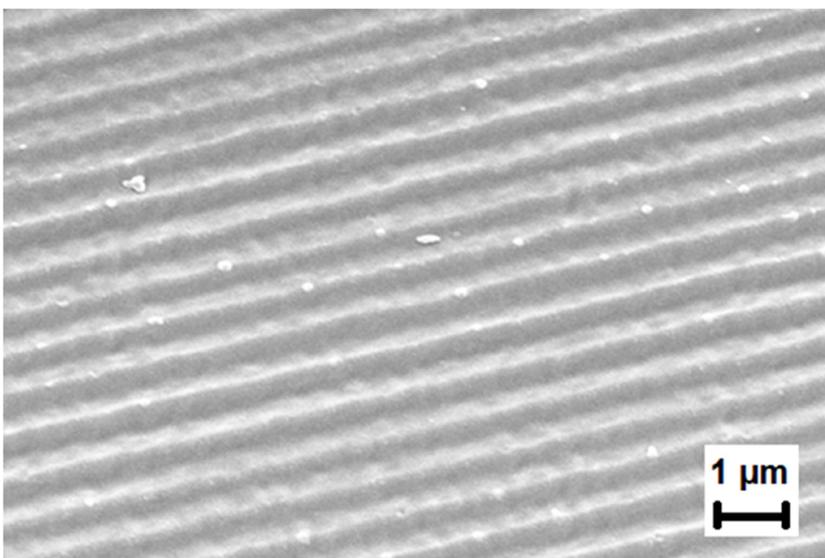
Short Pulses / Nanostructures

Verstärkung der Photolumineszenz von Silizium- Nanokristallen

Silizium ist das Grundmaterial für Mikrochips und ist im Allgemeinen daher für seine Verwendung in der Elektronik bekannt. Als aktiver Emittor in der Photonik findet Silizium allerdings kaum Verwendung. Die Ursache liegt in der Bandstruktur von Silizium, welches eine indirekte Bandlücke aufweist. Diese resultiert in einer sehr geringen Effizienz der Lichtemission. Die effektive Verwendung von Silizium für photonische Anwendungen würde allerdings eine Integration von Photonik in die Mikroelektronik erheblich vereinfachen und wird daher vielfach angestrebt. Einen möglichen Weg bietet die Verwendung von Siliziumstrukturen in der Größenordnung weniger Nanometer. Hierdurch ändern sich die optischen Eigenschaften dramatisch. Kleine Siliziumpartikel in dieser Größenordnung werden Silizium-Nanokristalle (Si-Nc) oder auch Silizium-Quantenpunkte genannt. Diese ermöglichen die Lichtemission aus purem Silizium, allerdings ist die Effizienz für praktische Anwendungen noch zu gering. Daher zielt die Forschung darauf ab, die Effizienz der Lichtemission zu steigern. Hier wird eine laserbasierte Methode zur Steigerung der Photolumineszenzemission vorgestellt.

Enhancement of the photoluminescence of silicon nanocrystals

Silicon is the base material for microchips and is therefore generally known for its use in electronics. However, silicon is not used as an active light emitter in photonics. The reason for this relates to the band structure of silicon, which has an indirect band gap. This results in a very low efficiency of light emission from silicon. However, the effective use of silicon for photonic applications would considerably simplify the integration of photonics into microelectronics and is therefore desirable. One possible way is to reduce the size of silicon structures to a few nanometers. This changes the optical properties dramatically. Small silicon particles of this size are called silicon nanocrystals (Si-Nc) or silicon quantum dots. These enable light emission from pure silicon, but the efficiency is still too low for practical applications. Research is therefore aimed at increasing the efficiency of light emission. A laser-based method for increasing photoluminescence emission is presented here.



◀ Abb.1 Oberflächengitter in SiO_x (Rasterelektronenmikroskop-Aufnahme).
Fig.1 Surface grating in SiO_x (Scanning electron microscope image).

Kurze Pulse / Nanostrukturen

Short Pulses / Nanostructures

Die Si-Nc befinden in einer dünnen Schicht aus Siliziumsuboxid (SiO_x). Die Oberfläche dieser Schicht wird durch eine Laserbearbeitung mit einem Linien-gitter versehen, wie es in Abbildung 1 zu sehen ist. Das Oberflächengitter hat eine Periode von circa 600 nm. Die Si-Nc befinden sich unterhalb dieses Gitters, wie es in der Querschnittsansicht in Abbildung 2 durch eine Transmissionselektronenmikroskopieaufnahme dargestellt ist. Es wird eine Verstärkung der Photolumineszenz der Si-Nc gemessen. Diese Verstärkung kommt zu einem kleinen Teil durch Materialmodifikationen, bedingt durch die Laserstrahlung, zu Stande. Der Großteil der erhöhten Lichtemission ist allerdings auf einen optischen Effekt des Gitters (verbesserte Auskopplung) zurückzuführen. Die Verstärkung hängt daher auch von den Parametern des Gitters, wie der Periode, ab. So kann eine mehr als dreifache Verstärkung der Photolumineszenz gemessen werden, wie in Abbildung 3 sichtbar ist.

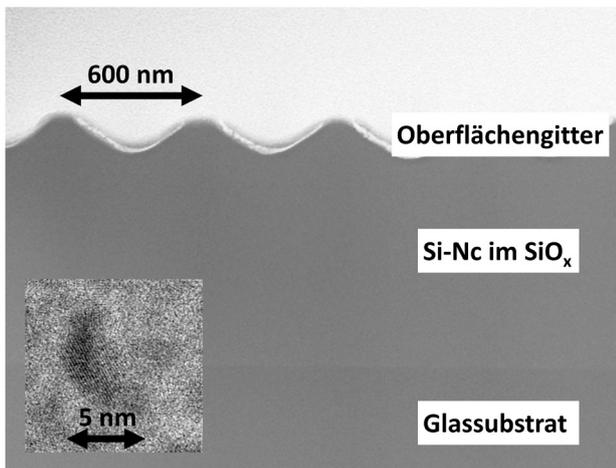


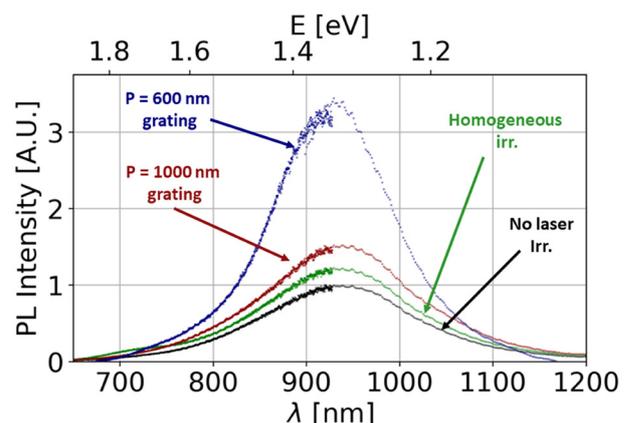
Abb.3 Wellenlängenaufgelöste (λ) Messung der Photolumineszenz (PL) der Si-Nc. Eine flächige Laserbestrahlung (grün) führt zu einer geringen Verstärkung der PL im Vergleich zum unbestrahlten Fall (schwarz). Die Erzeugung eines Gitters führt zu einer stärkeren PL-Erhöhung, abhängig von der Periode (blau und rot).

Fig.3 Wavelength-resolved (λ) measurement of the photoluminescence (PL) of the Si-Nc. Areal laser irradiation (green) leads to a small increase in PL compared to the nonirradiated case (black). The generation of a grating results in a stronger PL enhancement depending on the grating period (blue and red).

The Si-Nc are located in a thin layer of silicon suboxide (SiO_x). The surface of this layer is laser processed to produce a line grating, as shown in Figure 1. The surface lattice has a period of approximately 600 nm. The Si-Nc are located below this grating, as shown in the cross-sectional view in Figure 2 by a transmission electron micrograph. The inset image shows a single Si-Nc as an example. An amplification of the photoluminescence of the Si-Nc is measured. This enhancement is to a small extent due to material modifications caused by the laser radiation. However, the majority of the increased light emission is due to an optical effect of the lattice (improved light extraction). The gain therefore also depends on the parameters of the grating, such as the period. A more than three times amplification of the photoluminescence can be measured, as can be seen in Figure 3.

Abb.2 Querschnittsansicht der Probe mit Si-Nc in einer SiO_x -Schicht durch eine Transmissionselektronenmikroskopieaufnahme. Auf der Oberfläche ist das lasererzeugte Gitter mit einer Periode von circa 600 nm sichtbar. Im Einschubbild ist ein einzelner Si-Nc mit der Gitterstruktur von kristallinem Silizium erkennbar. Diese einzelnen Si-Nc sind in der gesamten SiO_x Schicht vorhanden.

Fig.2 Cross-sectional view of the sample with Si-Nc in a SiO_x layer by transmission electron microscopy. The laser-generated grating with a period of approximately 600 nm is visible on the surface. The inset image shows a single Si-Nc with the lattice structure of crystalline silicon. These individual Si-Nc are present throughout the SiO_x layer.



Kurze Pulse / Nanostrukturen

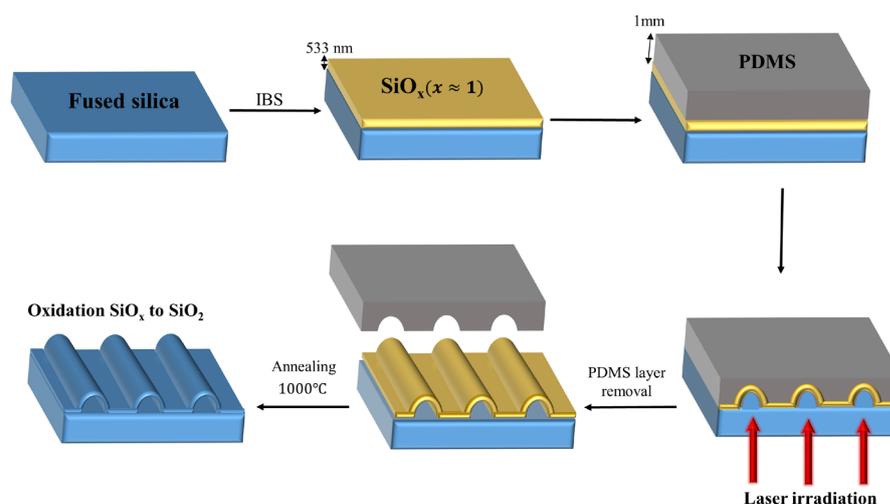
Short Pulses / Nanostructures

Nanokanäle für glasbasierte Mikro- und Nanofluidik

Für Mikro- und Nanofluidik werden preisgünstige Plattformen (Fluidik-Chips), oft auch für den Einmalgebrauch, benötigt. Billige Kunststoff-Chips haben allerdings oft nicht die benötigte optische Qualität; Prozessierung von Glas (Lithographie, Ätzprozesse, Bonding) ist dagegen aufwendig und teuer. Wir schlagen einen Herstellungsprozess vor, bei dem aus einem beschichteten Glasplättchen (z.B. Mikroskop-Objektträger oder Deckglas) durch eine Laserbelichtung ohne weitere Ätz- und Bondprozesse ein Optik-tauglicher Mikro- oder Nanofluidik-Chip entsteht. Durch gepulste UV-Laserbestrahlung mit räumlich definierten Intensitätsmustern ist es möglich, auf das Glas aufgebrachte Siliziumoxid-Schichten so umzuformen, dass blasen- oder kanalartige Strukturen zwischen Beschichtung und Substrat entstehen, die prozessbedingt einen geschlossenen Querschnitt haben, so dass die sonst zusätzlich erforderliche Deckelung entfällt. Durch maskenbasierte Laserbelichtung können komplexe Fluidiksysteme im Prinzip mit einem einzigen Laserpuls erzeugt werden.

Nanochannels for glass-based micro- and nanofluidics

Low-cost platforms (fluidic chips), often for single use, are required for micro- and nanofluidics. However, cheap plastic chips often do not have the required optical quality; processing glass (lithography, etching processes, bonding), on the other hand, is complex and expensive. We propose a manufacturing process in which a micro- or nanofluidic chip for optical applications is created from a coated glass plate (e.g. microscope slide or cover glass) through laser exposure without further etching and bonding processes. Using pulsed UV laser irradiation with spatially defined intensity patterns, it is possible to reshape silicon oxide coatings on the glass in such a way that bubble- or channel-like structures are created between the coating and the substrate, which have a closed cross-section due to the process, so that the additional capping that would otherwise be required is no longer necessary. Through mask-based laser exposure, complex fluidic systems can in principle be created with a single laser pulse.



▲
Abb. 1: Laserinduzierte Herstellung von Nanokanälen.
Fig. 1: Laser-induced fabrication of nano channels.

Kurze Pulse / Nanostrukturen

Short Pulses / Nanostructures

Der Herstellungsprozess derartiger Kanäle beruht auf einer Methode ähnlich dem bekannten laserinduzierten Vorwärtstransfer („LIFT“). Ein dünner, absorbierender Film (hier substöchiometrisches SiO_x) auf einem transparenten Substrat (hier Quarzglas) wird mit einem gepulsten UV-Laser durch das Substrat hindurch bestrahlt, so dass sich der Film im bestrahlten Bereich ablöst. Im Gegensatz zum LIFT wird jedoch durch geeignete Maßnahmen (z.B. Deckschicht aus Silikon) dafür gesorgt, dass das Filmsegment nicht vollständig vom Substrat entfernt wird, sondern an den Bestrahlungsrändern haften bleibt, so dass sich Hohlräume ausbilden, deren Form durch die Bestrahlungsparameter gestaltet werden kann. Anschließend kann das SiO_x zu SiO_2 oxidiert werden, so dass sich ein Kanalsystem aus reinem Quarzglas mit hervorragenden optischen Eigenschaften (hohe Transparenz, eigenfluoreszenzfrei) ergibt.

The manufacturing process of such channels is based on a method similar to the well-known laser-induced forward transfer (“LIFT”). A thin, absorbing film (here substoichiometric SiO_x) on a transparent substrate (here fused silica) is irradiated through the substrate with a pulsed UV laser so that the film peels off in the irradiated area. In contrast to the LIFT, however, suitable measures (e.g. silicon cover layer) ensure that the film segment is not completely removed from the substrate, but remains attached to the irradiation edges, so that cavities are formed, the shape of which can be designed by the irradiation parameters. The SiO_x can then be oxidized to SiO_2 , resulting in a channel system made of pure quartz glass with excellent optical properties (high transparency, free of intrinsic fluorescence).

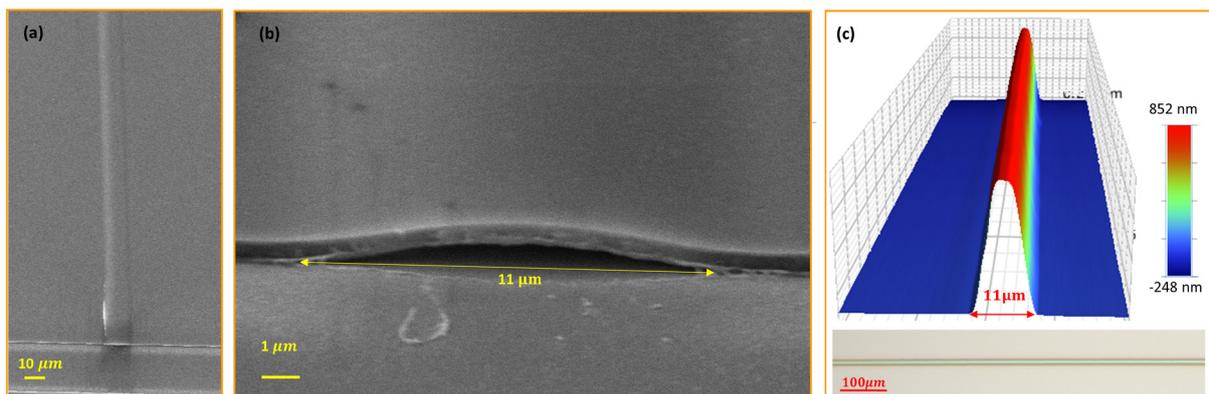


Abb. 2: (a) SiO_2 -Nanokanal, (b) Querschnitt eines Nanokanals (Rasterelektronenmikroskop-Aufnahmen), (c) Höhenprofil (oben) und Mikroskopbild (unten).

Fig. 2: (a) SiO_2 -nano channel, (b) cross-section of a nano channel (Scanning electron micrographs), (c) height profile (top) and microscope image (bottom).

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 dadurch eingebrachten Schichtspannung kommt es oft zu einer unerwünschten Verformung. Besonders kritisch ist dies, wenn dünne Substrate verwendet werden, da zwischen induzierten Krümmungen und Substratdicke eine quadratische Abhängigkeit besteht. Ein gängiges Verfahren zur Kompensation dieser Schichtspannungen ist das Aufbringen einer rückseitigen Kompensationsschicht, was aber oft nicht zielführend ist.

Wir entwickeln ein lasergestütztes Verfahren, das es ermöglicht, ein beschichtetes Glassubstrat durch rückseitige Bestrahlung kontrolliert zu verformen, sodass eine hinreichende Ebenheit erreicht wird. Verwendet wird hierbei ein ArF-Excimer-Laser ($\lambda = 193 \text{ nm}$), mithilfe dessen ebene Spannungskomponenten durch die Erzeugung einer oberflächennahen Schmelzschicht gebildet werden. Durch die thermische Ausdehnung des bestrahlten Materials entsteht lokal eine Druckspannung, die bei ausreichender Viskositätsverringering teilweise relaxieren kann. Beim Wiedererkalten des bestrahlten Bereichs entsteht durch die thermische Kontraktion eine dauerhafte Zugspannung.

Abb. 1 a) Parabolische Verformung eines Glassubstrats durch biaxialen Spannungseintrag. Für die Krümmungen gilt $k_x = k_y \neq 0$.
b) Zylindrische Verformung eines Glassubstrats durch uniaxialen Spannungseintrag. Die Linien sind in y-Richtung orientiert. Für die Krümmungen senkrecht und parallel zu den Linien gilt $k_x = 0$ und $k_y \neq 0$.

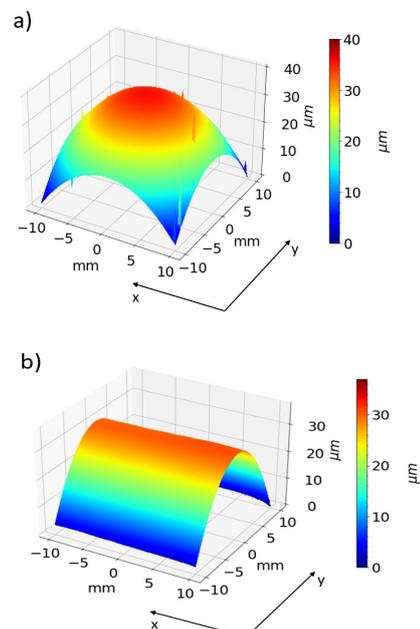
Fig. 1. a) Parabolic deformation of a glass substrate due to biaxial stress with $k_x = k_y \neq 0$.

b) Cylindrical deformation of a glass substrate due to uniaxial stress generation. The lines are oriented in the y-direction. For the curvatures $k_x = 0$ perpendicular to the lines and $k_y \neq 0$ applies parallel to the lines.

Generation of anisotropic mechanical stresses for forming optical components

The production of a mirror generally consists of applying a front-side reflective functional layer to a suitable substrate, e.g. borosilicate glass. The resulting layer stress often leads to undesirable deformation. This is particularly critical when thin substrates are used, as there is a quadratic dependency between induced curvature and substrate thickness. A common method of compensating for these layer stresses is to apply a compensation layer on the back, but this is often not ideal.

We are developing a laser-based process that enables a coated glass substrate to be deformed in a controlled manner by backside irradiation so that sufficient flatness is achieved. An ArF excimer laser ($\lambda = 193 \text{ nm}$) is used here which is used to generate flat stress components by creating a melt layer close to the surface. The thermal expansion of the irradiated material creates a local compressive stress, which can partially relax if the viscosity is reduced sufficiently. When the irradiated area cools down again, the thermal contraction creates a permanent tensile stress.



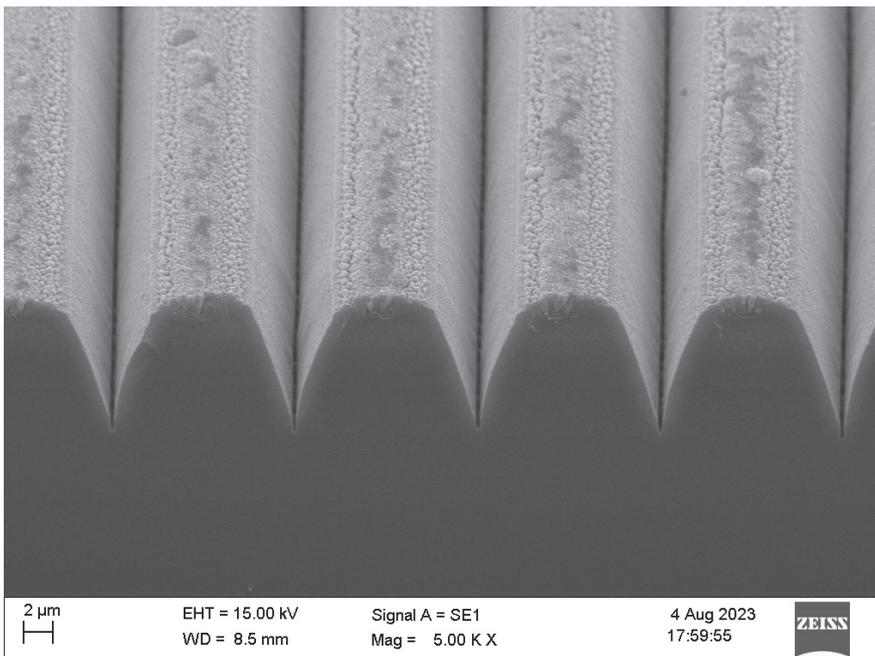
Kurze Pulse / Nanostrukturen

Short Pulses / Nanostructures

Durchgängige Schichten wie z.B. eine Kompensationsschicht oder Schmelzschicht besitzen den Nachteil, nur isotrope Spannungen erzeugen bzw. korrigieren zu können, sodass die induzierten Krümmungen $k_y = k_x \neq 0$ identisch sind, siehe Abb. 1a. Die Ausgangsform eines Spiegelsubstrats besitzt im Allgemeinen jedoch abhängig von der Position und Richtung unterschiedliche Krümmungen. Um diese Krümmungen lokal zu kompensieren, ist es nötig, anisotrope Spannungen zu erzeugen. Erreicht wird dies durch eine linienstrukturierte Schmelzschicht, siehe Abb. 2. In Abb. 1b ist die durch die Linienstrukturierung induzierte Verformung dargestellt. Wie deutlich zu erkennen ist, besitzt die Verformung stark anisotropen Charakter. Für die induzierten Krümmungen gilt $k_y \neq 0$ und $k_x = 0$. Ein solcher uniaxialer Spannungszustand entkoppelt die Raumrichtungen und ermöglicht eine flexible lokale Verformung. Durch Berechnung eines Bestrahlungsmusters kann durch eine Linearkombination dieser uniaxialen Zustände ein beliebig verformtes Ausgangssubstrat mit Funktionsschicht flexibel korrigiert werden.

Continuous layers such as a compensation layer or melt layer have the disadvantage of only being able to generate or correct isotropic stresses, so that the induced curvatures $k_y = k_x \neq 0$ are identical, see Fig. 1a. However, the initial shape of a mirror substrate generally has different curvatures depending on the position and direction. To compensate for these curvatures locally, it is necessary to generate anisotropic stresses.

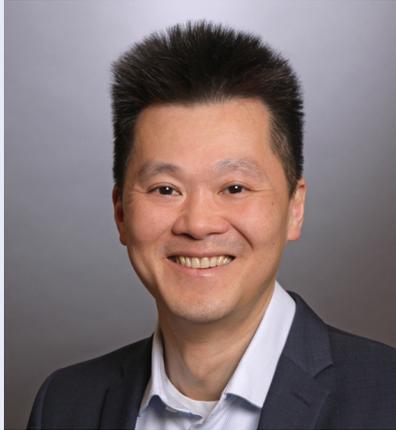
This is achieved by a line-structured melt layer, see Fig. 2. Fig. 1b shows the deformation induced by the line structuring. As can be clearly seen, the deformation has a strongly anisotropic character. It follows that $k_y \neq 0$ and $k_x = 0$. Such a uniaxial stress state decouples the spatial directions and enables flexible local deformation. By calculating an irradiation pattern, an arbitrarily deformed initial substrate with a functional layer can be flexibly corrected by a linear combination of these uniaxial states.



◀ Abb. 2 Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme einer Bruchkante eines Borosilikatsubstrats, das mit einer Linienstruktur versehen wurde. Die Blickrichtung ist um 45° zur Oberflächennormale geneigt.

Fig. 2 Scanning electron micrograph of a fracture edge of a borosilicate substrate that has been provided with a line structure. The viewing direction is inclined by 45° to the surface normal.

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

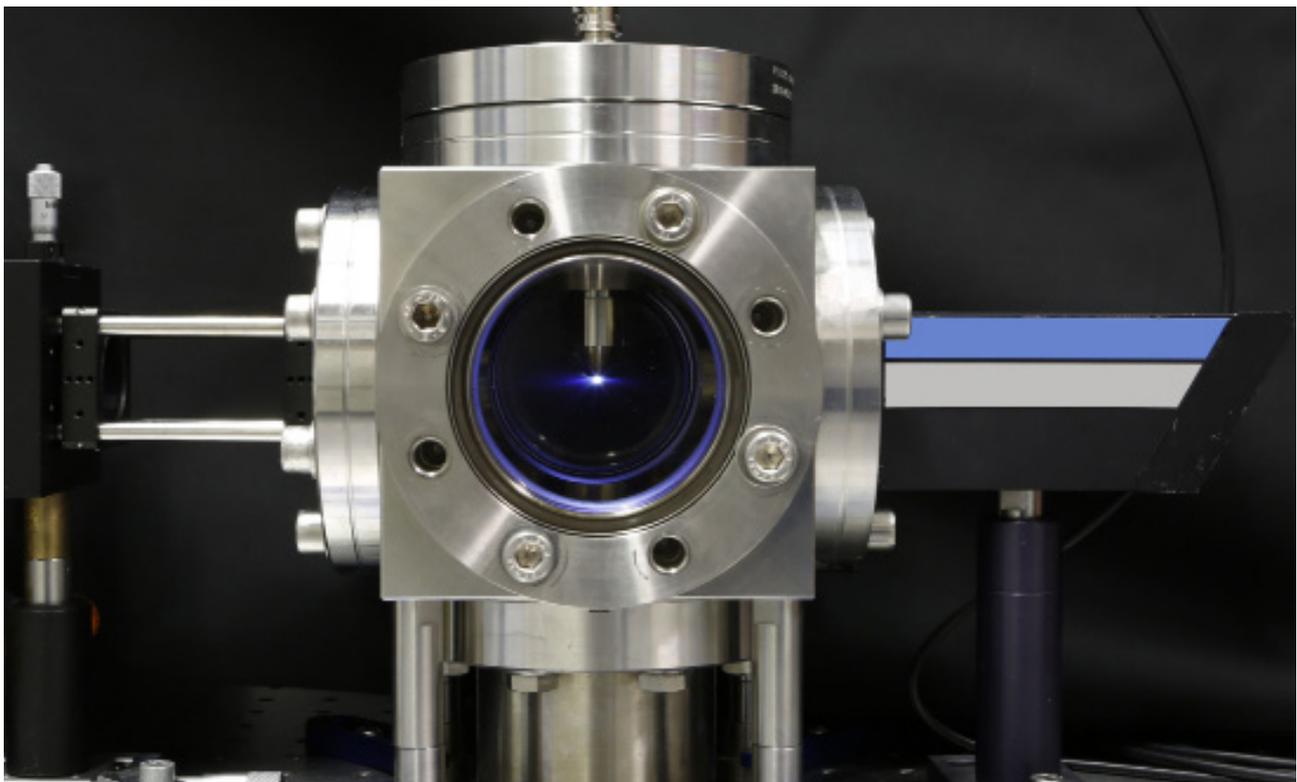
Anja Ahrens

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 Laserinduzierten Plasma-Wechselwirkung und -strahlung sowie auch mit der Charakterisierung von Hochleistungsoptiken zur Strahlführung. Somit liegen 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 im Photonenenergiebereich von 1 eV bis zu 10 keV für Spektroskopie und Bildgebung.

Unter Verwendung von hochauflösenden Wellenfrontsensoren können Qualität und die Strahlungsstabilität optischer Komponenten und damit Absorption, thermische Linseneffekte, Zerstörschwellen sowie das Langzeit-Degradationsverhalten präzise ermittelt werden. Die Weiterentwicklung kompakter Quellen für EUV- und weiche Röntgenstrahlung wird vorangetrieben; diese ermöglichen bereits jetzt diverse messtechnische Anwendungen (Absorptionsspektroskopie zur chemischen Analytik (NEXAFS), Reflektometrie, Röntgenmikroskopie im „Wasserfenster“). 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.

Ab März 2023 erfolgte die schrittweise Übergabe der Abteilungsleitung von Dr. Klaus Mann an Dr. Dong Du Mai. Dr. Klaus Mann bleibt als Ansprechpartner für Photothermie und Strahlcharakterisierung der Abteilung erhalten und nimmt auch weiterhin administrative Aufgaben am Institut wahr. Unter Beibehalt der bisherigen Ausrichtung der Abteilung werden unter Dr. Mai weitere Forschungsschwerpunkte im Bereich zeitaufgelöste Röntgenspektroskopie, Erzeugung und Charakterisierung ultrakurzer Pulse jenseits der Femtosekunde hochaufgelöste Röntgenbildgebung gesetzt und ausgebaut.

The "Optics / Short Wavelengths" department of the Institut für Nanophotonik focuses its R&D on propagation of laser radiation, laser-induced plasma interaction/radiation, and characterization of high-performance optics beam transportation. The emphases are therefore on analyzing and adapting the radiation behavior of lasers, on the deep UV wavelengths relevant for semiconductor lithography, and also on the generation and use of photon sources in the energy range from 1 eV to 10 keV for spectroscopy and imaging. Utilizing high-resolution wavefront sensors, the quality and radiation stability of optical components and thus absorption, thermal lens effects, destruction thresholds, and long-term degradation behavior can be precisely determined. The further development of compact sources for EUV and soft X-rays is pushed. The present technological achievements already enable various measurement technology applications such as absorption spectroscopy for chemical analysis (NEXAFS), reflectometry, and X-ray microscopy in the "water window". Focusing the short-wave radiation with suitable optics also allows stability tests on optical materials and sensors in the EUV regime, for example at 13.5 nm or shorter wavelengths.

In March 2023, the department management was transferred from Dr. Klaus Mann to Dr. Dong Du Mai. Dr. Klaus Mann will remain as the department's contact person for photothermal, optics, and beam characterization and will continue to carry out administrative tasks at the institute. While maintaining the previous direction of the department, Dr. Mai's further research focuses in the area of 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

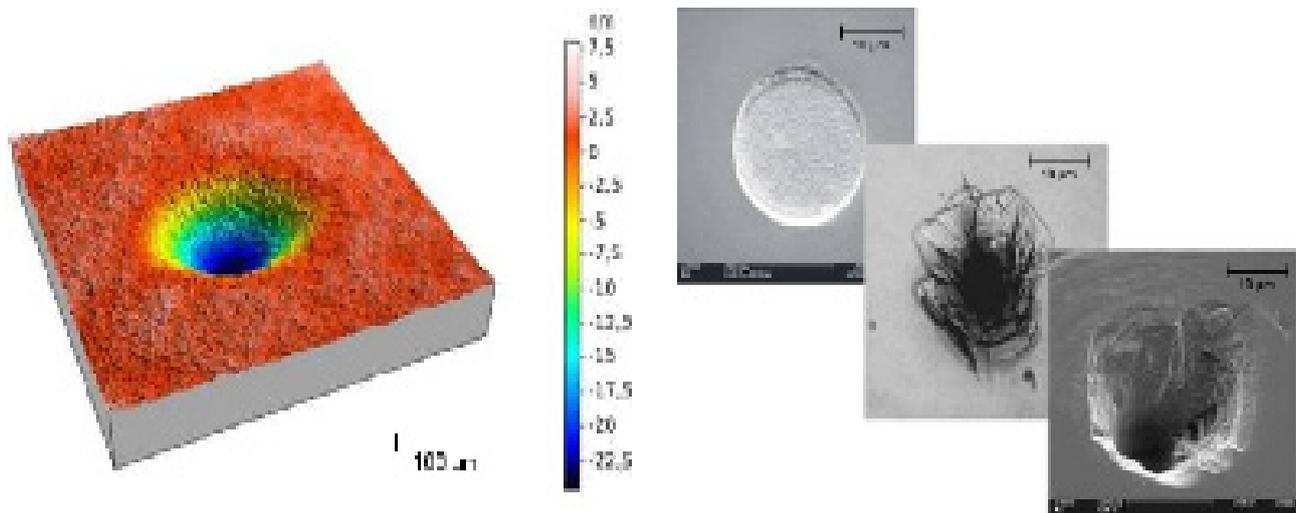
Optics / Short Wavelengths

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-Lithographie 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 the 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 nonlinear effects, is of great importance, especially for the semiconductor lithography wave-lengths 248 and 193 nm. In addition, due to steadily increasing laser powers, the thermally induced wave-front 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.
Figure 1: (left) Compaction of a quartz sample under ArF excimer laser irradiation (108 pulses, white light interferogram) and (right) morphological damage 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 innerer 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 orts aufgelöst erfasst werden kann (siehe Konturdarstellungen).

The 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-sensitivity 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).

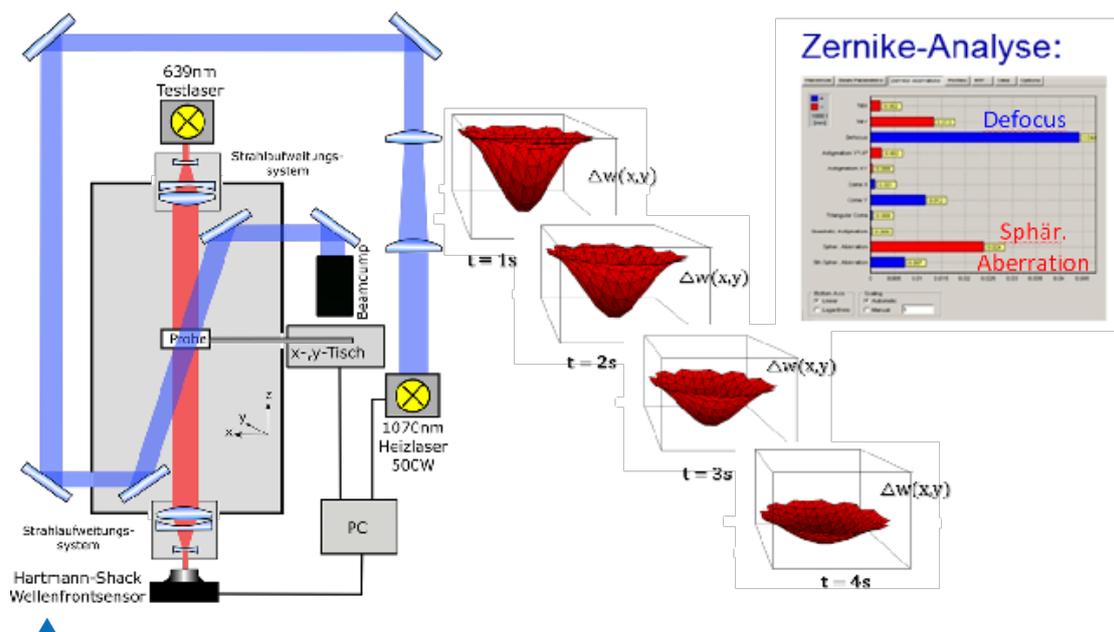


Abbildung 2: Aufbau des photothermischen Messsystems zur quantitativen Auswertung des "Focus Shift"-Effekts und der induzierten Aberrationen.

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

Optik / Kurze Wellenlängen

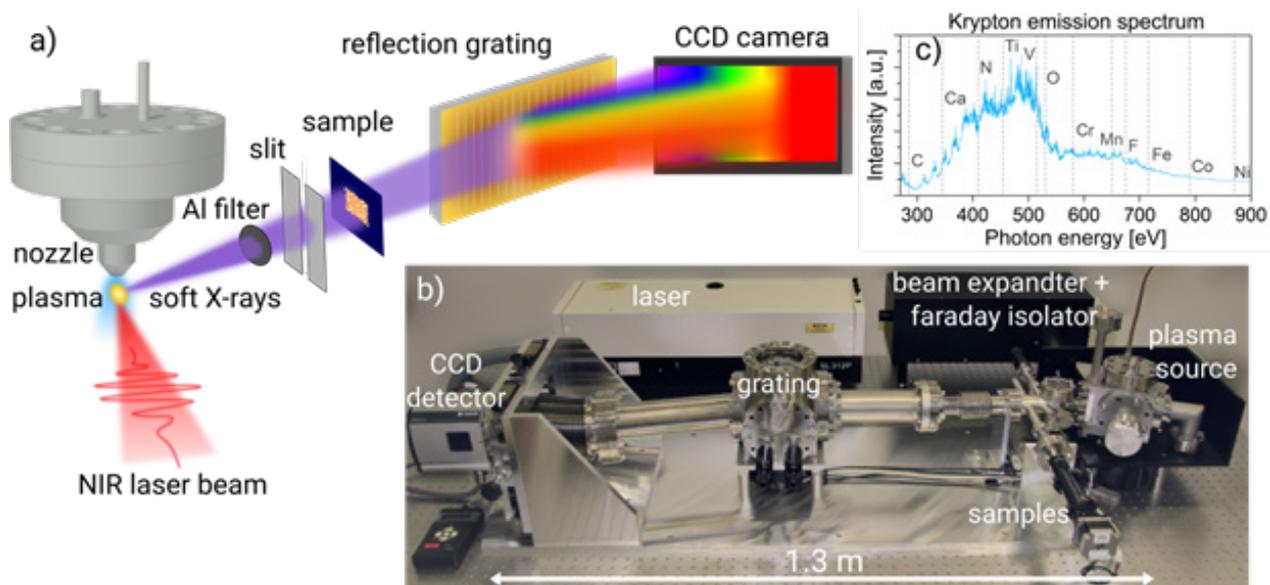
Optics / Short Wavelengths

Röntgenabsorptionsspektroskopie (NEXAFS-Spektroskopie)

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

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 $\lambda = 1 - 5$ 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. 1: (a) Schematisches Prinzip des Röntgenabsorptionsspektrometers und (b) Foto des kompakten Laborsystems. (c) zeigt das erzeugte Krypton-Emissionsspektrum mit ausgewählten Absorptionskanten in diesem Spektralbereich.

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

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. 2).

The samples can be analyzed either in a vacuum or at atmospheric pressure in 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 the measurements at the synchrotron can now be performed with our compact table-top setup (see Fig. 2).

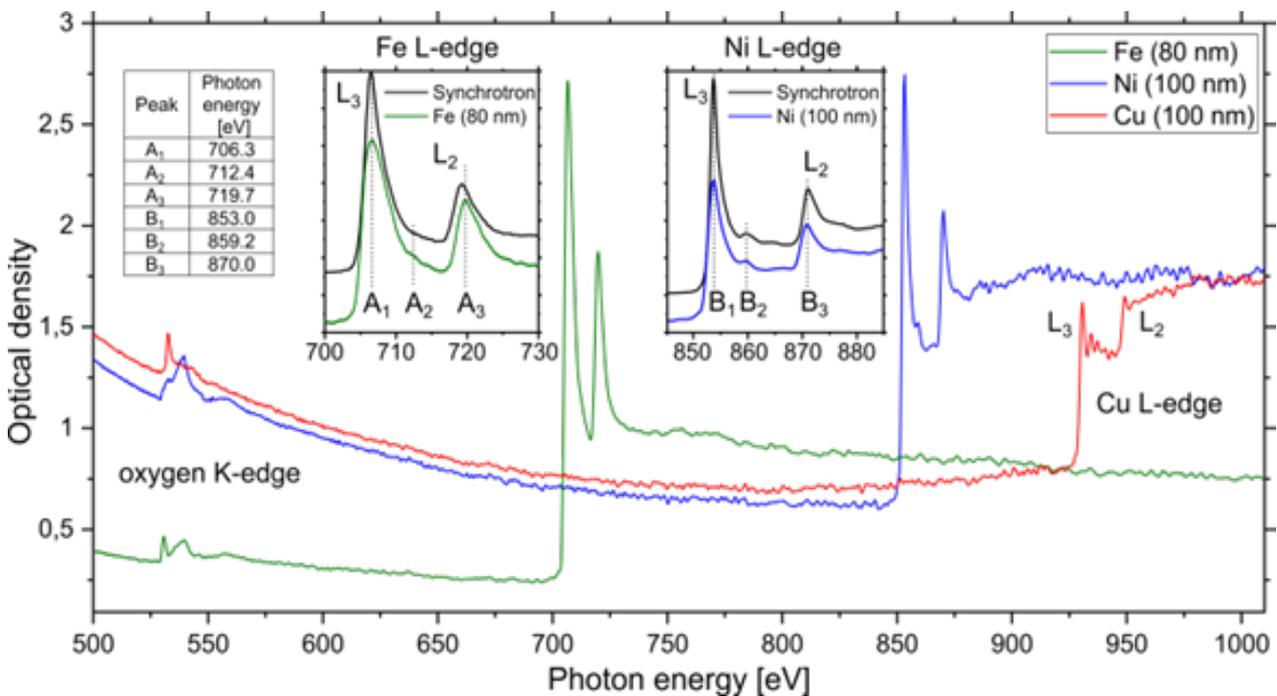


Abb. 2: Röntgenabsorptionsspektren für dünne Fe-, Ni- und Cu-Schichten auf Si₃N₄-Membranen, untersucht an ihren L-Absorptionskanten und an der Sauerstoff-K-Kante (akkumuliert über 750 Pulse). Zum Vergleich sind Messungen am Synchrotron dargestellt, welche die Gesamtelektronenausbeute von Eisen und Nickel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

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

Optik / Kurze Wellenlängen Optics / Short Wavelengths

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

Die Röntgenabsorptionsspektroskopie eignet sich hervorragend zur Untersuchung der elektronischen Struktur und chemischer Bindungen in Materialien sowie Oberflächen und dünnen Schichten. 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)

X-ray absorption spectroscopy is well suited for investigating the electronic structure and chemical bonding in materials, surfaces and thin films. However, access to this technique is currently very limited as it is mainly available in large research facilities where beam time is limited. The BMBF-funded KOPAS project aims to develop a laser-based plasma source for spectroscopy in the soft and middle 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 complete table-top system consisting of a radiation source, spectrometer, and optional liquid jet 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. 1: Kompakter Laboraufbau zur hochauflösenden Röntgenabsorptionsspektroskopie, Bild: Institut für Nanophotonik Göttingen e.V. & Advanc.
 Fig. 1: Compact laboratory setup for high-resolution X-ray absorption spectroscopy. Image: Institute for Nanophotonics Göttingen e.V. & Advanc.

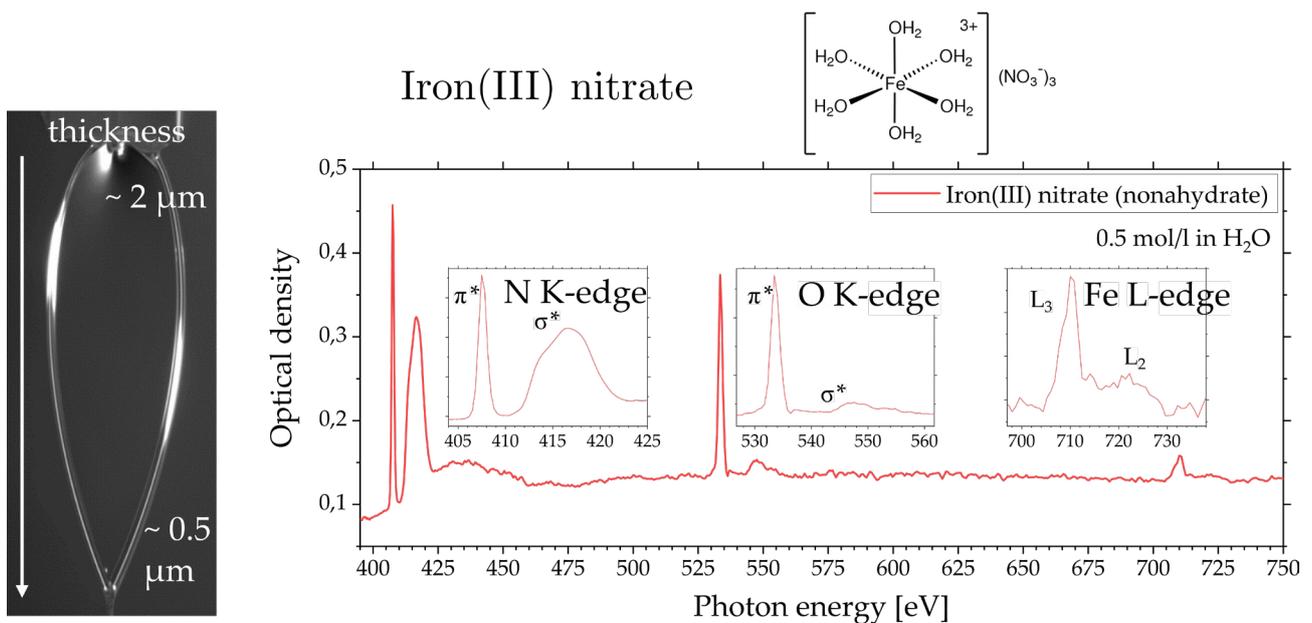


Abb. 2: Links ist eine dünne Flüssigkeitslamelle abgebildet, die zur Bereitstellung flüssiger Proben im Vakuum verwendet wird. Rechts ist ein an dieser Lamelle gemessenes Spektrum von in Wasser gelöstem Eisen(III)-Nitrat dargestellt, das die verschiedenen Absorptionskanten zeigt.
 Fig. 2: A thin liquid 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

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 Freie-Elektronen-Laser FLASH 2 / DESY entwickelt. Mit Hilfe dieses Systems sollen sowohl die Strahlqualität im Fokus verbessert als auch der Zeit- bzw. Personalaufwand für die Justage deutlich reduziert werden. Die Grundidee des Ansatzes (s. Abb. 1) besteht darin, die aktuellen Strahlparameter für einen gegebenen Satz von Aktorpositionen mit Hilfe eines Hartmann-Shack-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

Within the BMBF project "FELFocus" that started in October 2022, a measuring and control system for the automated adjustment of Kirkpatrick-Baez (KB) optics on the FEL beam from FLASH 2 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. 1) is to calculate the current beam parameters for a given set of actuator positions using a Hartmann Shack wave-front sensor, and to use them as input to a self-learning algorithm in order to solve the inverse problem.

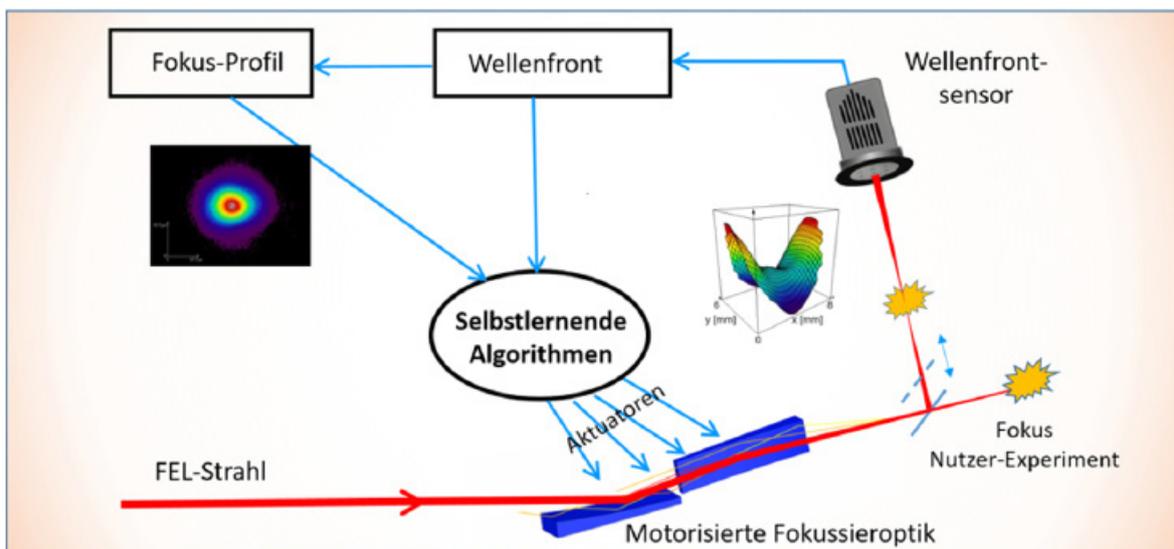


Abb. 1: Prinzip der automatisierten Justage von FEL-Fokussieroptiken am Beispiel der Kirkpatrick-Baez-Spiegelanordnung an FL24 / FLASH 2 mit 14 Aktuatoren. Ein beweglicher Planspiegel im FEL-Strahlengang ermöglicht die Aufnahme und Rekonstruktion von Wellenfront und Strahlprofil mit einem Hartmann-Shack-Wellenfrontsensor. 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. 1: Planned procedure for the automated adjustment of FEL focusing optics, illustrated for the Kirkpatrick-Baez mirror system of FL24 / FLASH2 (14 actuators). By means of a plane mirror to be moved into the FEL beam path, its 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 Sensorfläche 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 nonlinear relationship between mirror position and beam parameters. As part of the IFNANO subproject, a suitable EUV wave-front 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).

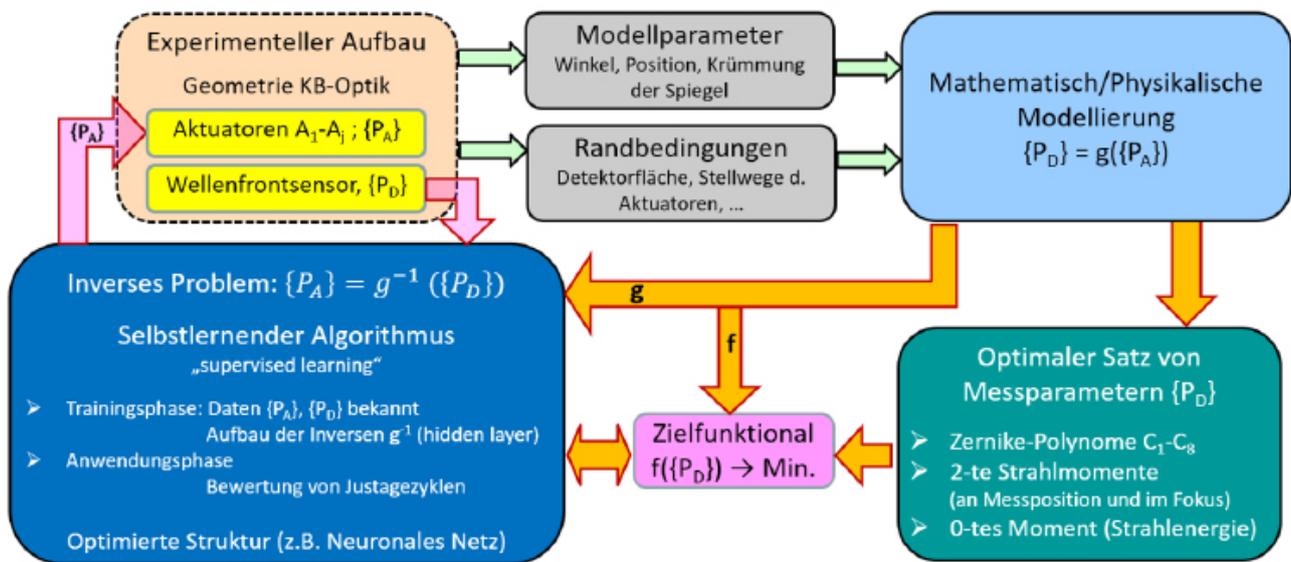


Abb. 2: Blockdiagramm der Teilsysteme und Abhängigkeiten innerhalb der Lösungsstrategie zur optimalen und automatisierten Justage der FEL- Fokussieroptik. Ausgehend von der experimentellen Anordnung und einer Modellierung des optischen Systems (Vorwärtsrichtung) soll ein optimaler Satz von Strahlparametern sowie ein Zielfunktional bestimmt und als Input eines selbstlernenden Algorithmus zur Lösung des inversen Problems verwendet werden.

Fig. 2: 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.

Optik / Kurze Wellenlängen

Optics / Short Wavelengths

Ein Teilziel des IFNANO-Vorhabens ist dabei der Aufbau des Kodier- und Dekodiermoduls zur „On demand“-Erzeugung von Strahlen mit definiertem Bahndrehimpuls. Das Kodiermodul besteht aus einem SLM zur Erzeugung einer topologischen Ladung von $\tau=1$ als Endspiegel eines Resonators (s. Abb. 1). Je nach Anzahl der Pulsumläufe im Resonator kann so ein definierter Bahndrehimpulszustand erzeugt werden. Zur Ein- und Auskopplung der Pulse dient eine Kombination aus Pockelszelle und Faraday-Rotator. Der Dekodierer ist als astigmatisches Zylinderlinsenteleskop ausgelegt, das einen Strahl mit topologischer Ladung τ in einen Strahl mit $\tau+1$ Maxima transformiert. Die Anzahl der Maxima wird mit Hilfe eines linearen Photodiodenarrays detektiert.

One topic of the IFNANO subproject is the layout and construction of encoder and decoder modules for the on-demand generation of laser pulses with a specific topological charge τ . The encoder consists of a SLM for generation of charge $\tau=1$ as end mirror of a resonator (see Fig. 1). Depending on the number of round trips a defined τ -value can be obtained. A Pockels cell in combination with a Faraday rotator serves for feeds the pulse in and out of the resonator. The decoding module consists of an astigmatic telescope for transformation of a vortex beam with charge τ into a beam with $\tau+1$ maxima, followed by a linear array of photodiodes for detection.

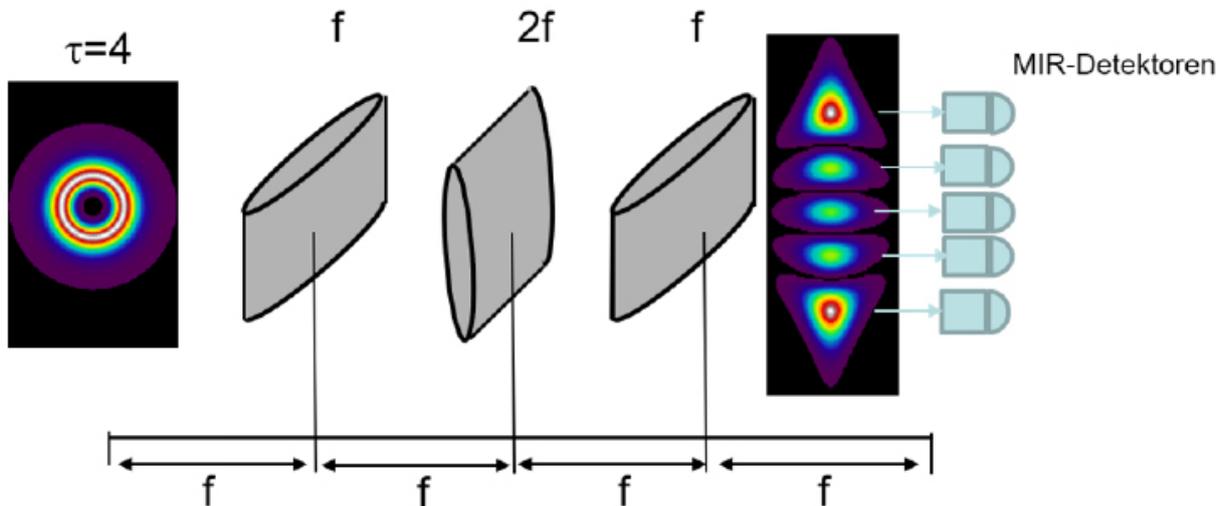


Abb. 2: Prinzip des Dekodiermoduls mit astigmatischer Zylinderlinsenkonfiguration zur Transformation eines Vortexstrahls mit topologischer Ladung τ in einen Strahl mit $\tau+1$ Maxima. Das System erzeugt in der horizontalen Richtung eine $4f$ -Abbildung mit $M=-1$, während es vertikal eine Fourier-Transformation bewirkt. Dadurch kann der Twistparameter eliminiert und in eine laterale Modulation der Intensität überführt werden.

Fig. 2: Principle of the decoder module comprising an astigmatic configuration of cylindrical lenses. In the horizontal plane the system acts as a $4f$ pure magnifier ($M=-1$) whereas a perfect Fourier transform is performed in the vertical direction. This eliminates the twisted phase parameter, which is transformed into a lateral intensity modulation.

Optik / Kurze Wellenlängen Optics / Short Wavelengths

Propagation teilkohärenter FEL-Strahlung unter Einsatz von Wellenfrontdaten und Kohärenz-Modellen

Im Rahmen des BMBF-Verbundvorhabens PRO-WAVE wurde ein Verfahren zur effizienten numerischen Propagation der partiell kohärenten FEL-Strahlung am Freie-Elektronen-Laser FLASH entwickelt (siehe Abb. 1). Die Vorgehensweise basiert auf der Annahme der Quasihomogenität und verwendet die Messdaten eines Hartmann-Shack-Wellenfrontsensors in Kombination mit Kohärenz-Modellverteilungen vom Gauß- bzw. Bessel-Typ, deren Parameter mit Hilfe von Young-Experimenten und durch Vergleich mit PMMA-Einbränden bestimmt werden.

Propagation of partially coherent FEL radiation from Hartmann wave-front measurements and coherence model functions

A method for the efficient numerical propagation of the partially coherent FEL radiation at the free-electron laser FLASH2 was developed within the framework of the BMBF project PROWAVE (see Fig. 1). The procedure is based on the assumption of quasi-homogeneity and uses the output of a Hartmann Shack wavefront sensor in combination with coherence model distributions of Gauss or Bessel type, the parameters of which are determined with the help of Young experiments and by comparison with PMMA Imprints. Overall, there is excellent agreement with the PMMA data for a suitable parameter set.

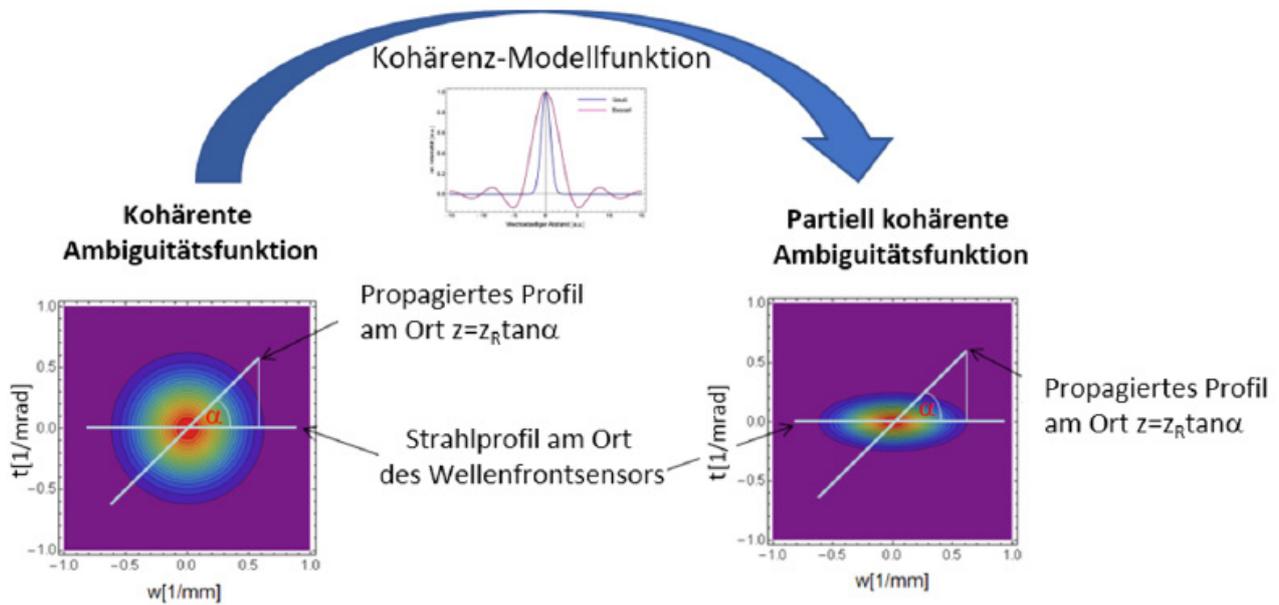


Abb. 1: Prinzip der Propagation partiell kohärenter Strahlen. Die Fourier-Transformierte (FT) der mit Hilfe von Wellenfrontdaten an den Ort z propagierten kohärenten Verteilung entspricht einem α -Schnitt durch die kohärente Ambiguitätsfunktion A bei $z=0$. Multiplikation von A mit der Kohärenz-Modellfunktion ergibt die FT der gesuchten Intensitätsverteilung in gleicher Weise als α -Schnitt der modifizierten A -Funktion.

Fig. 1: Principle of partially coherent beam propagation. The Fourier transform (FT) of the coherent distribution propagated to location z by using wave-front data corresponds to a α -cut through the coherent ambiguity function A @ $z=0$. Multiplication of A by the coherence model function results in the FT of the intensity distribution sought in the same way as a α -cut of the modified A -function.

Optik / Kurze Wellenlängen

Optics / Short Wavelengths

Insgesamt ergibt sich für einen geeigneten Parametersatz eine hervorragende Übereinstimmung mit den PMMA-Daten. Allerdings berücksichtigt die Standard-Wellenfrontrekonstruktion keine Phasensingularitäten wie Vortices oder Sprünge, obwohl diese Information z.T. in den originalen Gradientendaten enthalten ist.

Im Laufe des Jahres 2022 wurde das Verfahren daher auf Wellenfronten mit Vortex-Phasensingularitäten, wie sie z.B. bei Strahlen mit nicht verschwindendem Bahndrehimpuls auftreten, erweitert.

However, phase singularities as vortices or jumps are inhibited by the standard wavefront reconstruction, although this information is partly contained in the original gradient data.

Therefore, in 2022, the propagation algorithm was extended to wave fronts obeying vortex-like phase singularities, as they appear, for example, in beams with nonvanishing orbital angular momentum.

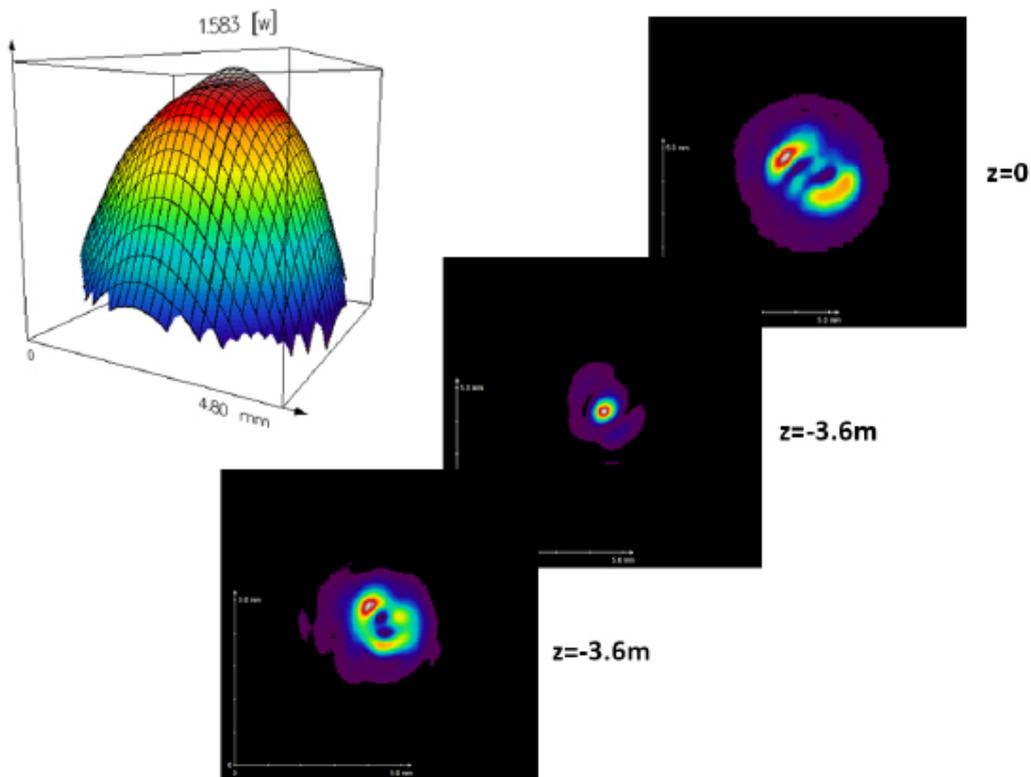


Abb. 2: Wellenfrontverteilung (links oben) und Profil (rechts oben) eines Strahls mit zwei lateral versetzten Vortices und topologischer Ladung $\tau=2$. Die daraus numerisch berechneten Intensitätsverteilungen im Fokus ohne (mittleres Profil) und mit Berücksichtigung der Phasensingularität (unten) zeigen, dass eine Standard-Wellenfrontrekonstruktion zur Propagation solcher Strahlen unzureichend ist. Fig. 2: Wave front distribution (upper left) and beam profile (upper right) of a laser beam with two laterally displaced vortices and topological charge $t=2$. The numerically propagated intensity distributions near focus without (middle) and with phase singularity considered clearly show that a standard wave-front reconstruction is insufficient in such cases.

Berichte aus der Abteilung Departmental Reports

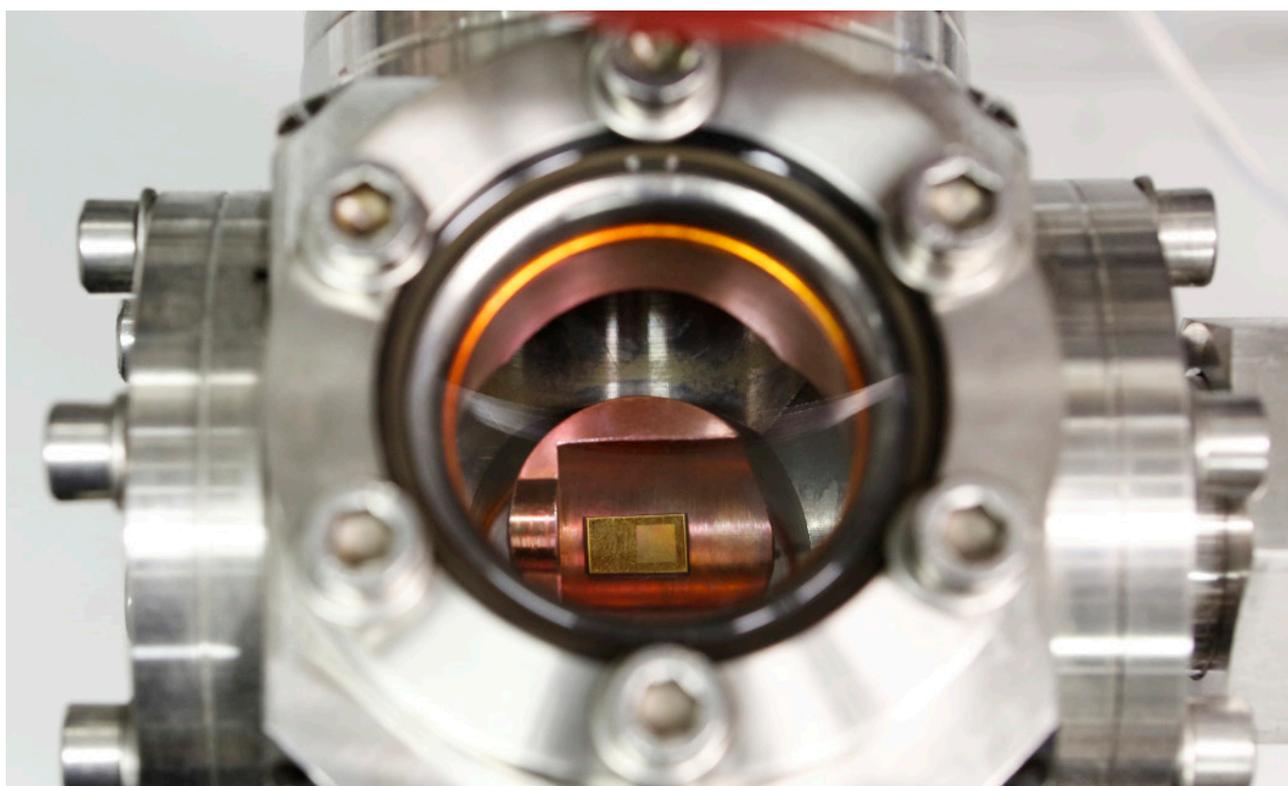


Dr. Hainer Wackerbarth
Abteilungsleiter

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

MITARBEITENDE / STAFF MEMBERS

Dr. Yamen AlSalka	Junsung Kim	Fabian Merker-Müller
Dr. Georgios Ctistis	Tim Kutz	Christian Niklas
Dr. Jan Geweke	Felix Müller	Pascal Schröder
Dr. Christoph Lenth	Stefan Scholz	Florian Wieduwilt
Dr. Sven Schwabe	Jan Lukas Langer	



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 chemometrischen Methoden 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, Bioanalytik und Prozessanalytik.

Im Bereich der Umweltanalytik werden Sensoren entwickelt für die Detektion von konventionellen und chemischen Kampfstoffen auf der Basis von Fluoreszenzemission und Ionenmobilitätsspektrometrie. Mit diesen Sensoren sollen Taucher direkt im Einsatz vor TNT und Senfgas in Ost- und Nordsee gewarnt werden.

Im Bereich der Prozessanalytik werden in der Herstellung von Kautschukprodukten Ramanstreuung, IR-Absorption und Fotometrie genutzt, um die Rohstoffqualität zu überwachen. Die komplexe Matrix der Gummiprodukte hingegen wird mittels laserinduzierter Plasmaspektroskopie untersucht. Mittels Datenfusion und Digitalisierung soll die Produktion optimiert und so die Reproduzierbarkeit der Produktqualität erhöht werden.

Neben der Erfassung der Daten bildet die Erforschung der automatisierten Datenauswertung bei komplexeren Informationen einen weiteren Schwerpunkt. Als Beispiele sind hier die Überwachung der Raumluft und Lithium-Ionen-Akkus mittels unterschiedlicher Gassensoren zu nennen.

The department researches and develops novel sensory measurement methods. These are mainly based on Raman scattering, fluorescence, IR absorption, laser-induced breakdown spectroscopy, photometry, and ion-mobility spectrometry. In addition, these methods are often combined with specific sample preparation procedures and chemometric analysis methods.

The strengths of these sensory methods lie in the almost nondestructive, noncontact, and fast measurements. Furthermore, they enable the analysis of elements, substances, and structures, as well as complex matrices and biological systems. New combinations of these optical methods with microfluidics, nanotechnology, or chemometrics have a very high potential for innovative applications, especially in the fields of environmental analysis, point-of-care-testing, on-site analysis, bioanalysis, and process analysis.

In the field of environmental analysis, sensors are developed for the detection of conventional and chemical warfare agents on the basis of fluorescence emission and ion-mobility spectrometry. With these sensors, divers should be warned of TNT and mustard gas in the Baltic and North Sea while they are on duty.

In the field of process analysis, on one hand, Raman scattering, IR absorption, and photometry are used in the manufacture of rubber products in order to monitor the quality of the raw materials. The complex matrix of rubber products, on the other hand, is examined using laser-induced breakdown spectroscopy. By means of data fusion and digitization, production is optimized, thus increasing the reproducibility of product quality.

In addition to the collection of data, research into automated data evaluation for more complex information is another focus of the department. Examples here are the monitoring of the indoor air quality and lithium-ion batteries using different gas sensors.

Photonische Sensorik

Photonic Sensor Technologies

Entwicklung von Sensoren für die Detektion von konventionellen und chemischen Kampfstoffen zur sicheren Unterwasserarbeit in Ost- und Nordsee

Selbst 75 Jahre nach Ende des Zweiten Weltkriegs liegen noch immer Unmengen an Munition in deutscher Nord- und Ostsee. Davon sind mindestens 212.000 Tonnen chemische Kampfmittel. Durch fortschreitende Korrosion der metallischen Hüllen steigt die Gefährdung durch austretende Kampfmittel wie TNT und S-Lost (Senfgas) immer weiter an. Hierdurch besteht nicht nur eine Gefahr für die Umwelt, sondern viele Menschen, die im Zuge der zunehmenden Nutzung des Meeres - beispielsweise Offshore-Windkraftanlagen und Pipelines - immer mehr Gefahr laufen, mit schädlichen Stoffen aus Munitionsrückständen in Kontakt zu kommen.

Die Abteilung Photonische Sensorik arbeitet an Analysemethoden zur TNT- und Senfgasdetektion. Diese sollen die Sicherheit von Bergungstauchern verbessern. Dazu wird die Konzentration von TNT im Meerwasser nahezu in Echtzeit unter Wasser erfasst, da die Konzentration von TNT die in der Nähe von durchgerosteten Sprengkörpern gesundheitsschädigend für Menschen sein kann.

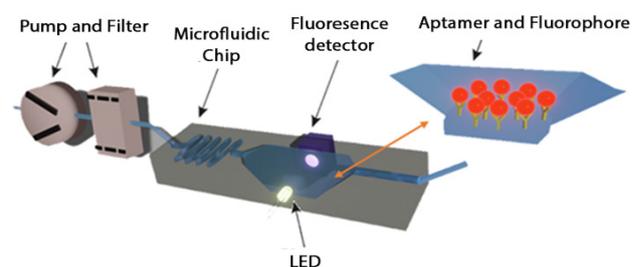


▲ Warnsystem für Taucher beim Umgang mit Munition.
Warning system for divers when handling ammunition.

Development of sensors for the detection of conventional and chemical warfare agents for safe underwater work in the Baltic and North Seas

Even 75 years after the end of World War II, there are still tons of ammunition in the German North and Baltic Seas. At least 212,000 tons of these are chemical ordnance. Due to the progressive corrosion of the metallic covers, the danger increases from escaping substances such as TNT and S-LOST (mustard gas). As a result, there is not only a danger to the environment, but many people who are increasingly in contact with harmful fabrics from ammunition residues in the course of the use of the sea - for example offshore wind turbines and pipelines.

The Department of Photonic Sensors is working on analytical methods for TNT and mustard gas detection. These are intended to improve the safety of divers. For this purpose, the concentration of TNT in seawater is recorded almost in real time underwater, since the concentration of TNT in the vicinity of rusted explosive devices can be harmful to human health.



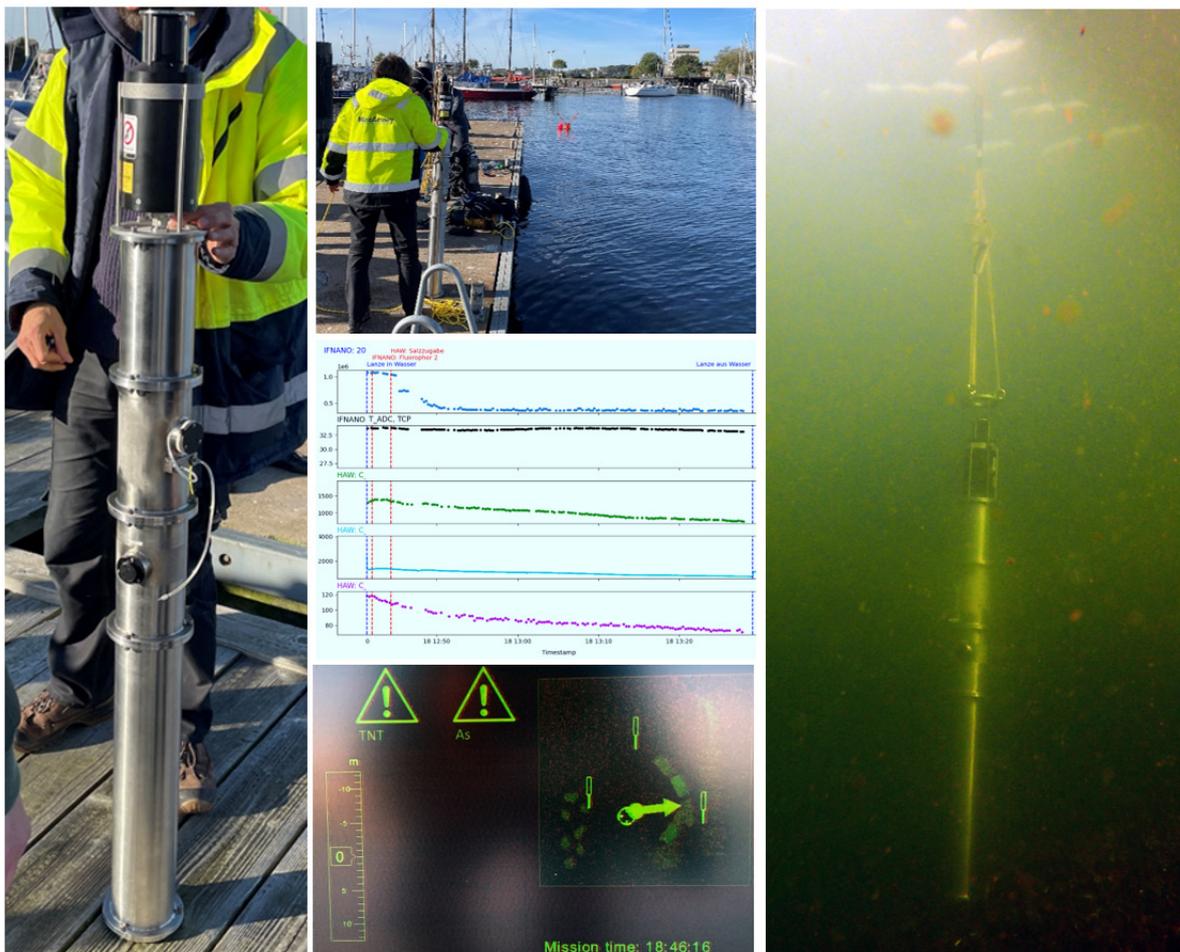
▲ Schematische Darstellung des Lab-on-a-Chip-basierten Fluoreszenzensors.
Schematic of the lab-on-a chip-based fluorescence sensor.

Photonische Sensorik

Photonic Sensor Technologies

Daher soll in dem Vorhaben ein Lanzen-Sensor entwickelt werden, der am Meeresboden vor dieser Gefahr warnt. Alternativ kann der Sensor auf einem Unterwasserfahrzeug oder später an der Taucherausrüstung angebracht werden, um die TNT-Konzentration im Wasser anzuzeigen. Dazu wird ein Lab-on-a-Chip-basierter Sensor entwickelt, dessen Detektion auf einer Fluoreszenzlöschung basiert. Diese wird mit einem durch ein Fluorophor markierten Antikörper durch das Andocken des TNT an diese Verbindung ausgelöst.

For this reason, the project aims to develop a lance sensor that warns of this danger on the seafloor. Alternatively, the sensor can be mounted on an underwater vehicle or later on the diver's equipment to indicate the concentration of TNT in the water. For this purpose, a lab-on-a-chip-based sensor is being developed, the detection of which is based on fluorescence quenching. This is triggered by the docking of the TNT to an antibody labelled by the fluorophore.



▲ Realtest unter Wasser für die komplette Lanze einschließlich TNT-Fluoreszenzsensor, Biolumineszenzsensor, digitaler Signalübertragungseinheit und Unterwassermodem.

Real test underwater for the complete lance including TNT fluorescence sensor, organic linescent sensor, digital signal transmission unit, and underwater modem.

Photonische Sensorik

Photonic Sensor Technologies

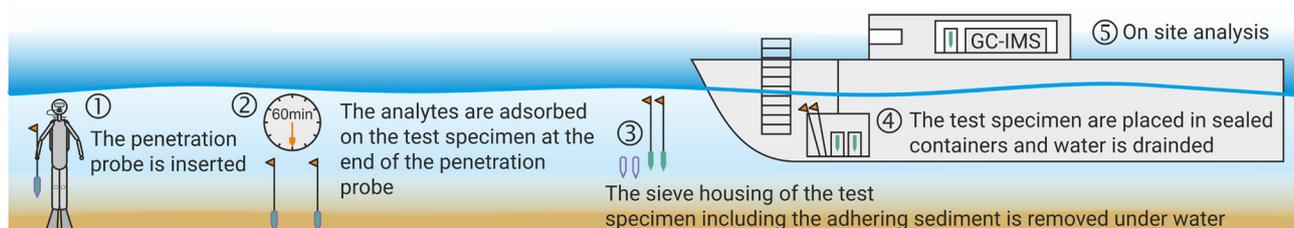
Detektion von chemischen Kampfstoffen

Im Meer verklappte chemische Kampfstoffe stellen eine dauerhafte Gefahr für die Menschen dar, die in der Fischerei- und der maritimen Infrastrukturindustrie in der Nord- und Ostsee arbeiten. Hier wird eine neuartige Probennahmetechnik basierend auf Festphasen-Mikroextraktion und Gaschromatographie (SPME/GC) für Senfgas und dessen spezifische Abbauprodukte 1,4-Dithian und 1,4-Thioxan und den Begleitstoff Chlorbenzol im Meeresboden vorgestellt. Bei dieser Methode wird ein Gaschromatographen mit einem auf Ionenmobilitätsspektrometrie basierenden Detektor für die Vor-Ort-Analyse verwendet. Das beschriebene Verfahren vermeidet eine Kontamination mit Senfgas, indem die Analyten direkt im Sediment an einem Beprobungskörper adsorbiert werden.

Hier eine kurze Methodenbeschreibung: (1) Eine Penetrationssonde wird in den Meeresboden gesteckt. (2) An der Spitze der Sonde werden Senfgas und dessen Abbauprodukte an einem beschichteten Beprobungskörper adsorbiert. (3) Sedimentreste werden entfernt und der Beprobungskörper wird in einen gasdichten Behälter überführt. (4,5) Um eine gaschromatographische Analyse vor Ort durchzuführen, wird die Testprobe im Behälter erhitzt und der Dampfraum wird mittels Festphasen-Mikroextraktion (SPME) beprobt.

Detection of chemical warfare agents

Dumped chemical warfare agents permanently endanger people working in the fishing and sea infrastructure industry in the North and Baltic Seas. A novel sampling technique based on solid phase microextraction and gas chromatography (SPME/GC) for the specific sulfur mustard and its degradation products 1,4-dithian and 1,4-thioxan and the accompanying substance chlorobenzene in the seabed is presented here using a gas chromatograph with an ion mobility spectrometry-based detector for on-site analysis. The method described avoids contamination with sulfur mustard by direct adsorption of the analytes on a test specimen in the sediment. Our method in short: (1) a penetration probe is inserted into the seabed. (2) on the tip of the probe HD and its degradation products are adsorbed on a coated test specimen. (3) sediment residue is removed and the test specimen is transferred into a gas-tight container. (4,5) in order to perform on-site gas chromatography analysis, the test specimen is tempered in the container and the headspace is sampled using solid phase microextraction (SPME).



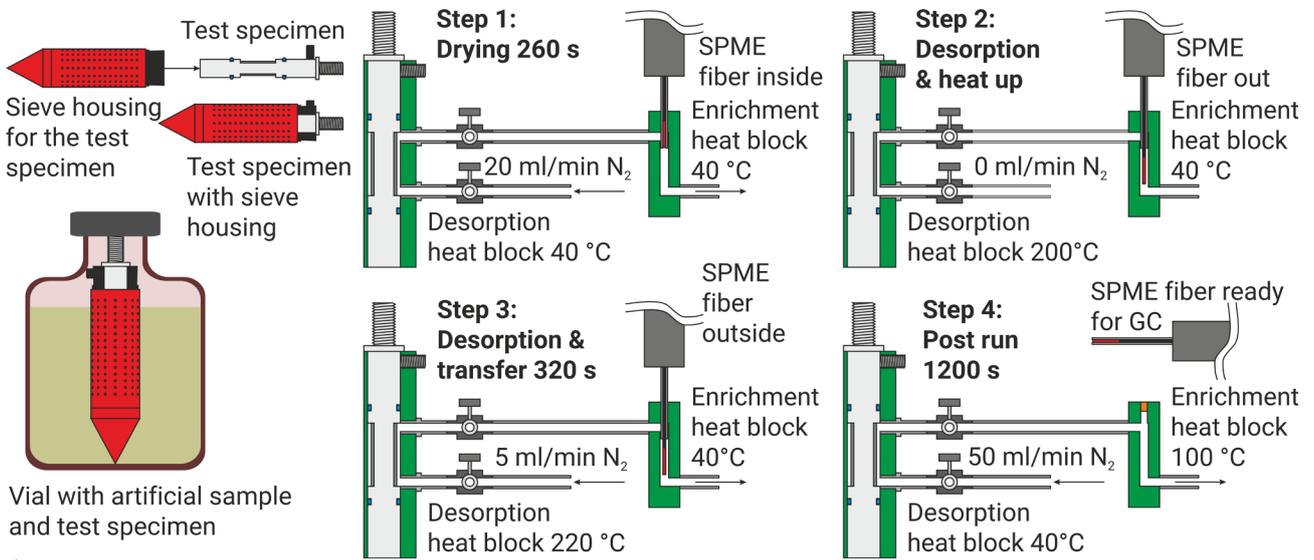
▲ Probennahmekonzept.
Sample collection concept.

Photonische Sensorik

Photonic Sensor Technologies

Hierfür musste eine spezielle computergesteuerte Umlagerungstechnologie entwickelt werden. Die Eignung der entwickelten Methode zur sicheren Senfgasdetektion wurde anhand von künstlich hergestellten Probenmustern bewiesen. Dazu wurde Sediment mit den Senfgasabbauprodukten 1,4-Dithian und 1,4-Thioxan sowie Chlorbenzol versetzt. Diese Stoffe konnten in den Konzentrationen nach-

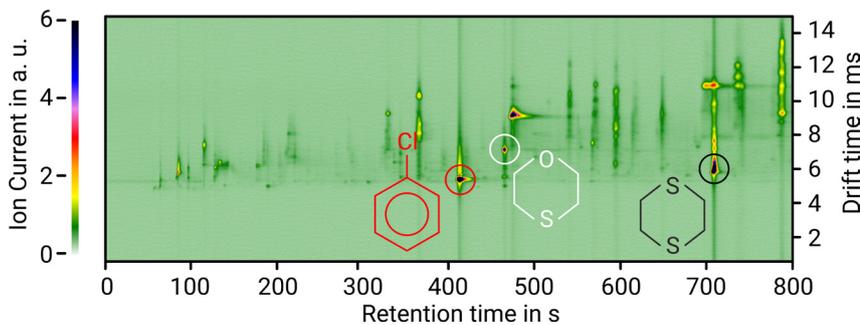
For this purpose, a special computer-controlled rearrangement technology had to be developed. The suitability of the developed method for safe mustard gas detection was proven using artificially produced samples. Therefore, the seabed was mixed with traces of the mustard gas degradation products 1,4-dithiane and 1,4-thioxane as well as chlorobenzene. These substances were detected



Schematische Darstellung des Extraktionsprozesses für ein künstlich hergestelltes Probenmuster. Schematic of the extraction process of the analytes from the artificial samples.

gewiesen werden, die auch in kontaminierten Meeressedimenten zu erwarten sind. Geplant sind weitere Untersuchungen mit Senfgas selbst in einem Hochsicherheitslabor.

in the concentrations that would also be expected in contaminated marine sediments. Further investigations using mustard gas are planned in a high-security laboratory.



Chromatogramm in topographischer Darstellung der aus den künstlichen Probenmustern extrahierten Substanzen. Heat map chromatogram of the extracted substances from the artificial samples.

Photonische Sensorik

Photonic Sensor Technologies

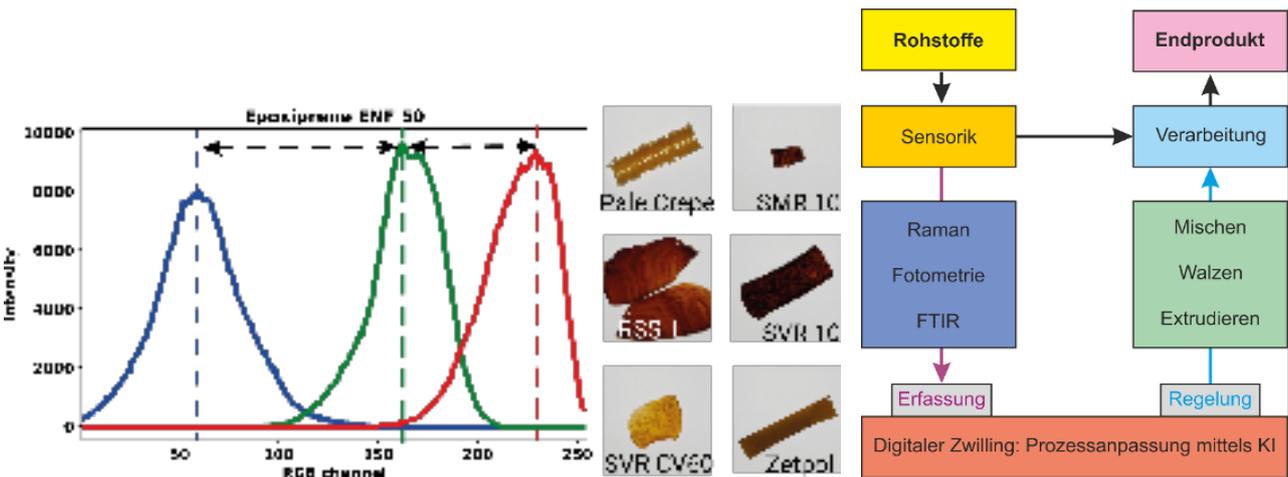
Digitalisierung der Qualitätskontrolle von Rohkautschuk

Da die Produktqualität in der Gummiverarbeitung von der Qualität der Rohstoffe und den Prozessparametern abhängt, ist dies ein idealer Bereich für die Anwendung von maschinellem Lernen. Die Korrelation von Daten aus verschiedenen spektroskopischen und photometrischen Verfahren erlaubt Vorhersagen über die Produktqualität aus einem „digitalen Zwilling“. Ziel ist die Qualitätssicherung durch Anpassung von Prozessparametern an die gegebenen Rohstoffeigenschaften. Dieses Vorhaben ist Teil der Plattform MaterialDigital, der eine besondere strategische Bedeutung für den Wirtschaftsstandort Deutschland bei der Digitalisierung von Materialien zukommt.

Am IFNANO werden mehrere sensorische Verfahren zur Charakterisierung der Rohstoffe angewandt und anschließend mit chemometrischen Methoden ausgewertet, wie z.B. einer linearen Diskriminanzanalyse. Zuerst werden von den Rohstoffen über ein standardisiertes Verfahren Proben genommen.

Digitizing the quality control of raw rubber

Since the product quality in rubber processing depends on the quality of the raw materials and the process parameters, this is an ideal area for the use of machine learning. The correlation of data from various spectroscopic and photometric methods allows predictions about the product quality from a "digital twin". The aim is quality assurance by adapting process parameters to the given raw material properties. This project is part of the Material Digital platform, which has special strategic importance for Germany in the digitization of materials. Several sensory methods for characterizing the raw materials are used at the IFNANO and then evaluated using chemometric methods, such as linear discriminatory analysis. First of all, the raw materials use a standardized process. These are first analyzed using a photometry based on their colors and the macroscopic structural features. The same samples are then examined using Raman and IR spectroscopy (ATR-FTIR).



▲ Fotometrische Bestimmung verschiedener Kautschuke. (Rechts) Fotos der standardisiert vorbereiteten Proben. (Links) Schematische Darstellung der spektralen Auswertung einer fotografischen Aufnahme.

Photometric determination of various rubbers. (right) Photos of the standardized prepared samples. (left) Schematic representation of the spectral evaluation of a photograph.

▲ Schematische Darstellung der automatisierten Prozesskontrolle durch das Konzept des digitalen Zwillinges.

Schematic representation of the automated process control through the concept of a digital twin.

Photonische Sensorik

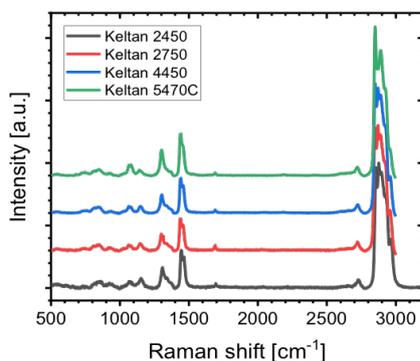
Photonic Sensor Technologies

Diese werden zunächst über eine Fotometrie anhand ihrer Farben und der makroskopischen strukturellen Merkmale analysiert. Anschließend werden die gleichen Proben mittels Raman- und IR-Spektroskopie (ATR-FTIR) untersucht. Sämtliche Daten werden vorbehandelt und mittels Datenreduktion und Chemometrie ausgewertet. Die erstellten chemometrischen Modelle sind bereits in der Lage, 46 verschiedene Kautschuke erfolgreich zu identifizieren. Im nächsten Schritt erfolgt eine Fusion der Sensordaten aller Methoden und dann werden die Ergebnisse in einer Datenbank zusammengefasst und dem Algorithmus des „digitalen Zwillings“ zur Verfügung gestellt.

Der Kooperationspartner Deutsches Institut für Kautschuktechnologie e.V. sorgt zusätzlich für makroskopische Sensordaten wie Mooney-Viskosität, Zugfestigkeit oder Schmelzpunkt des Produktes. Auch Prozessparameter wie Temperatur und Druck während der Verarbeitung werden erfasst. All diese Sensordaten werden einer Datenreduktion unterzogen und anschließend mit den Produkteigenschaften korreliert, um ein neuronales Netz für die aktive Prozesssteuerung zu trainieren.

Raman-Spektren verschiedener Keltane, bei denen die Unterschiede der Polymerstrukturen in den Spektren mit dem Auge kaum zu erkennen sind.

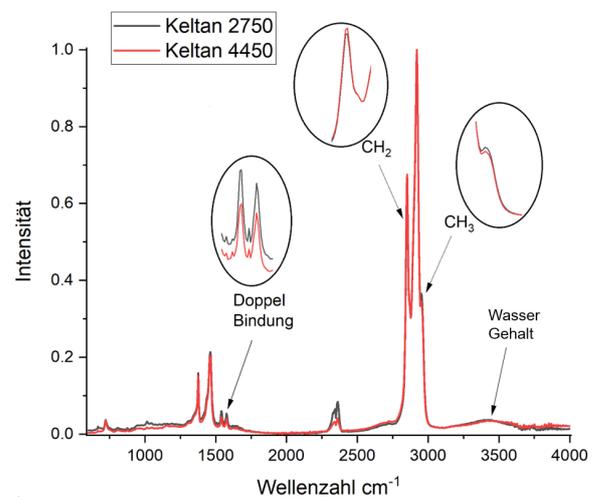
Raman spectra of different Keltans, in which the differences in the polymer structures in the spectra with the eye can hardly be seen



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

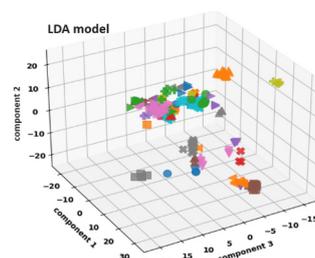
All data are pretreated and evaluated by data reduction and chemometry. The chemometric models created are already able to successfully identify 46 different rubber shots. In the next step, the sensor data of all methods will be fashioned and then the results are summarized in a database and provide the algorithm of the "digital twin".

Our partner Deutsches Institut für Kautschuktechnologie e.V. also ensures macroscopic sensor data such as the Mooney viscosity, tensile strength, or melting point of the product. Process parameters such as temperature and pressure during processing are also recorded. All of these sensor data are subjected to data reduction and then correlated with the product properties in order to train a neuronal network for active process control.



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

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

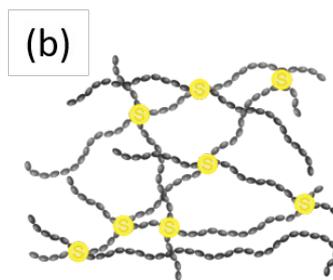
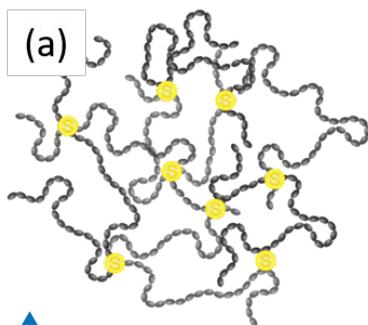


Photonische Sensorik

Photonic Sensor Technologies

Quantitative Bestimmung der Verteilungsgüte von Vernetzungschemikalien in Kautschukmischungen

Bei der Herstellung von Kautschukelastomeren ist die Vernetzung bzw. Vulkanisation ein entscheidender Schritt. Die Anzahl und Verteilung der Verknüpfungen der Polymerketten untereinander bestimmt die physikalischen Eigenschaften des Produktes, wie z.B. die Zugfestigkeit. Die Dichte und Homogenität dieser Verknüpfungen kann im Herstellungsprozess gezielt beeinflusst werden über die Verteilung und Konzentration von Vernetzungschemikalien wie Schwefel oder Zinkoxid.



Schematische Darstellung des Effekts der Schwefelverknüpfungen auf die Stabilität von Kautschukelastomeren: (a) Polymer ohne Einfluss äußerer Kräfte und (b) unter Zug entlang einer Richtung. Mechanische Zugkräfte werden durch die Verknüpfungen unter den Polymerketten übertragen und verteilt. (c) Foto des strukturellen Versagens eines Elastomerproduktes unter Zug durch mangelnde Verknüpfungen.

Schematic representation of the effect of sulfur linkages on the stability of rubber elastomers: (a) polymer unaffected by external forces and (b) under tension along one direction. Mechanical tensile forces are transmitted and distributed through the linkages among the polymer chains. (c) Photograph of structural failure of an elastomeric product under tension due to lack of connectivity.

Zur Qualitätskontrolle und Prozesssteuerung muss daher die Verteilungsgüte solcher Vernetzungschemikalien bestimmt werden. Leider absorbieren sowohl die Kautschukmischung als auch das fertige Produkt sichtbares Licht sehr stark und sind damit vielen etablierten spektroskopischen Methoden nicht zugänglich. Eine für diese Aufgabe gut geeignete Methode ist die Laserinduzierte Plasmaspektroskopie (LIBS, Laser Induced Breakdown Spectroscopy), eine schnelle Technik der chemischen Elementanalyse. Dabei wird ein energiereicher Laserpuls auf die Probenoberfläche fokussiert, um Material zu verdampfen und daraus ein Plasma zu erzeugen.

Quantitative determination of the distribution quality of cross-linking chemicals in rubber compounds

Cross-linking or vulcanization is a crucial step in the production of rubber elastomers. The number and distribution of the links between the polymer chains determines the physical properties of the product, such as tensile strength. The density and homogeneity of these links can be specifically influenced during the manufacturing process via the distribution and concentration of crosslinking chemicals such as sulfur or zinc oxide.

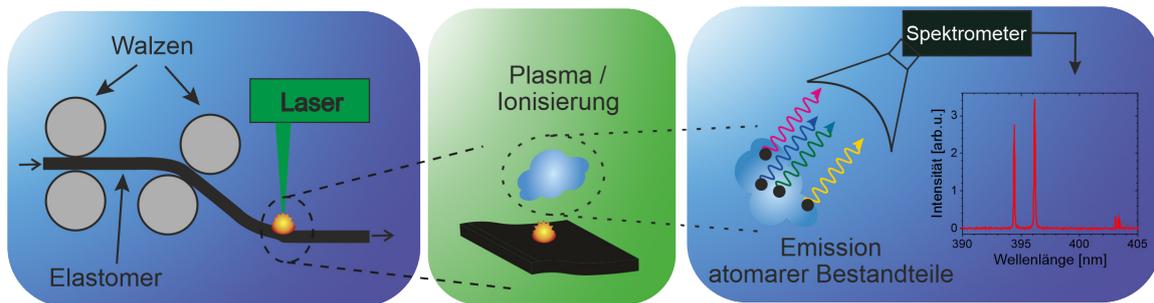
The distribution quality of such crosslinking chemicals must therefore be determined for quality control and process control. Unfortunately, both the rubber compound and the finished product absorb visible light very strongly and are therefore not accessible to many established spectroscopic methods. A method well suited for this task is laser-Induced breakdown Spectroscopy (LIBS), a rapid technique for chemical element analysis. A high-energy laser pulse is focused on the sample surface to vaporize material and generate a plasma from it. When this plasma cools down, element-specific emission lines are formed, which are analyzed spectroscopically.

Photonische Sensorik

Photonic Sensor Technologies

zeugen. Beim Abkühlen dieses Plasmas entstehen elementspezifische Emissionslinien, welche spektroskopisch analysiert werden. Die Größe der von LIBS beprobten Flächen ist dabei kleiner als 1 mm und erlaubt so durch Rastermessungen eine Verteilungsbestimmung von chemischen Elementen.

The size of the areas sampled by LIBS is less than 1 mm and thus allows the distribution of chemical elements to be determined by means of grid measurements.

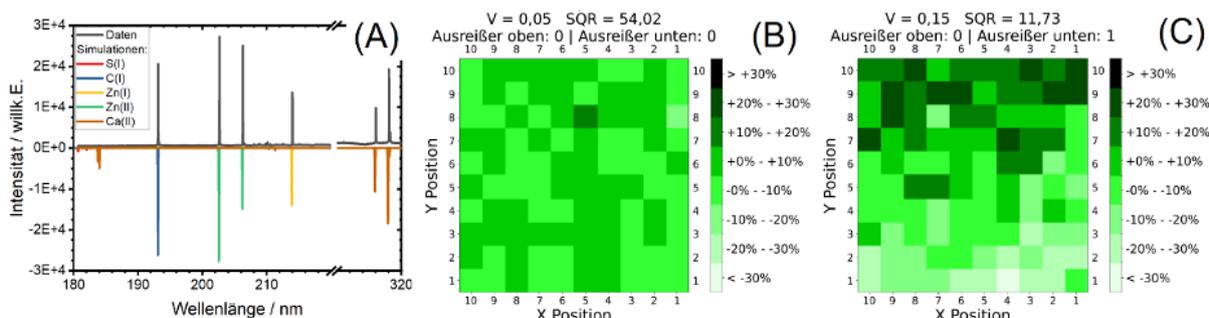


Schematische Darstellung des LIBS-Prinzips am Beispiel der Untersuchung von Kautschukelastomeren. Ein Laser verdampft einen kleinen Teil der Probe und erhitzt die entstehende Wolke bis zu einem Plasma. Beim Abkühlen der Plasmawolke emittieren die atomaren Bestandteile charakteristische Linien, welche mit einem Spektrometer erfasst und analysiert werden.

Schematic representation of the LIBS principle using the example of the investigation of rubber elastomers. A laser vaporizes a small portion of the sample and heats the resulting cloud into a plasma. As the plasma cloud cools, the atomic components emit characteristic lines, which are recorded and analyzed with a spectrometer.

Am IFNANO wird in Kooperation mit dem Deutschen Institut für Kautschuktechnologie e.V. (DIK) LIBS angewandt, um die Verteilungsgüte von Kautschukmischungen zu bestimmen. Um diese Messungen quantitativ und reproduzierbar zu ermöglichen, wurden in beiden Instituten kommerzielle LIBS-Aufbauten mit der Doppelpulstechnik erweitert. Dadurch wird die Emissionsintensität des Plasmas erhöht und die Untersuchung von Signalen mit niedriger Quanteneffizienz im Vakuum-UV-Bereich bis 180 nm ermöglicht. Zudem wurde eine Methode zur Bewertung der gemessenen Verteilungsgüten entwickelt.

At IFNANO, in collaboration with the German Institute for Rubber Technology, this method is used to measure the distribution quality of sulfur in rubber mixtures. In order to make these measurements quantitative and reproducible, commercial LIBS setups were expanded in both institutes. The integration of a second laser allows the use of double-pulse technology, which drastically increases the emission intensity of the plasma. This also enables the investigation of signals with low quantum efficiency, such as sulfur in the vacuum-UV range around 181 nm.



(A) Beispiel-Spektrum mit zugehöriger Simulation der Signale. (B) Verteilungskarte eines Probenkörpers mit hoher Homogenität. (C) Verteilungskarte eines Probenkörpers mit einem Konzentrationsgradienten.

(A) Example spectrum with the associated simulation of the signals. (B) Distribution card of a sample body with high homogeneity. (C) Distribution card of a sample body with a gradient of concentration.

Photonische Sensorik Photonic Sensor Technologies

Temperaturbestimmung an plasmonischen Metall-Nanopartikeln

Angesichts der Auswirkungen des Klimawandels und der zunehmenden Umweltverschmutzung gewinnt die Gasanalytik im industriellen und Umweltsektor an enormer Bedeutung. Um eine emissionsneutrale Industrie zu realisieren, ist die Optimierung, Überwachung und möglicherweise Neugestaltung von Arbeitsprozessen von entscheidender Bedeutung. Ein bedeutender Schritt in Richtung einer umweltfreundlichen Industrie ist die Verwendung von grünem Wasserstoff als Ersatz für fossile Brennstoffe. Die Herstellung von grünem H₂ kann beispielsweise durch plasmonenunterstützte Photokatalyse erfolgen. Bei diesem Verfahren erzeugen metallische Nanopartikel plasmonische Schwingungen und lokale elektrische Felder durch die Einwirkung von Laserstrahlung. Diese dienen wiederum als Katalysator für chemische Reaktionen. Die effiziente Gestaltung dieses H₂-Erzeugungsprozesses erfordert ein genaues Verständnis der Reaktionstemperatur.

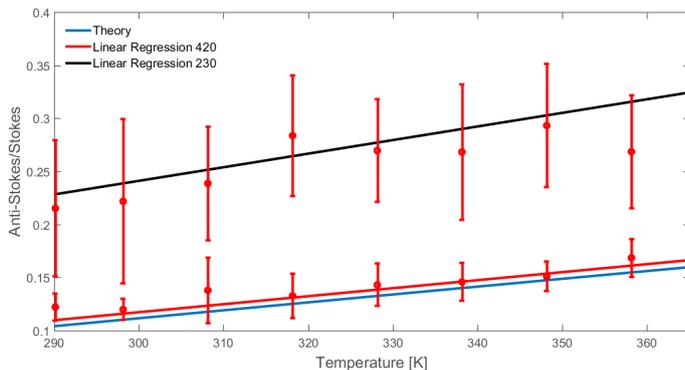
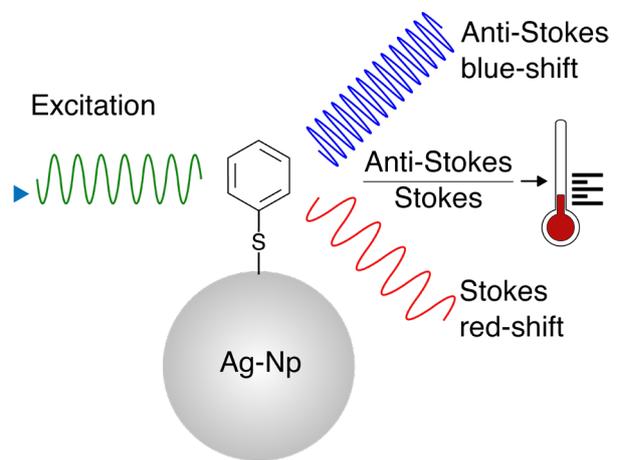
Schematische Darstellung des am Nanopartikel gebundenen Moleküls. Aus der Ramanstreuung lässt sich die Temperatur des Teilchens ermitteln.

Schematic representation of the molecule bound to the nanoparticle. The temperature of the particle can be determined from the Raman scattering.

Thermometry of plasmonic metal nanoparticles

In view of the effects of climate change and increasing environmental pollution, gas analysis is gaining enormous importance in the environmental and industrial sectors. In order to realize an emission-neutral industry, the optimization, monitoring and possibly redesign of work processes is crucial.

A significant step towards an environmentally friendly industry is the use of green hydrogen as a substitute for fossil fuels. Green H₂ can be produced, for example, by plasmon-assisted photocatalysis. In this process, metallic nanoparticles generate plasmonic oscillations and local electric fields through the effect of laser radiation. These in turn serve as a catalyst for chemical reactions. The efficient design of this H₂ generation process requires a precise understanding of the reaction temperature.



◀ Anti-Stokes/Stokes-Verhältnis bei verschiedenen Temperaturen und für zwei verschiedene Schwingungen von Thiophenol auf Silbernanostrukturen. Abhängig von der Plasmonik werden Stokes und Anti-Stokes unterschiedlich verstärkt. Anti-Stokes/Stokes ratio at different temperatures and for two different vibrations of thiophenol on silver nanostructures. Depending on the plasmonics, Stokes and anti-Stokes are reinforced differently.

Photonische Sensorik

Photonic Sensor Technologies

Optische Verfahren bieten sich als nichtinvasive Methode zur Temperaturbestimmung an. Insbesondere die Raman-Spektroskopie ermöglicht die Messung der Temperatur des Analyten, während die Fluoreszenzspektroskopie die Temperatur der Nanopartikel misst. Hierbei kommt ein speziell angefertigtes konfokales Raman-Mikroskop zum Einsatz, um die Temperatur räumlich zu bestimmen.

Während bei der Raman-Spektroskopie das Verhältnis der blauverschobenen (Anti-Stokes) zur rotverschobenen (Stokes) Ramanstreuung genutzt wird, ermöglicht die Fluoreszenzspektroskopie die Verwendung der Anti-Stokes-Lumineszenz zur Temperaturbestimmung. Diese beiden Methoden können anschließend zur Korrelation zwischen dem Analyten und den Nanopartikeln verwendet werden. In ersten Versuchen dienen starke Ramanstrahler wie Thiole oder Farbstoffe anstelle von H_2 zur Bestimmung dieser Korrelation.

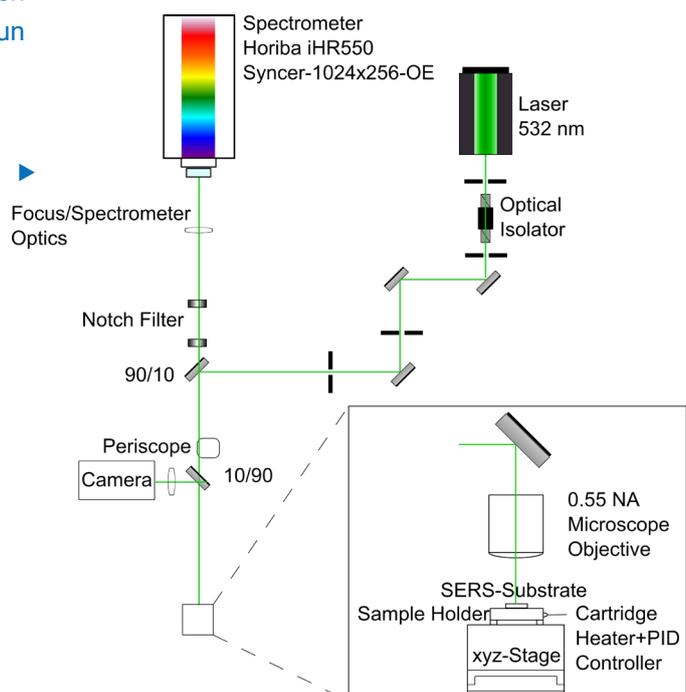
Des Weiteren dienen diese Temperaturmessungen dazu, gemeinsam mit unserem Partner von der Ben-Gurion-Universität in Israel, eine theoretische Beschreibung der Temperaturfunktion von Metall-Nanopartikeln zu entwickeln und einen Leitfaden zur Anwendung dieser Partikel für die plasmonenunterstützte Photokatalyse zu erstellen.

Schematischer Aufbau eines konfokalen Raman-Mikroskops zur Messung der Photolumineszenz der Nanopartikel und der Ramansignale.
Schematic setup for the confocal microscopy setup for the measurement of the Raman signal and the photoluminescence of nanoparticles.

Optical methods are a noninvasive method for temperature determination. Raman spectroscopy in particular enables the temperature of the analyte to be measured, while fluorescence spectroscopy measures the temperature of the nanoparticles. A specially designed confocal Raman microscope is used to determine the temperature spatially.

While Raman spectroscopy uses the ratio of blue-shifted (anti-Stokes) to red-shifted (Stokes) Raman scattering, fluorescence spectroscopy makes it possible to use anti-Stokes luminescence to determine the temperature. These two methods can then be used to correlate the analyte and the nanoparticles. In initial experiments, strong Raman emitters such as thiols or dyes are used instead of H_2 to determine this correlation.

Furthermore, these temperature measurements are used to develop a theoretical description of the temperature function of metal nanoparticles together with our partner from Ben-Gurion University in Israel and to create a guideline for the application of these particles for plasmon-assisted photocatalysis.



Photonische Sensorik

Photonic Sensor Technologies

Sensorik zur Verbesserung der Patientensicherheit

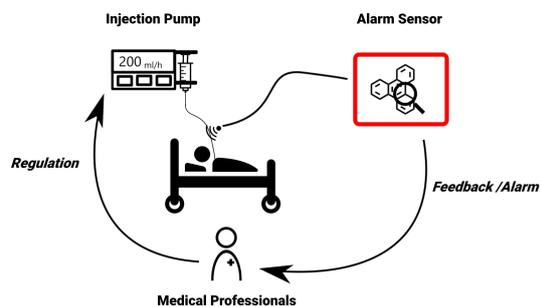
Fehlmedikationen verursachen weltweit jedes Jahr Millionen von Komplikationen und stellen ein signifikantes Risiko für die Patientensicherheit dar. Abschätzungen zufolge sind 5 % von mehr als 600 Millionen in Europa jedes Jahr intravenös an Patienten verabreichten Infusionen fehlerbehaftet, was in Summe 30 Millionen Fehlmedikationen entspricht. Es gibt unterschiedliche Kontrollsysteme auf dem Markt, um fehlerhafte Medikationen zu vermeiden, jedoch ist keines in der Lage, die chemische Zusammensetzung zu überwachen. Die große Herausforderung besteht in der Bandbreite der Verabreichungen, die von einfachen Elektrolytlösungen über sehr niedrig dosierte Katecholamine bis zu recht hoch konzentrierten Glukoselösungen reichen. Schließlich werden Mischungen aus Trägerlösungen, Elektrolyten und weiteren Arzneimitteln verabreicht. Dazu wurde am IFNANO ein System auf der Basis von Brechungsindex, Absorption und Raman-Streuung entwickelt, welches die Medikationen anhand ihrer physikalisch-chemischen Eigenschaften schnell identifizieren kann, um die Sicherheit im Krankenhaus zu erhöhen und dem Krankenhauspersonal die Arbeit auf der Intensivstation zu erleichtern.



Foto einer Patientin, angeschlossen an diversen Überwachungs- und Medikationssystemen.
Photograph of a patient, connected to several monitoring and medication systems.

Sensor technology to improve patient safety

Medication errors cause millions of complications worldwide every year and pose a significant risk to patient safety. Estimates suggest that 5 % of the more than 600 million infusions administered intravenously to patients in Europe each year are flawed, totaling 30 million medication errors. There are various control systems on the market to prevent erroneous medications, but none are capable of monitoring the chemical composition. The major challenge lies in the range of administrations, which vary from simple electrolyte solutions to very low-dosed catecholamines, and fairly concentrated glucose solutions. Finally, mixtures of carrier solutions, electrolytes, and other drugs are administered. To address this, a system based on refractive index, absorption, and Raman scattering has been developed at IFNANO, which can quickly identify medications based on their physical-chemical properties.



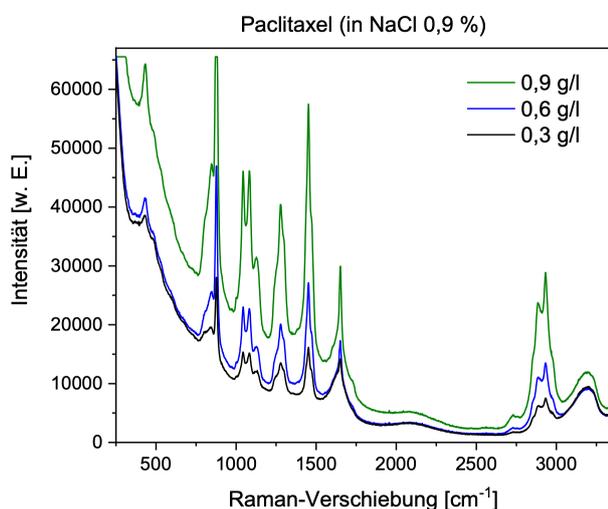
Schematische Darstellung der überwachten Infusionsvergabe. Die Medikamentenvergabe wird direkt vor dem Patienten geprüft und gegebenenfalls wird ein Alarm ausgelöst.
Schematic representation of monitored infusion administration. The administration of medication is checked directly in front of the patient and an alarm is triggered if necessary.

Photonische Sensorik

Photonic Sensor Technologies

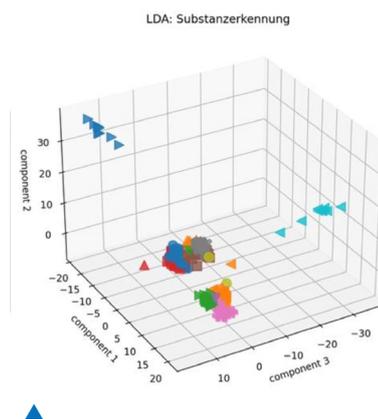
Ein besonderes Augenmerk liegt auf der Medikamentengruppe der Zytostatika, bei denen Fehlmedikationen sowohl ökonomisch als auch gesundheitlich sehr kritische Auswirkungen haben können.

In Zusammenarbeit mit der Krankenhausapotheke der Universitätsmedizin Mainz wurden deshalb Zytostatika aus unterschiedlichen Klassen ausgewählt und hinsichtlich ihrer qualitativen und quantitativen Unterscheidbarkeit analysiert. Die Refraktometrie liefert hier sehr genaue Informationen bezüglich der Konzentration von bekannten Lösungen, wohingegen die Raman-Spektroskopie zur Identifikation der Zytostatika und ebenfalls zur Konzentrationsbestimmung eingesetzt wird. Basierend auf diesen Daten wurde ein Algorithmus entwickelt, welcher die Identifizierung von Infusionen durch einen Vergleich mit einer Datenbank ermöglicht. Dieser Ansatz kann für eine detaillierte und automatisierte Dokumentation in Krankenhäusern genutzt werden. Mit der gesamten vorhandenen Raman-Datenbasis hat sich für die Einzelbestimmung entweder der Trägerlösung oder der Wirkstoffe die lineare Diskriminanzanalyse als sehr geeignet herausgestellt. Für eine parallele Bestimmung beider Eigenschaften lieferte ein Decision-Tree-Algorithmus in 99 % der Fälle eine korrekte Vorhersage. Das Ziel ist die Entwicklung eines integrierten Gerätes, um schließlich die Sicherheit der Patienten zu erhöhen.



Special attention is paid to the group of cytostatics, where medication errors can have both economically and health-wise very critical impacts.

Therefore, in collaboration with the hospital pharmacy of the University Medical Center Mainz, cytostatics from different classes were selected and analyzed for their qualitative and quantitative distinguishability. Refractometry provides very accurate information regarding the concentration of known solutions, while Raman spectroscopy is used for the identification of cytostatics and for concentration determination. Based on these data, an algorithm was developed which allows the identification of infusions by comparing them with a database. This approach can be used for detailed and automated documentation in hospitals. With the entire available Raman database, linear discriminant analysis proved to be very suitable for the individual determination of either the carrier solution or the active ingredients. For parallel determination of both properties, a decision tree algorithm provided a correct prediction in 99% of the cases. The goal is to develop an integrated device to increase patient safety.



Substanzerkennung nach linearer Diskriminanzanalyse (LDA).
Substance recognition after linear discriminance analysis (LDA).

Konzentrationsabhängige Raman-Spektren des Medikamentes Paclitaxel.
Concentration-dependent Raman spectra of Paclitaxel.

Photonische Sensorik

Photonic Sensor Technologies

Schnelle optische Messung der Glasspannung in drei Dimensionen

In vielen Bereichen ist Glas ein unverzichtbarer Produktbestandteil. An Produkte von Displays über Fenster bis hin zu Sicherheitsglas werden heute hohe Ansprüche an die Eigenschaften und Qualität gestellt. Die Anforderungen an beispielsweise Windschutzscheiben reichen heute von Sicherheitsaspekten bis hin zu Beheizbarkeit und eingebauten Assistenzsystemen. Daher erhöhen sich auch die Anforderungen an die Spannungsbelastung und die Vorspannungsgenauigkeit bei der Herstellung. 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 nichtinvasive optische Methode zur Messung der Eigenspannung von Fahrzeugverglasungen zu entwickeln.



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

Fast optical measurement of glass tension in three dimensions

In many areas, glass is an essential product component. Today, there are high demands on the properties and quality of products like displays, windows, and safety glass. The requirements on for example automotive windshields range from safety aspects to heating of the panes and integrated assist system. Thus, the requirements on the stress loads and the accuracy of the built-in glass tension also increase. Therefore, the precise determination of the glass stress as an inline process of the production is crucial for resource-conservation by preventing glass breakage and avoiding manufacturing errors.

The state of the technology of available measurement devices suffers a lack of feasibility, handling, and accuracy, especially considering automated measurements of stress in glass. Therefore, a network with Schmidt & Haensch, Saint-Gobain Sekurit, and VW has been formed for this project. The project's goal is to develop a noninvasive optical method for measuring the residual stress of vehicle glazing.

For the measurement, the polarization properties of light should be used. The polarization state of the light reflected or backscattered by the glass pane is influenced by the prevailing tension in the glass. The extremely precise measurement of the polarization enables the tension of the glass to be determined without contact.

For the polarimetric measurements several variations of the initial polarization and the detection of the outgoing polarization are possible. Three methods have been examined and delivered a validation of the methodology by similar results of all three methods for the reflection on the pane's backside, corresponding to passing the material twice.

The determination of the resolution of the method for measuring the mechanical stress in glass is enabled by a spring force driven pressurizing device, whereby external stress can be applied to the pane.

Photonische Sensorik

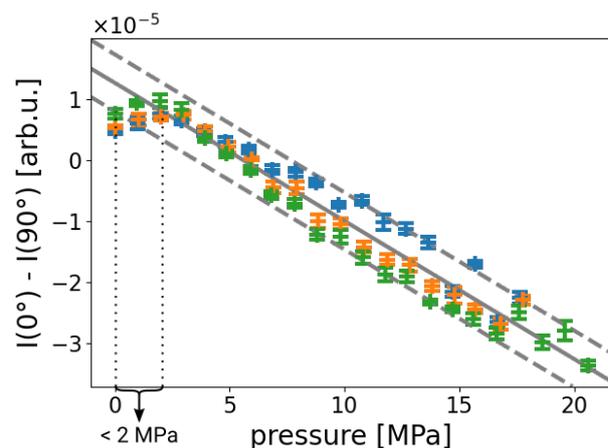
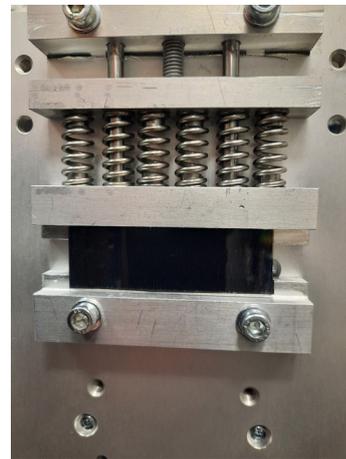
Photonic Sensor Technologies

Zur Messung sollen hierbei die Polarisations-eigenschaften des Lichtes ausgenutzt werden. Der Polarisationszustand des von der Glasscheibe reflektierten oder rückgestreuten Lichtes wird dabei von der vorherrschenden Spannung im Glas beeinflusst. Die höchstpräzise Messung der Polarisation ermöglicht so, kontaktlos die Spannung des Glases zu bestimmen.

Für die polarimetrischen Messungen können verschiedene Varianten der Eingangspolarisation und Messung der Ausgangspolarisation verwendet werden. Drei Methoden sind dabei getestet worden und haben für die Reflexion an der Scheibenseite, also den zweimaligen Materialdurchgang, bereits ähnliche Ergebnisse und somit eine Validierung der Methodik geliefert.

Die Bestimmung des Auflösungsvermögens der Methode zur Messung mechanischer Spannung im Glas 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 Polarisations-signal gemessen werden. Bei wiederholten Messungen zeigt sich, dass unter Beachtung der Fehleranfälligkeit der Spannvorrichtung eine Messgenauigkeit unter 2 MPa zu erwarten ist. Mittels der Spannvorrichtung können jetzt weitere Messungen in verschiedenen Raumrichtungen eine Datenbasis für die Quantisierung der Methode schaffen, um tatsächliche Spannungswerte an beliebigen Proben messen zu können.

Thereby, the polarization signal can be measured for an applied stress along a certain orientation. Repeated measurements show an expected uncertainty for the measurements below 2 MPa including effects of the error-prone pressurizing device. Using the pressurizing device, further measurements in different stress orientations will deliver a data-base for the quantification of the method to be able to measure actual stress values on any sample.



Oben: Spannvorrichtung zum Anlegen externer mechanischer Druckspannungen auf das Probeobjekt entlang einer Raumrichtung über die Federkraft von sechs mit einer Schraube gespannten Federn. Unten: Auftragung von drei Wiederholmessungen der ersten Stokes-Vektorkomponente gegen die angelegte externe Druckspannung auf eine Floatglasscheibe. Es zeigt sich eine mittlere Abweichung vom linearen Zusammenhang von unter 2 MPa.

Top: Tension device for creating external mechanical pressure voltages on the trial object along a spatial direction over the spring force of six springs tensioned with a screw. Bottom: Development of three repeat measurements of the first Stokes vector component against the external pressure voltage on a float glass pane. An average deviation from the linear connection of less than 2 MPa is visible.

Photonische Sensorik

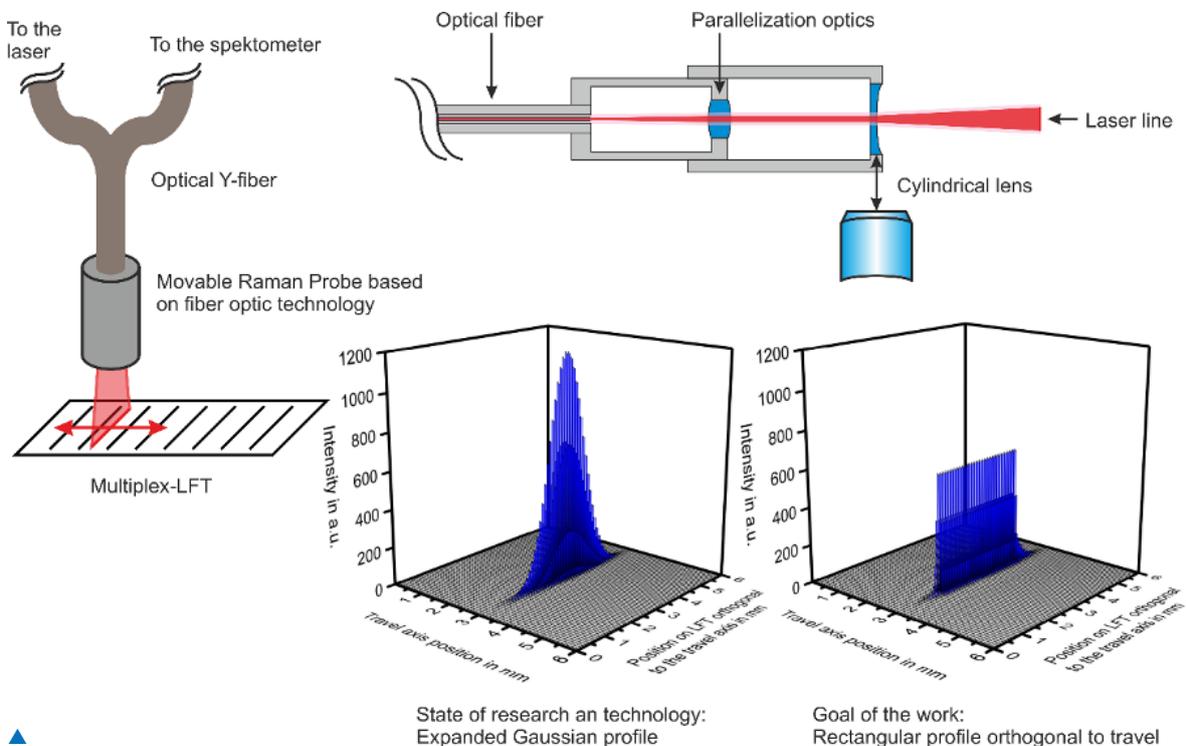
Photonic Sensor Technologies

Multiplex-POC-Tests für die Tiermedizin

In dem Südniedersachsen Point-of-Care-Cluster (SNIPOCC) sollen innovative analytische Schnelltests mit deutlich über den Stand der Technik hinausgehenden Produktkonzepten und Funktionalitäten für die Bereiche Veterinärmedizin und Humanmedizin (= Point of care (POC)-Tests) sowie Forensik, Umwelt- und Gefahrstoffanalytik entwickelt werden. Das IFNANO steuert hierfür Auslesetechnologien für Lateralflusstests (LFT) auf Basis der Raman-Spektroskopie bei. Ein weiterer Forschungsbereich sind papierbasierte Metallionentests auf Basis von Farbindikatoren (Indikatorstreifen). Hierfür wird eine kamerabasierte Auslesetechnologie erforscht. Weiterhin wird untersucht, ob die laserinduzierte Plasmaspektroskopie als Methode zum direkten Metallionennachweis die Indikator-Technologie ersetzen kann.

Multiplex lateral POC tests for veterinary medicine

Within the South Lower Saxony Point-of-Care-Cluster (SNIPOCC), innovative analytical rapid tests are to be developed with product concepts and functionalities that go well beyond the state of the art for the areas of veterinary medicine and human medicine (= point of care (POC) tests) as well as forensics, and environmental and hazardous substance analysis. The IFNANO contributes readout technologies for lateral flow tests (LFT) based on Raman spectroscopy. Another area of research is paper-based metal ion tests based on color indicators (indicator strips). For this purpose, a camera-based readout technology is explored. Finally, it should also be researched whether laser-induced plasma spectroscopy can replace indicator technology as a method for direct metal ion detection.



Aufbau einer Raman-Sonde für das Auslesen von Lateral Flow Tests mit dem resultierenden Gauß-Strahlprofil und zum Vergleich dem zu erarbeitenden Rechteck-Profil.

Construction of a Raman probe for reading out lateral flow tests with the resulting Gaussian beam profile and for comparison with the rectangular profile to be developed.

Photonische Sensorik

Photonic Sensor Technologies

Schnelltests sind ein probates Mittel zur Zeitersparnis in der Diagnostik und können helfen, eine zielgerichtete Behandlung frühzeitig einzuleiten. Dies gilt insbesondere in der Tiermedizin, da hier die Laboranalytik oft zu teuer ist, falls überhaupt Kapazitäten verfügbar sind. Daher konzentrieren sich die Forschungsarbeiten auf folgende veterinärmedizinische Fragestellungen:

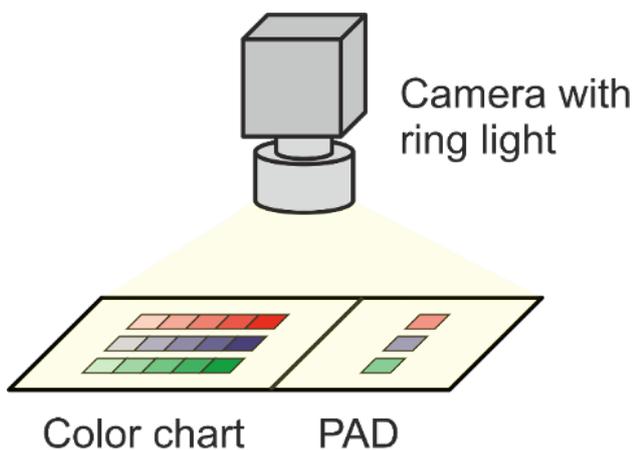
1. Kann anhand des qualitativen Nachweises von Interleukin 8, dessen Rezeptor und Procalcitonin in Blut mittels eines Multiplex-LFT eine valide Aussage über die Gesundheit von Hunden getroffen werden?
2. Kann anhand der Bestimmung von Eisen-, Kupfer- und Zinkionen im Blut von Rindern auf deren Fruchtbarkeit mittels eines papierbasierten Tests getroffen werden.

Die Forschungsarbeiten erfolgen im Verbund mit der miprolab GmbH (Göttingen) und dem Tierärztliches Institut Universität Göttingen.

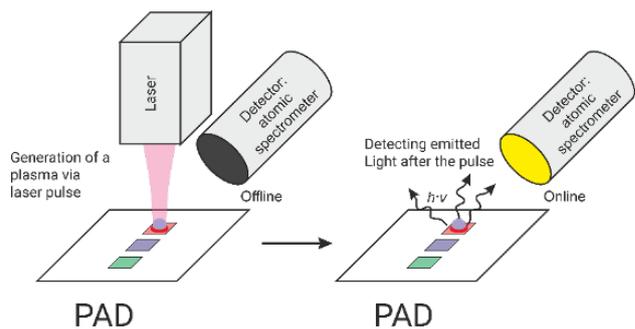
Rapid tests are a proven means of saving time in diagnostics and can help to initiate targeted treatment at an early stage. This applies in particular to veterinary medicine, since laboratory analysis is often too expensive here, if capacities are available at all. Therefore, the research work concentrates on the following veterinary questions:

1. Can a valid statement about the health of dogs be made on the basis of the qualitative detection of interleukin 8, its receptor, and procalcitonin in blood using a multiplex LFT?
2. Is it possible to determine the fertility of cattle by testing their blood using a paper-based test for iron, copper, and zinc ions?

The research work is carried out in association with miprolab GmbH (Göttingen) and the Veterinary Institute at the University of Göttingen.



▲ Aufbau einer Apparatur für die Bestimmung von Metallionen mittels eines papierbasierten analytischen Tests (PAD) basierend auf Bildanalysetechnik.
Construction of an apparatus for the determination of metal ions using a paper-based analytical device (PAD) based on image analysis technology.



▲ LIBS als alternative Detektionstechnik zur photometrischen Bildanalyse.
LIBS as an alternative detection technique to photometric image analysis.

Photonische Sensorik

Photonic Sensor Technologies

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

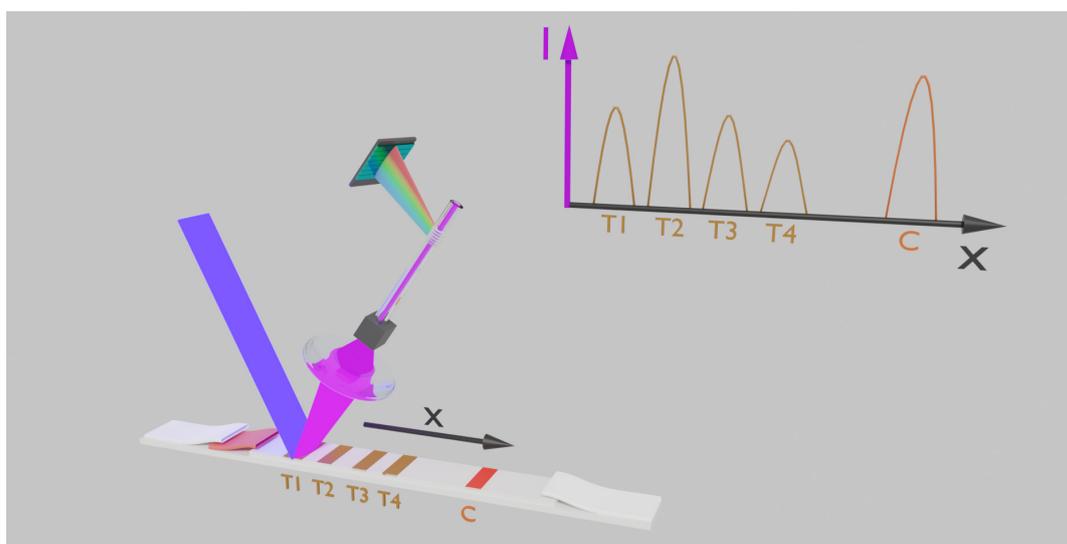
Schnelltests sind ein diagnostisches Mittel, mit dessen Hilfe eine schnelle Einschätzung über z.B. den gesundheitlichen Zustand eines Patienten getroffen werden kann. Das regionale Bündnis SNIPOCC aus industriellen und akademischen Partnern hat sich zum Ziel gesetzt, die zurzeit existierenden Schnelltests deutlich zu verbessern hinsichtlich deren Produktion und ihrer Funktionalität, um die Region Südniedersachsen und speziell Göttingen zu einem Hotspot für die Entwicklung diagnostischer Schnelltests zu machen. Um das Ziel zu erreichen, sollen die Limitierungen der Schnelltests, wie z.B. nur qualitative Auslesung, kaum Multiparameteranalyse und kaum Digitalisierung, angegangen werden.

Das IFNANO wird dabei zum einen eine neuartige Auslesemethode auf Basis der Fluoreszenzspektroskopie entwickeln und in Kooperation mit dem Projektpartner FiSens GmbH eine Ausleseeinheit entwickeln und bauen, die einen Schnelltest qualitativ und quantitativ auswerten kann und die Daten digital bereitstellt.

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

Lateral flow tests (LFTs) are a diagnostic instrument that can be used to make a quick assessment of, e.g. the health of a patient. The regional alliance SNIPOCC, consisting of industrial and academic partners, has set itself the goal of improving the lateral flow tests that are currently on the market with regard to their production and functionality, in order to make the region of southern Lower Saxony and especially Göttingen a hot spot for the development of diagnostic rapid tests. In order to achieve the goal, the limitations of the LFTs, such as only qualitative readings, hardly any multiparameter analysis, and hardly any digitization shall be tackled.

On the one hand, the IFNANO will develop a new kind of reader on the basis of fluorescence spectroscopy. In collaboration with project partner FiSens GmbH, we will develop and build such a reader, which will be able to evaluate a LFT not only qualitatively but also quantitatively and furthermore provide the data digitally.



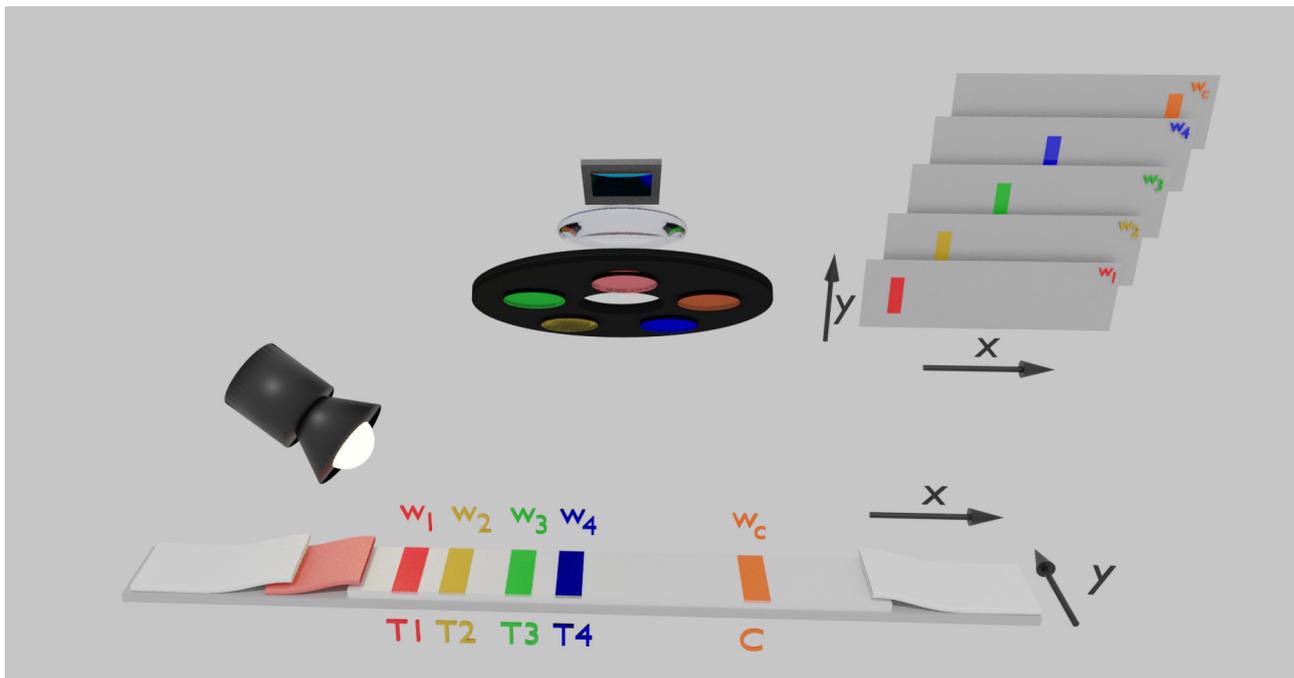
Schematische Darstellung des zu entwickelnden Fluoreszenz-Readers. Der Teststreifen wird unter die streifenförmige Anregung gescannt. Das Fluoreszenzsignal wird eingefangen und durch ein Faser-Bragg-Spektrometer analysiert.
Schematic representation of the fluorescence reader to be developed. The test strip is scanned with a line illumination. The fluorescence signal is captured and analyzed by a fiber-Bragg-grating spectrometer.

Photonische Sensorik

Photonic Sensor Technologies

Das Gerät soll dabei klein und kostengünstig sein, um am Markt angenommen zu werden. Ein weiteres Projektziel ist die Entwicklung eines neuartigen Ausleseverfahrens, eines sogenannten lateral-flow-tests (LFT) auf Basis der hyperspektralen Datenaufnahme. Hiermit wird das Multiplexing möglich werden und damit eine gleichzeitige Bestimmung von mehreren Analyten auf einem Test erlauben. Letzteres ist ein fundamentaler Fortschritt, da somit die quantitative Bestimmung z.B. mehrerer Krankheitserreger mit einer Messung ermöglicht wird.

The device will be small and inexpensive so as to be accepted on the market. Another project goal is the development of a new way of reading LFT processes based on the hyperspectral data recording. This will enable multiplexing and thus allow a simultaneous determination of several analytes on a test. The latter is fundamental progress, since the quantitative determination, e.g. several pathogens, will be made possible with a single measurement.



Schematischer Aufbau eines hyperspektralen Fluoreszenz-Readers. Der Teststreifen wird dabei komplett abgebildet und mit Hilfe eines dispersiven Elements (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

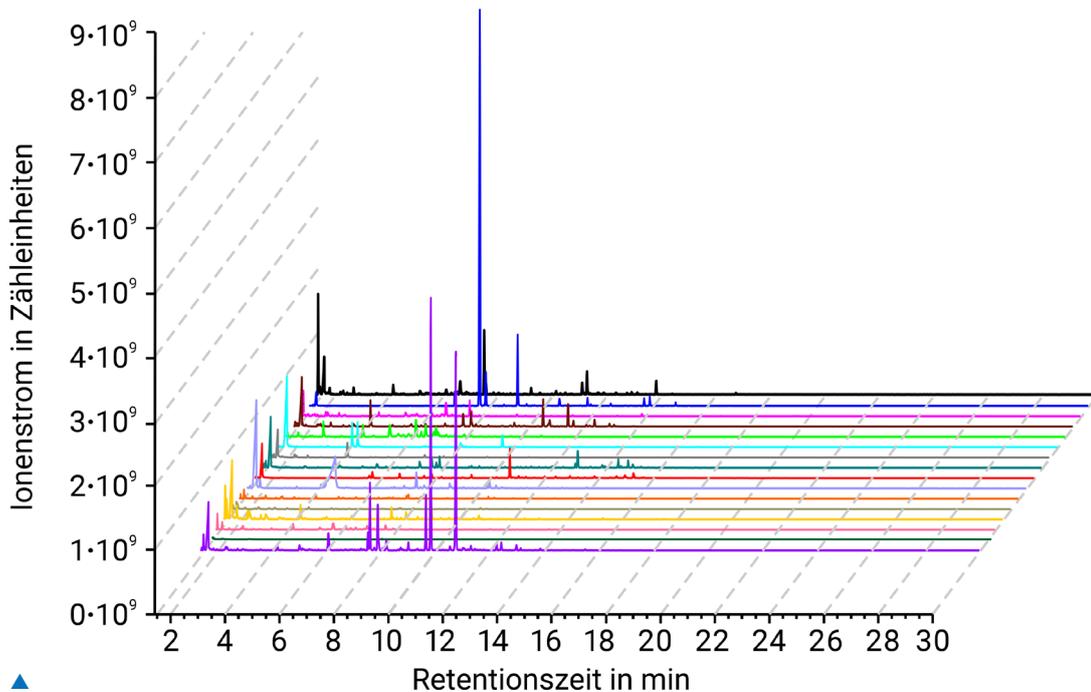
Photonic Sensor Technologies

Inaktivierung von Mikroorganismen auf Schüttgütern

Hersteller und Lieferanten von Kräutern, Tees und Gewürzen auf natürlicher Basis, also sogenannten Bioprodukten, kämpfen vielfach mit Kontaminationen durch Kleinst- oder Mikroorganismen, wie Pilze, Bakterien oder Milben. Diese unerwünschten Organismen schädigen die Qualität der Produkte und stellen eine Gesundheitsgefahr für den Endkunden sowie eine Reduzierung der Lagerfähigkeit dar. Die gilt insbesondere wenn es zur Vermehrung kommt. Eine Reduzierung dieser Organismen kann Abhilfe schaffen. Die bisher angewandten Methoden wie Wasserdampf- oder CO₂-Behandlung sind unzureichend oder nicht geeignet. Kompatibel für Naturrohstoffe ist die Inaktivierung durch UV-Licht oder der noch wenig erforschte Einsatz von Plasmen.

Inactivation of microorganisms on bulk materials

Manufacturers and suppliers of herbs, teas, and spices on a natural basis, i.e. so-called organic products, often struggle with contamination from small or microorganisms such as fungi, bacteria, or mites. These undesirable organisms damage the quality of the products and represent a health risk for the end customer and a reduction in the durability. This applies in particular if there is a multiplication. A reduction in these organisms can help. The methods used so far, such as water vapor or CO₂ treatment, are inadequate or not suitable. Compatible for natural raw materials is inactivation through UV light or the still less researched use of plasma.



▲ GC-MS-Chromatogramme verschiedener Naturstoffe. Die einzelnen Stoffe können unterschieden werden.
GC-MS chromatograms of various natural substances. The individual substances can be distinguished.

Photonische Sensorik

Photonic Sensor Technologies

Die Reaktionsmechanismen, die bei einer derartigen Inaktivierung in Zusammenhang mit organischen Substanzen vorhanden sind, sind zwar in Teilen bekannt, aber die konkrete Auswirkung auf die Produkte nicht.

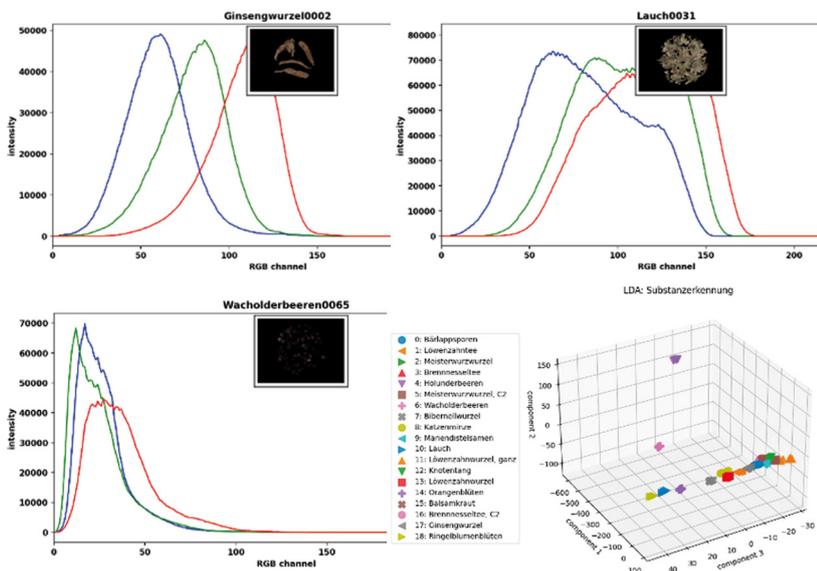
Hier setzt ein Projekt an, bei dem das IFNANO für die Untersuchung von derartigen Bioprodukten vor und nach einer Deaktivierung der Mikroorganismen durch Plasma oder UV-Strahlung verantwortlich ist. Zum Einsatz kommen gaschromatographische Techniken sowie Halbleitersensoren, die das Ausgasverhalten der Bioprodukte beschreiben können. Zusätzlich werden fotografische Verfahren bis hin zur Hyperspektralanalyse eingesetzt werden.

The reaction mechanisms that are present in such an inactivation in connection with organic substances are known to some extent, but not the specific impact on the products.

This is where the project comes in, in which IFNANO is responsible for examining such organic products before and after deactivating the microorganisms using plasma or UV radiation. Gaschromatographic techniques and semiconductor sensors are used, which can describe the outgas behavior of the organic products. In addition, photographic methods including hyperspectral analysis will be used.



Fotos von Ginseng-Wurzel (links), Lauch (Mitte) und Wacholderbeeren (rechts).
Photographs of ginseng root (left), leek (middle) and juniper berries (right).



Histogramme der RGB-Kanäle von Ginseng-Wurzel (oben links), Lauch (oben rechts) und Wacholderbeeren (unten links). Unten rechts ist eine Darstellung der Klassifizierungsleistung der linearen Diskriminanzanalyse (LDA) für alle analysierten Naturrohstoffe zu sehen. Histograms of the RGB channels from Ginseng root (top left), leek (top right), and juniper berries (bottom left). A representation of the linear discriminant analysis (LDA) classification performance can be seen for all analyzed natural raw materials.

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 FEL Focus:

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

Projekt GlassPrint:

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

Projekt KauLIBS:

Erweiterte Messtechnik zur sicheren und reproduzierbaren Detektion der Verteilungsgüte von Vernetzungschemikalien in Kautschukmischungen,
gefördert vom BMWi im Rahmen der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF)

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 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

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 NanoTherm:

High resolution correlative thermometry,
gefördert aus Mitteln des Niedersächsischen Vorab, Ausschreibung Forschungskooperation Niedersachsen-Israel

Projekte

Projects

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 PaSiReRa:

Weiterentwicklung und Validierung einer Analysevorrichtung zur Überwachung von Infusionslösungen und anderen Medikationen auf Grundlage der Ramanspektroskopie und der Refraktometrie, gefördert WIPANO des BMWi Öffentliche Forschung – Weiterentwicklung von Erfindungen

Projekt PikolaS:

Pikosekundenlasergestützte Strahlquelle für die EUV-Messtechnik, gefördert vom BMWi (ZIM),

Projekt PhotoPlasma:

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

Projekt ProWave:

Propagation partiell kohärenter Strahlung von FELs basierend auf Hartmann-Wellenfrontmessungen, gefördert vom BMBF

Projekt PURPLE:

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

Projekt QPhot:

Räumlicher Lichtmodulator (SLM) für die Freistrahkommunikation bei 2,1 µm Wellenlänge inkl. Kodierung von Lichtpulsen über den Bahndrehimpuls (OAM), gefördert vom BMWi (ZIM)

Projekt Ra_Nerv:

Exploring advanced Raman microscopy as a tool to Localize and Quantify Metabolites in Neural tissue, gefördert von der VolkswagenStiftung

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

Projekte / Publikationen

Projects / Publications

Projekt SiKoPla:

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

Projekt TITULUS:

Translation der Interferenzenebene zur diffraktiven Beschriftung mit ultrakurzen Laserpulsen bei unebenen Werkstückflächen, gefördert vom BMWK (WIPANO - Wissens- und Technologietransfer durch Patente und Normen)

Projekt ToxAR:

Analyse von Senfgas unter Berücksichtigung eines 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-Modell für die Analyse von SMLM-Daten, gefördert vom BMWK (ZIM)

Projekt WIPANO GlasForm:

Lasergestützte Glasbehandlung zur Formkorrektur von Substraten, gefördert vom BMWK (WIPANO - Wissens- und Technologietransfer durch Patente und Normen)

O. Laitenberger, T. Aspelmeier, T. Staudt, C. Geisler, A. Munk, A. Egner:

Towards Unbiased Fluorophore Counting in Super-resolution Fluorescence Microscopy, *Nanomaterials* 13(3), 459 (2023)

P. Jain, C. Geisler, D. Leitz, V. Udachin, S. Nagorny, T. Weingartz, J. Adams, A. Schmidt, C. Rembe, A. Egner:

Super-resolution Reflection Microscopy via Absorbance Modulation, *ACS Nanoscience AU* 3 (5), 375-380 (2023)

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

Endogenous BAX and BAK form mosaic rings of variable size and composition on apoptotic mitochondria (Preprint), *bioRxiv* (2023), <https://doi.org/10.1101/2023.08.18.553869>

T. Stephan, S. Stoldt, M. Barbot, T.D. Carney, F. Lange, M. Bates, P. Bou Dib, H.R. Shcherbata, M. Meinecke, D. Riedel, S. Dennerlein, P. Rehling, S. Jakobs:

The *Drosophila* MIC10 orthologue has a propensity to polymerize into cristae-shaping filaments (Preprint), *bioRxiv* (2023), <https://doi.org/10.1101/2023.04.17.537183>

M. Antolovic, A. Egner, B. Henriques-Normark, I. Rimke, A. Schönle, J. Widengren:

Near-IR Nanoscopy and Vibrational Microscopy, *Imaging & Microscopy* 2023 (1), 19-21 (2023)

Y. AlSalka, S. Schwabe, J. Geweke, G. Ctistis, H. Wackerbarth:

Electrochemical and Photoelectrochemical Water Splitting: Operando Raman and Fourier Transform Infrared Spectroscopy as Useful Probing Techniques, *Energy Technol.*, 11:2200788 (2023)

Publikationen

Publications

A. Blumenstein, P. Simon, J. Ihlemann:

High-Resolution Laser Interference Ablation and Amorphization of Silicon, *Nanomaterials* 13, 2240 (2023)

L. Fütterer, C. M. Beckmann, J. Ihlemann:

Viscoelastic deformation of borosilicate glass substrates induced by a laser-patterned silicon suboxide film, *Applied Physics A* 129, 107 (2023)

J. Meinertz, L. J. Richter, C. M. Beckmann, J. Ihlemann:

Precision marking of glass with excimer lasers, *Photonics Views* 20(2), 63 (2023)

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

Excimer laser surface patterning for photoluminescence enhancement of silicon nanocrystals, *Photonics* 10, 358 (2023)

L. J. Richter, C. M. Beckmann, J. Ihlemann:

Black marking of titanium containing commercial glass Proceedings of Lasers in Manufacturing Conference LiM 2023

J. Meinertz, L.J. Richter, J. Ihlemann:

Phase masks for laser interference processing IVAM Hightech-Magazin »inno« – Photonics – The Power of Light 84, 4 (2023)

E. A. Vishnyakov, D. D. Mai, J. T. Green, A. Mondal, S. Maity, S. Niekrasz, P. Zimmermann, A. Jančárek, A. Y. Molodozhentsev:

Coherent undulator radiation project at ELI Beamlines, *Nuclear Inst. and Methods in Physics Research*, A, submitted, 2023.

Y. AlSalka, O. Al-Madanat, A. Hakki:

TiO₂-based photocatalytic hydrogen production: How to transfer it to an applicable approach, *Appl. Catalysis A* 662, 119287 (2023)

T. Mazza, T. M. Baumann, R. Boll, A. De Fanis, P. Grychtol, M. Ilchen, J. Montaña, V. Music, Y. Ovcharenko, N. Rennhack, D. E. Rivas, A. Rörig, P. Schmidt, S. Usenko, P. Ziołkowski, D. La Civita, M. Vannoni, H. Sinn, B. Keitel, E. Plönjes, U. F. Jastrow, A. Sorokin, K. Tiedtke, K. Mann, B. Schäfer, N. Breckwoldt, S.-Kil Son, M. Meyer:

The beam transport system for the SQS instrument at the European XFEL: optical layout and first commissioning results, *J. Synchrotron Rad.*, <https://doi.org/10.1107/S1600577522012085> (2023)

A. M. Summers, S. Severino, M. Reduzzi, T. P. H. Sidiropoulos, D. E. Rivas, N. Di Palo, H.-W. Sun, Y.-H. Chien, I. León, B. Buades, S. L. Cousin, S. M. Teichmann, T. Mey, K. Mann, B. Keitel, E. Plönjes, D. K. Efetov, H. Schwoerer, J. Biegert:

Realizing Attosecond Core-Level X-ray Spectroscopy for the Investigation of Condensed Matter Systems, *Ultrafast Science*, 3 <https://spj.science.org/doi/10.34133/ultrafastscience.0004> (2023)

C. Britze, P. Henning, M. Vergöhl, A. Pflug, T. Melzig, S. Bruns, B. Schäfer, K. Mann, J. Terhürne:

Precise control and adjustment of uniformity for optical coatings on 2D and 3D components, *Surface and Coatings Technology*, submitted, 2023

Buchbeiträge / Patente

Book Contributions / Patents



J. Ihlemann, A. Blumenstein, J.-H. Klein-Wiele, P. Simon

Periodic surface structures by laser interference ablation in: Ultrafast Laser Nanostructuring - The Pursuit of Extreme Scales, R. Stoian, J. Bonse eds. Springer Series in Optical Sciences Vol. 239 (2023)

W. Ramadan, Y. AlSalka, O. Al-Madanat, D. W. Bahnemann

Synthesis of Magnetic Ferrite and TiO₂ Based Nanomaterials for Photocatalytic Water Splitting Applications. In: Uddin, I., Ahmad, I. (eds) Synthesis and Applications of Nanomaterials and Nanocomposites. Composites Science and Technology . Springer, Singapore. (2023)

M. Curti, Y. AlSalka, O. Al-Madanat, D. W. Bahnemann

Isotopic Substitution to Unravel the Mechanisms of Photocatalytic Hydrogen Production. In Photocatalytic Hydrogen Production for Sustainable Energy, A. Puga (Ed.) (2023)

C. Lenth, A. Schumann, F. Ude, H. Wackerbarth

On-site detection method for sulfur mustard for safe underwater work, 2023, Anakon 2023 Book of Abstracts, 161, ISBN 978-3-200-09056-9 (2023)

A. Egner, C. Geisler, J.-R. Krüger

Method and scanning fluorescence microscope for multidimensional high-resolution imaging of a structure or a path of a particle in a sample, EP3278165B1, 07.06.2023

G. Ctistis, C. Lenth, H. Wackerbarth

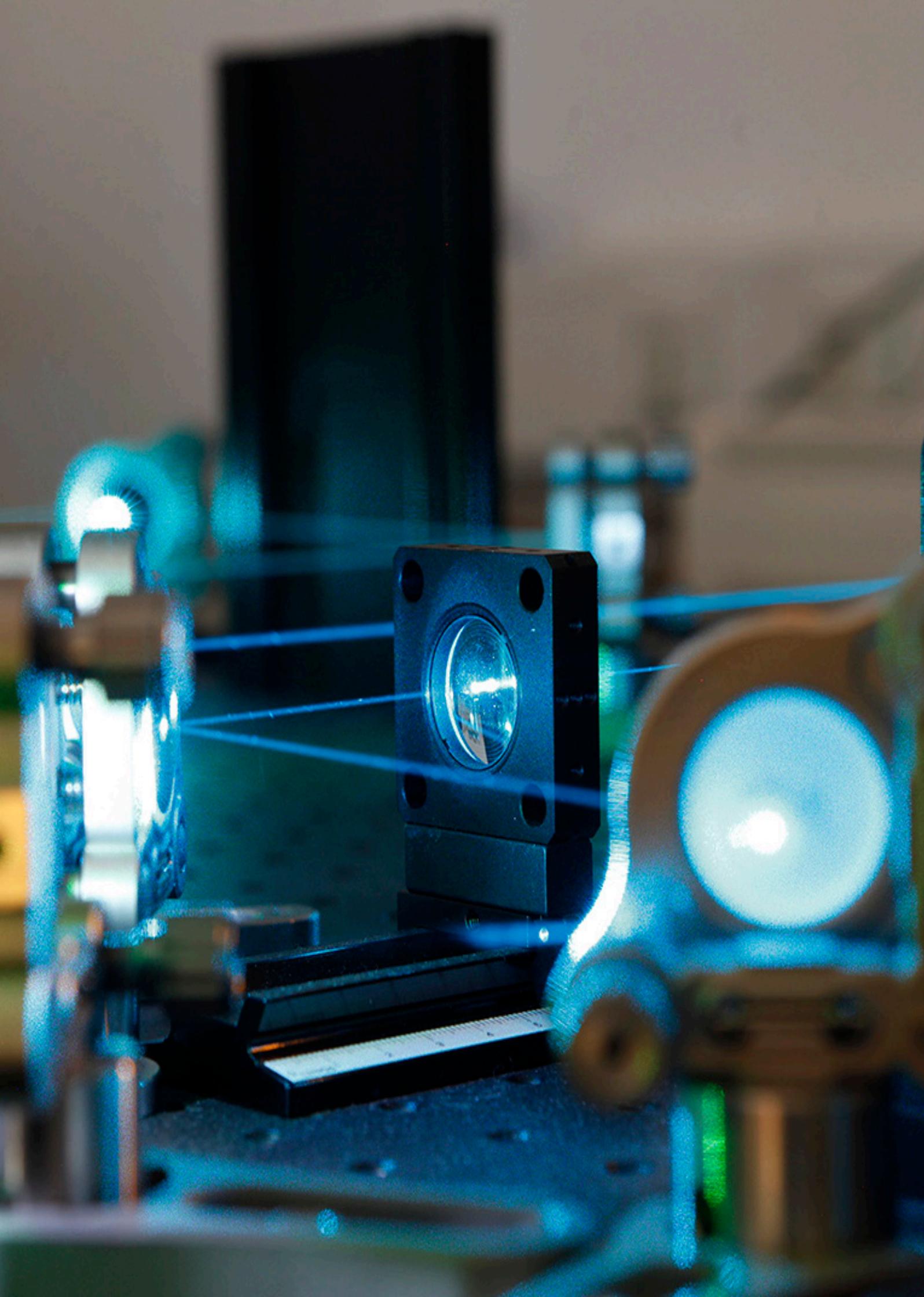
Verfahren und Vorrichtung zum Identifizieren von Flüchtigen Substanzen mit resonatorverstärkter Raman-Spektroskopie bei reduziertem Druck, EP3928082, 02.08.2023

C.M. Beckmann, J. Ihlemann

Verfahren zur umformenden Bearbeitung eines Trägersubstrates für ein optisches Funktionsbauteil
DE10 2020 106 768 B4, 15.6.2023

J. Ihlemann, J. Meinertz, L.H. Stark

Apparatus and method for generating ablation for periodic line structure on workpiece
KR102542295B1, 09.06.2023



Konferenzbeiträge

Conference contributions

M. Bates:

4Pi-STORM visualization of nuclear pore complex architecture, EMBO Workshop: In situ structural biology: from cryo-EM to multi-scale modelling, EMBL Heidelberg, Heidelberg (02.2023)

**J. Ihlemann, J. Oltmanns, F. Kleinwort,
J.-H. Klein-Wiele, P. Simon:**

Ultrafast nanostructuring utilizing interference techniques and plasmonic effects Invited Paper, SPIE Photonics West, Conference 12408 Laser Applications in Microelectronic and Optoelectronic Manufacturing (LAMOM) XXVIII, Paper 12408-18, San Francisco, USA (02.2023)

L. Janos Richter, J. Ihlemann

Laser implantation of plasmonic nanoparticles for photoluminescence enhancement of silicon quantum dots, SPIE Photonics West, Nanoscale and Quantum Materials: From Synthesis and Laser Processing to Applications, San Francisco, USA (02.2023)

**J. Ihlemann, J. Oltmanns, F. Kleinwort,
J.-H. Klein-Wiele, P. Simon:**

Ultrafast nanostructuring utilizing interference techniques and plasmonic effects
Invited Paper, SPIE Photonics West, Conference 12408 Laser Applications in Microelectronic and Optoelectronic Manufacturing (LAMOM) XXVIII, Paper 12408-18, San Francisco, USA (02.2023)

L. J. Richter, J. Ihlemann:

Laser implantation of plasmonic nanoparticles for photoluminescence enhancement of silicon quantum dots SPIE Photonics West, Nanoscale and Quantum Materials: From Synthesis and Laser Processing to Applications, San Francisco, USA (02.2023)

**M. Zhan, V. Oliver, A. Kreiner, H. Wrigge, P. Simon,
T. Nagy, A. Guggenmos:**

SAVANNA-HP: a stretched flexible hollow-core fiber compressor for high-power lasers, Proc. SPIE PC12414, High-Power Laser Materials Processing: Applications, Diagnostics, and Systems XII, PC1241406 (03. 2023)

C. Lenth, A. Schumann, F. Ude, H. Wackerbarth:

On-site detection method for sulfur mustard for safe underwater work, Anakon, Wien (04.2023)

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

Rapid Optimized Drift Correction for Single Molecule Localization Microscopy, Focus on Microscopy 2023, Porto, Portugal (04.2023)

**Y. Alsalka, F. Merker-Müller, S. Scholz, G. Ctistis,
S. Pagel-Wieder, F. Gessler, H. Wackerbarth:**

Real-time Underwater TNT Sensor for the Safety of Divers, Anakon Wien (04.2023)

C. Lenth, A. Schumann, F. Ude, H. Wackerbarth:

On-site detection method for sulfur mustard for safe underwater work, Anakon, Wien (04.2023)

**E. A. Vishnyakov, D.D. Mai, J.T. Green, A. Mondal,
A. Jančárek, P. Zimmermann, S. Niekrasz,
S. Maity, A.Y. Molodozhentsev:**

Compact undulator-based soft X-ray radiation source at ELI Beamlines: user-oriented program, SPIE Optics + Optoelectronics 2023, Prag, Tschechien (04.2023)

Konferenzbeiträge

Conference contributions

M. Krikunova, Z. Hoque, A. Roos, E. Klimesova, L. B. Latief, L. Jurkovičová, O. Hort, O. Finke, M. Albrecht, D. D. Mai, J. Nejdil, M. Mudrich, J. Andreasson:

A multipurpose end-station MAC for applications with intense HHG-based EUV source at ELI Beamlines, SPIE Optics + Optoelectronics 2023, Prag, Tschechien (04.2023)

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

Analyse von Infusionslösungen mit UV/VIS-Spektroskopie und Refraktometrie zur Verhinderung von Fehlmedikationen, 48. ADKA-Kongress und Mitgliederversammlung, Nürnberg (05.2023)

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

Analyse von Infusionslösungen mit UV/VIS-Spektroskopie und Refraktometrie zur Verhinderung von Fehlmedikationen, 48. ADKA-Kongress und Mitgliederversammlung, Nürnberg (05.2023)

J. AlSalka:

Inline & offline spectroscopy in the field of photocatalytic and photoelectrochemical energy applications, Inno-Forum Workshop Electrochemistry, Tunesien (05.2023)

L. J. Richter, C. M. Beckmann, J. Ihlemann:

Black marking of titanium containing commercial glass Lasers in Manufacturing Conference LiM 2023 München (06.2023)

L. J. Richter, J. Ihlemann:

Laser based Methods for Photoluminescence Enhancement of Silicon Nanocrystals in a Silicon Suboxide Matrix CLEO Europe, CK – MICRO- AND NANO-PHOTONICS München (06.2023)

P. Simon, J. Ihlemann, J.-H. Klein-Wiele, F. Kleinwort:

Periodic structures created by laser interference irradiation, Invited Paper, E-MRS Spring meeting, Symposium L, Making light matter: lasers in material sciences and photonics, Strasbourg, France (06.2023)

P. Wild, J. Holburg, M. Müller, K.U. Totsche, K. Mann, J. Thieme, K. Eusterhues:

Mineral quantification in mixtures of synthetic goethite, hematite and ferrihydrite by table-top NEXAFS at the O K-edge, Goldschmidt 2023, Lyon, Frankreich (07.2023)

T. Kutz, C. Niklas, J. Koch, W. Schippers, H. Wackerbarth, G. Ctistis:

Detection of Environmental Gas Compositions with Shifted-excitation Fiberenhanced Raman Difference Spectroscopy, Optica Sensing Congress, München (08.2023)

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

Polarimetric determination of surface stress in glass, Optica Sensing Congress, München (08.2023)

Konferenzbeiträge

Conference contributions

L. Reinkensmeier:

COMET – Cost-function Optimized Maximal overlap drift Estimation, Single Molecule Localization Microscopy Symposium SMLMS 2023, Wien, Österreich (08.2023)

Y. AlSalka, S. Schwabe, J. Geweke, G. Ctistis, C. Lentz, P. Schröder, H. Wackerbarth:

Resource quality control for rubber production and in-line analysis, FEMS EUROMAT 23, Frankfurt a. Main (09.2023)

A. Egner:

Gaining Deeper Insights into the Nanoworld: Surpassing the Limits of Diffraction by Innovative Light Microscopy Technology, Schnelltest-Tagung, Göttingen (09.2023)

L. Weimann, M. Reinhardt, J. Duda, H. Mißbach-Karmrodt, H. Drake, J. Schöning, J. Holburg, L. B. Andreas, J. Reitner, M. J. Whitehouse, V. Thiel:

Insights Into Carbonaceous Matter in 3.5 Ga Hydrothermal Barites from the Dresser Formation (Pilbara Craton, Australia), European Association of Geoscientists & Engineers, IMOG 2023, Montpellier, Frankreich (09.2023)

M. Bates:

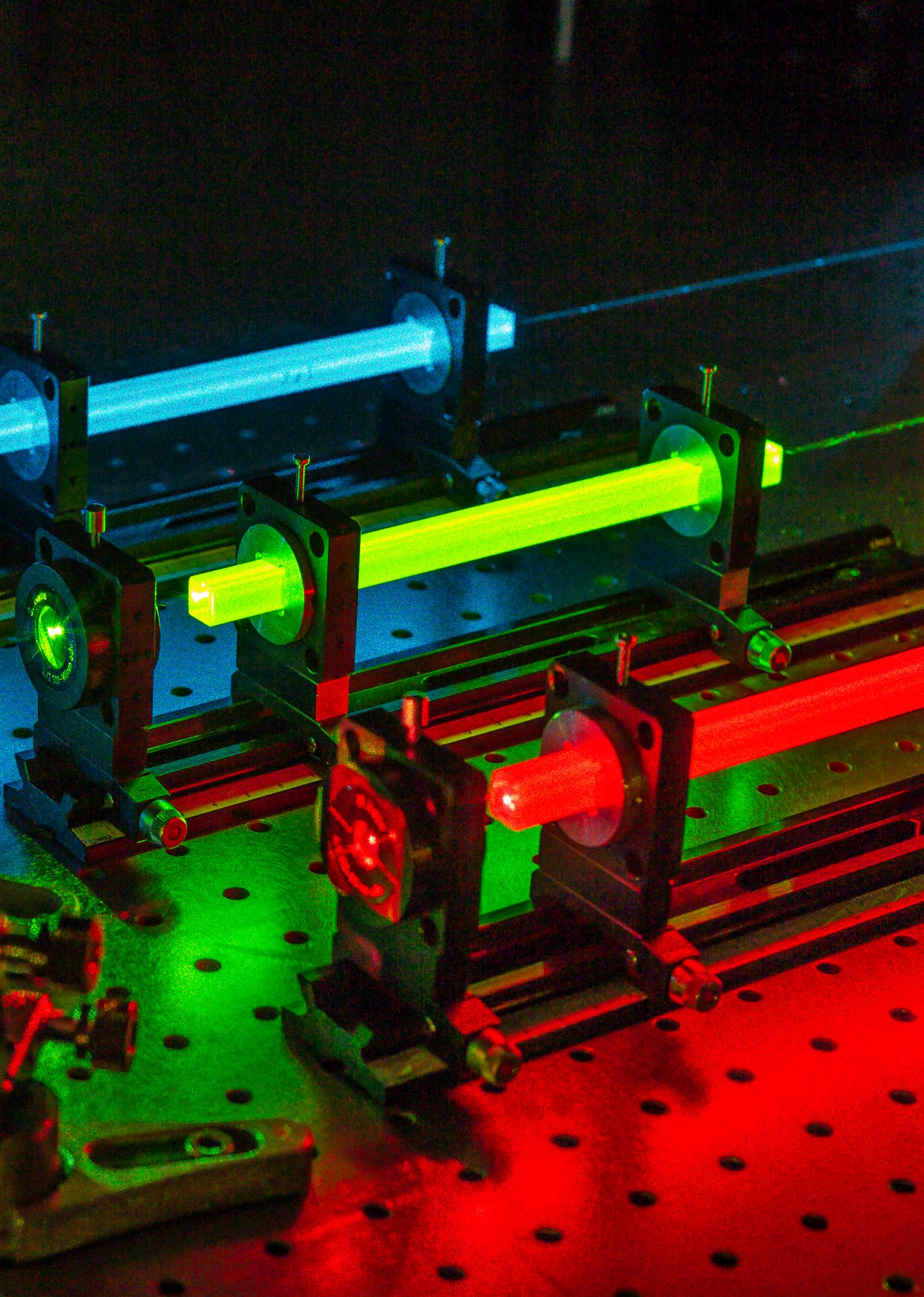
Photo-Switchable Organic Dyes: the Photophysics of SMLM, MIFOBIO Workshop: Functional Microscopy for Biology, Presqu'île de Giens, France (11.2023)

A. Röben, C. M. Beckmann, J. Ihlemann:

Laserbasierte Spannungskompensation bei Glassubstraten in der Dünnschichttechnologie (LabaKom) F.O.M-Konferenz 2023: FRÜHFÖRDERUNG VON INNOVATIONSIDEEN DURCH IGF IN OPTIK, PHOTONIK, ANALYSEN-UND MEDIZINTECHNIK, Online (11.2023)

M. Bates:

Exploring protein complex architecture with STORM microscopy, Cambridge Microscopy Meeting 2023, University of Cambridge, Cambridge, UK (12.2023)



Abschlussarbeiten

Final Thesis

Debadrita Ghosh

Automated aberration correction for STED
microscopy,

Dissertation,

Georg-August-Universität Göttingen (07.2023)

Lukas Janos Richter

UV laser modification of transparent materials for
photonic applications

Dissertation,

Georg-August-Universität Göttingen (04.2023)

Pascal Schröder

Determination of Optimal Measurement Parameters
and Data Analysis Methods for Raw Rubber Quali-
ty Assessment with Various Raman Spectrometer,

Masterarbeit,

HAWK Hochschule für angewandte Wissenschaft
und Kunst (01.2023)

Tim Kutz

Entwicklung und Evaluation eines Versuchsaufbaus
für faserverstärkte Ramanspektroskopie

Masterarbeit,

Georg-August Universität Göttingen (12.2023)

Jay Jadvani

Fast, high-resolution surface marking using SLM
(Spatial Light Modulator) in a scanning process at
193 nm laser wavelength

Masterarbeit,

Ernst-Abbe-Hochschule Jena (07.2023)

Ausgewählte Kooperationspartner Selected Cooperation Partners

INTERNATIONAL



NATIONAL



LOKAL



Messen und Veranstaltungen

Exhibitions and Events



Laser World of Photonics 2023

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

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

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



Weiterhin zeigten wir eine von uns entwickelte Laborplasmaquelle, die weiche Röntgen- und Extrem Ultraviolette (EUV) Strahlung erzeugt. Diese Quelle findet Anwendung in der Optikcharakterisierung mittels Reflektometrie sowie in der chemischen Analytik mittels Absorptionsspektroskopie.

Laser World of Photonics 2023

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

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

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



We also displayed a laboratory plasma source developed by us, which generates soft X-ray and extreme ultraviolet (EUV) radiation. This source can be used for optical characterization through reflectometry and chemical analysis via absorption spectroscopy.

Messen und Veranstaltungen

Exhibitions and Events

In der Röntgenmikroskopie ermöglicht sie Auflösungen im Nanometerbereich. Zudem können wir mit geeigneten Optiken die Strahlung fokussieren und Stabilitäts- und Zerstörschwellmessungen an EUV-optischen Materialien und Sensoren im Zusammenhang mit der zukünftigen Halbleiterlithographie-Wellenlänge von 13,5 Nanometer durchführen. Mit dem Hartmann-Shack-Wellenfrontsensor des IFNANO können wir Laserstrahlen in Echtzeit Analysieren und deren Ausbreitungsverhalten prognostizieren.

In X-ray microscopy, it enables resolutions in the nanometer range. Furthermore, with suitable optics, we can focus the radiation and perform stability and damage threshold measurements on EUV optical materials and sensors for future semiconductor lithography wavelength of 13.5 nanometers. Using the IFNANO's Hartmann-Shack wavefront sensor, we can analyze laser beams in real-time and predict their propagation.



Schließlich präsentierten wir in München das STED-Prinzip, mit dem mikroskopische Aufnahmen mit einer Auflösung von nur wenigen zehn Nanometern im sichtbaren Spektralbereich erstellt werden können. Die Detailschärfe dieser Bilder ist bis zu zehnmal höher als bei der klassischen Fluoreszenzmikroskopie. Dadurch ist es möglich, molekulare Prozesse in lebenden Zellen zu untersuchen.

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

Messen und Veranstaltungen

Exhibitions and Events

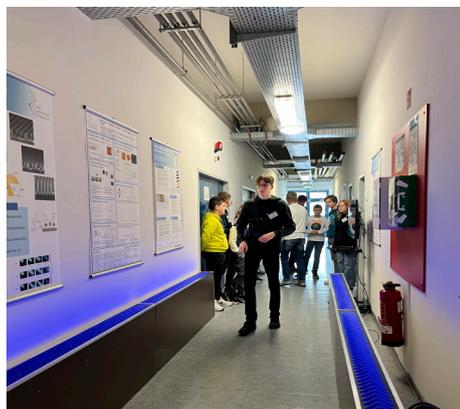
Zukunftstag im IFNANO

Seit 2001 haben interessierte Mädchen und Jungen der Jahrgangsstufen 5 bis 12 jedes Jahr am Zukunftstag die Möglichkeit, geschlechteruntypische Berufe hautnah kennenzulernen. Eine wichtige Veranstaltung nicht nur für die Jugendlichen, denn gerade im Bereich Mathematik, Informatik, Naturwissenschaften und Technik und vor dem Hintergrund des demographisch bedingten zunehmenden Fachkräftemangels ist die Förderung des Nachwuchses - insbesondere des weiblichen - wichtiger denn je. Am 27. April 2023 war eine Gruppe von 10 Jungen und Mädchen im Alter von 11 bis 14 Jahren zu Gast im IFNANO.



Zukunftstag at the IFNANO

Since 2001, the annual Future Day has given pupils from 5th to 12th grade the opportunity to explore at first hand a range of careers open to both boys and girls. An important event not only for the youngsters, because it is precisely in the areas of mathematics, computer science, natural sciences and technology, and against the background of increasing shortage of skilled personnel, that it is more important than ever to encourage them and in particular girls. On 27 April 2023, a group of 10 boys and girls aged 11 to 14 years visited the IFNANO.



Messen und Veranstaltungen

Exhibitions and Events



Im Rahmen einer ausführlichen Führung besichtigten sie das Institut. Danach hatten die Schülerinnen und Schüler die Gelegenheit, unter fachkundiger Anleitung selbst einmal als Forscher aktiv zu werden: Mit höchster Konzentration und großem Interesse erkundeten sie einige praktische technische Bereiche der (Laser-) Physik und lernten dabei, wie ein Gravurlaser funktioniert, wie Rosen zu Eis werden und noch vieles andere Spannende mehr. Die rundweg positive Resonanz aller Teilnehmer bestätigte einmal mehr die positive Wirkung der Initiative.

They were given an extensive guided tour of the institute. The pupils had the opportunity to take part, under expert guidance, as researchers. With great concentration and much interest they explored some practical aspects of (laser-) physics and learned, for example, how an engraving laser works, how roses turn to ice and many other exciting things. The altogether positive response from all participants once again confirmed the positive impact of the initiative.



Messen und Veranstaltungen

Exhibitions and Events



Schnelltesttagung im IFNANO

Schnelltests kennt spätestens seit der Corona-Pandemie jeder. Wenn es um die Entwicklung extrem sensitiver und genauer Schnelltests geht, ist die Region Göttingen mit dem „Süd-niedersachsen Point-of-Care-Cluster“ (SNIPOCC) ganz vorne dabei. Bei einer Schnelltest-Tagung am Göttinger Institut für Nanophotonik kamen Experten und Interessierte aus ganz Europa am 27. und 28. September 2023 zum Informationsaustausch zusammen.



Im SNIPOCC Bündnis werden nachhaltige, hoch-sensitiver Schnelltests mit deutlich über den Stand der Technik hinausgehenden Produktkonzepten und Funktionalitäten für die Bereiche Human- und Veterinärmedizin, Forensik sowie Umwelt- und Gefahrstoffanalytik entwickelt. Das Bündnis umfasst 13 regional ansässige Akteure aus Wissenschaft und Wirtschaft. Dazu zählen kleine und mittelständische Unternehmen, Forschungseinrichtungen wie die Georg-August-Universität und mit Sartorius auch einer der größten Konzerne der Region. Bündniskoordinator ist Dr. Dimitrios Theodoridis von der nal von minden GmbH, eine europaweit agierende Entwicklerin von Schnelltests für die Human- und Veterinärmedizin.

Rapid test conference in Göttingen

Everyone has been familiar with rapid tests since the Corona pandemic. When it comes to the development of extremely sensitive and accurate rapid tests, the Göttingen region is at the forefront with the “South Lower Saxony Point-of-Care Cluster” (SNI- PoCC). At a rapid test conference at the Göttingen Institute for Nanophotonics, experts and interested parties from all over Europe came together to exchange information on September 27th and 28th,



The SNIPOCC alliance develops sustainable, highly sensitive rapid tests with product concepts and functionalities that go well beyond the state of the art for the areas of human and veterinary medicine, forensics as well as environmental and hazardous substance analysis. The alliance includes 13 regionally based actors from science and business. These include small and medium-sized companies, research institutions such as the Georg August University and Sartorius, one of the largest corporations in the region. Alliance coordinator is Dr. Dimitrios Theodoridis from nal von minden GmbH, a Europe-wide developer of rapid tests for human and veterinary medicine.

Messen und Veranstaltungen

Exhibitions and Events

In Kooperation mit dem Verbundvorhaben MIDI-VIRAL, das Systeme für die Diagnostik von viralen Infektionsmarkern entwickelt, wurden 16 Vorträgen namhafter Experten und Diskussionsrunden den rund 60 Teilnehmern aus ganz Deutschland geboten. Themen waren dabei unter anderem „Schnelltests in Forensik und Sicherheit“, „Schnelltests in Umweltanalytik, Lebensmittelsicherheit und Tierhaltung“, „Nachhaltigkeit von Schnelltests“ sowie „Vor-Ort-Diagnostik und Mikrofluidische Systeme“.



Parallel zu der Tagung fand eine Hausmesse mit Produkten der Bündnispartner statt. Falko Mohrs, niedersächsischer Minister für Wissenschaft und Kultur, nutzte wie auch Marcel Riethig, Landrat des Landkreises Göttingen, die Gelegenheit bei seinem Besuch der Tagung mit den Ausstellern und Organisatoren ins Gespräch zu kommen. Das Ziel eine höhere Sichtbarkeit der SNIpOCC Bündnis Aktivitäten zu schaffen und sich mit weiteren Akteuren zu vernetzen wurde erreicht. Das Feedback der Teilnehmer war überaus positiv, so dass es eine Fortsetzung geben soll.



In cooperation with the MIDI-VIRAL joint project, which develops systems for the diagnosis of viral infection markers, 16 lectures by well-known experts and discussion groups were offered to around 60 participants from all over Germany. Topics included “rapid tests in forensics and security”, “rapid tests in environmental analysis, food safety, and animal husbandry”, “sustainability of rapid tests” and “on-site diagnostics and microfluidic systems”.



An in-house exhibition with products from the alliance partners took place parallel to the conference. Falko Mohrs, Lower Saxony's Minister for Science and Culture, as well as Marcel Riethig, District Administrator of the Göttingen district, took the opportunity to talk to the exhibitors and organizers during his visit to the conference. The goal of creating a higher visibility of the SNIpOCC alliance activities and networking with other actors was achieved. The feedback from the participants was extremely positive, so there should be a sequel.



Pressemitteilungen Press release

10 GÖTTINGEN

Samstag, 7. Oktober 2023



Bei einem Gang über die Haus-Messe kamen Niedersachsens Wirtschaftsminister Falko Mohrs (von links), Landrat Marcel Riethig und IFNANO-Leiter Prof. Alexander Egner am Stand des Schnelltestherstellers „nah von minden GmbH“ mit dessen Geschäftsführer Dimitrios Theodoridis und dem Schnelltest-Experten Falko Klatt ins Gespräch.

Streit um City-Logistik: Vogel tritt zurück

Göttingen – Robert Vogel tritt aus dem Vorstand des Vereins Pro-City in Göttingen zurück. Er zieht damit die Konsequenz aus den anhaltenden Diskussionen um das Thema City-Logistik in Göttingen (wir berichteten).

Vogel engagiert sich geschäftlich im Göttinger Logistik-Unternehmen Grünfluchs, das vor wenigen Tagen Insolvenz anmelden musste. Das Unternehmen wollte unter anderem die Belieferung auf der letzten Meile in der City übernehmen.

Hintergrund: Wenn es nach dem Willen der Stadt Göttingen geht, sollen nach 11 Uhr keine Lieferdienste mehr in die Innenstadt fahren.

An der Regelung gab es jetzt deutliche Kritik von mehr als 50 Innenstadt-Händlern, die dies in einer Unterschriftenliste, die von Vinyl-Reservat-Inhaber Hans Philipp Schubring initiiert wurde, deutlich gemacht haben.

„Die Unterstellungen des Initiators zu meiner Person und die Konsequenzen, die ich bisher dadurch erleben musste, bewegen mich dazu, aus dem Vorstand von Pro-City zurückzutreten“, schreibt Vogel in einer kurzen Stellungnahme.

Er erinnert gleichzeitig an die Diskussion der vergangenen Jahre rund um das Thema Verkehr in der Innenstadt. Der Plan der Stadtverwaltung Göttingen, die seit 1978 bestehenden Regeln des Lieferverkehrs in der Fußgängerzone durchzusetzen, habe zu einer Diskussion unter den Gewerbetreibenden in der Fußgängerzone geführt.

„Dies ist grundsätzlich sehr zu begrüßen“, sagt Robert Vogel. bis

Mehr als nur Corona-Bestätigung

Unternehmen aus Südniedersachsen wollen vom Schnelltest-Trend profitieren

Göttingen – Einen vollen Erfolg feierten die Organisatoren mit der ersten Schnelltest-Tagung, die unter der Woche am Göttinger Institut für Nanophotonik (IFNANO) stattfand.

„Schnelltests sind nicht zuletzt durch Corona in aller Ohren, aber sie waren auch vorher schon ein wichtiges Thema“, betonte IFNANO-Leiter Prof. Alexander Egner in seiner Eröffnungsrede. Sie kämen nicht nur in der Human- und Veterinärmedizin, sondern unter anderem auch in der Forensik sowie der Umwelt- und Gefahrstoffanalytik zum Einsatz und würden weltweit für einen Gesamtumsatz von rund 50 Milliarden Euro sorgen.

„Da wir in unserer Region über ein Netzwerk von Schnelltestherstellern, Komponentenzulieferern und Geräteherstellern verfügen, haben wir den Südniedersachsen Point-of-Care-Cluster oder kurz SNIPOCC initiiert“, sagte Egner. Ziel dieses aus 13 regional ansässigen Akteuren aus Wirtschaft und Wissenschaft bestehenden Bündnisses sei nicht nur die Entwick-



Dieser Schnelltest benutzt inzwischen (fast) jeder: Damit kann eine Corona-Infektion nachgewiesen werden. FOTO: SEBASTIAN GOLLNOWSKA

lung neuer, hochsensibler und nachhaltiger Schnelltests, „sondern auch das Schaffen neuer Arbeitsplätze in der Region“.

Zusammen mit dem Verbundvorhaben MIDI-VIRAL, das Systeme für die Diagnostik von viralen Infektionsmarkern (wie beim Corona-Schnelltest) entwickelt, bot das SNIPOCC bei seiner Tagung den mehr als 60 aus ganz Deutschland angereisten Teilnehmern 15 Vorträge

namhafter Experten sowie anschließende Diskussionsrunden.

Themen waren dabei unter anderem „Schnelltests in Forensik und Sicherheit“, „Schnelltests in Umweltanalytik, Lebensmittelsicherheit und Tierhaltung“, „Nachhaltigkeit von Schnelltests“ oder „Vor-Ort-Diagnostik und Mikrofluidische Systeme“. Am ersten Veranstaltungstag ging es dabei um die Anwendungsperspektive von

Schnelltests, am zweiten um die Technologie und die wissenschaftlichen Herausforderungen.

„Nach der Pandemie ist vor der Pandemie“, meinte Falko Mohrs, niedersächsischer Minister für Wissenschaft und Kultur, der sich bei seinem Besuch unter anderem auch Zeit nahm, um bei einem Rundgang über die tagungsbegleitende Hausmesse mit den Ausstellern ins Gespräch zu kommen. „Da es allein im

Gesundheitssektor für Schnelltests sehr konkrete Anwendungsfälle gibt, ist es entscheidend, möglichst nah an diesen Fällen zu einem genauen Ergebnis zu kommen“, meinte Mohrs. Es sei wichtig, dass solche Themen „auch bei uns in der Region“ behandelt würden. „Und genau deshalb freue ich mich über das Projekt SNIPOCC“, so der Minister. Das sei „unglaublich viel wert“.

„Sie alle leisten einen großen Beitrag dazu, aus der wissenschaftlichen Forschung heraus Anwendungen zu schaffen, die den Menschen helfen“, lobte auch Landrat Marcel Riethig. „Ich bin stolz darauf, dass diese erste Tagung ihrer Art hier bei uns in Göttingen stattfindet.“

„Wir wollten mit der Tagung zum einen mehr Sichtbarkeit für das SNIPOCC-Projekt schaffen, zum anderen war aber auch die Netzwerkarbeit ein wichtiger Punkt“, sagte Mitorganisator Dr. Hainer Wackerbarth vom Institut für Nanophotonik Göttingen. Beides habe man mit der zweitägigen Veranstaltung geschafft. pef



Tritt aus Vorstand zurück: Robert Vogel. FOTO: THOMAS KOPPEZ

