



# JAHRESBERICHT 2020

Institut für Nanophotonik Göttingen e.V.





**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](mailto:info@ifnano.de)

[www.ifnano.de](http://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 .....	8	Mission Statement.....	8
Institutsstruktur.....	10	Institute Structure .....	10
Das Institut in Zahlen .....	12	Statistics of the Institute .....	12
Die Abteilungen .....	15	The Departments .....	15
Optische Nanoskopie .....	16	Optical Nanoscopy .....	16
Kurze Pulse / Nanostrukturen.....	32	Short Pulses / Nanostructures .....	32
Optik / Kurze Wellenlängen.....	52	Optics / Short Wavelengths .....	52
Photonische Sensorik.....	66	Photonic Sensor Technologies .....	66
Projekte.....	80	Projects.....	80
Publikationen.....	83	Publications.....	83
Konferenzbeiträge.....	85	Conference Contributions .....	85
Abschlussarbeiten .....	86	Final Thesis .....	86
Ausgewählte Kooperationspartner .....	87	Selected Cooperation Partners.....	87
ZUSE-Gemeinschaft .....	88	ZUSE-Gemeinschaft .....	88
Pressemitteilungen.....	90	Press releases.....	90

# Vorwort

## Preface

### Liebe Leserinnen und Leser,

seit vergangenem Jahr heißen wir Institut für Nanophotonik Göttingen (IFNANO). Die Namensänderung trägt der Weiterentwicklung unserer Einrichtung in den vergangenen zehn Jahren Rechnung. In dieser Zeit haben wir uns eine international führende Position beim Strukturieren, Analysieren und Abbilden mit Licht im Nanometerbereich (millionstel Millimeter) erarbeitet. Unser Institut ist interdisziplinär und auch in den Bereichen Medizin, Biologie, Chemie und Life-Science tätig. So suchen wir anwendungsorientierte Lösungen für Fragen der Gesundheit, der Nachhaltigkeit oder des Klimaschutzes, aber auch der Sicherheit oder (E-)Mobilität. Hierdurch führen wir die Tradition unserer 1987 als Laser-Laboratorium Göttingen gegründeten Einrichtung weiter, die damals zu den Pionieren auf dem Gebiet der Schlüsseltechnologie Photonik gehörte. Bis heute kooperieren wir eng mit Start-ups sowie kleinen und mittelständischen Unternehmen, oft Weltmarktführern, aber auch mit Vereinen und Verbänden. Dabei kommt uns – nicht zuletzt in der Region – eine zentrale Rolle beim Transfer von der Grundlagenforschung in die Wirtschaft und damit in die Mitte der Gesellschaft zu.

Wie überall erschwert auch bei uns die Corona-Pandemie die Arbeit. Wir nutzen die Labore im Schichtbetrieb und arbeiten, soweit möglich, einzeln in den Büros oder im Homeoffice. Trotz der Schwierigkeiten gelangen uns wissenschaftliche Durchbrüche. Mit Forschungspartnern zeigten wir zum Beispiel die Eignung unserer Hohlfasertechnologie zur Kompression von ultrakurzen Femtosekundenpulsen und von Pulsen mit extrem hoher Spitzenleistung von bis zu einem Terrawatt. Die exzellente Strahlqualität dieser Laserquelle erlaubt die Untersuchung relativistischer Licht-Materie-Wechselwirkungseffekte auf der Sub-Lichtzyklus-Zeitskala. Dieses Ergebnis erzielten wir gemeinsam mit dem Pariser Laboratoire d'Optique Appliquée (LOA), dem Centre national de la recherche scientifique (CNRS), der École Polytechnique, der Pariser École nationale supérieure de techniques avancées (ENSTA) und dem Max-Born-Institut für Nichtlineare Optik und Kurzzeitspektroskopie.

### Dear Readers,

Last November, we changed our name to the Institute for Nanophotonics Göttingen (IFNANO). This name change reflects the evolution of our facility over the past ten years. During this time, we worked hard to acquire a leading international position in structuring, analyzing, and imaging with light in the nanometer range (i.e. millionths of a millimeter). Our institute operates on an interdisciplinary basis and is also active in the fields of medicine, biology, chemistry, and the life sciences. As such, we strive to develop application-oriented solutions that address issues related to health, sustainability, and climate change, but also security and mobility, including electric mobility. In doing so, we are continuing the tradition of our institute founded in 1987 as the Laser-Laboratorium Göttingen, which at the time was one of the pioneers in the field of the key technology of photonics. To this day, we continue to work in close collaboration with start-ups as well as small and medium-sized enterprises, often global market leaders, but also with clubs and associations. In this context, we play a key role – particularly in the region – in the transfer of frontier research to industry and thus into the heart of society.

Like everywhere else, the coronavirus pandemic is also making our work more difficult. We now use the labs in shifts and, as far as possible, work alone in our offices or from home. Yet despite the difficulties, we have still been able to make scientific breakthroughs. Together with research partners, we demonstrated the suitability of our hollow fiber technology for compressing ultrashort, 3.4 femtosecond pulses as well as pulses with an extremely high peak power of up to one terrawatt, for example. The excellent beam quality of this laser source makes it possible to study the relativistic effects of interactions between light and matter on the sub-light cycle time scale. We achieved this result together with the Paris Laboratoire d'Optique Appliquée (LOA), the Centre national de la recherche scientifique (CNRS), the École Polytechnique, the Paris École nationale supérieure de techniques avancées (ENSTA), and the Max Born Institute for Nonlinear Optics and Short Pulse Spectroscopy.

# Vorwort

## Preface

Anderen Mitarbeitenden unseres Instituts gelang es, die Bildaufnahme in der Stimulated-Emission-Depletion-(STED-)Mikroskopie um bis zu das zehnfache zu beschleunigen. Mit dem neuen Nanoskop lassen sich auch sehr schnell ablaufende molekulare Prozesse, etwa die Bewegung von Vesikeln (kleinen, in den Zellen gelegenen Bläschen), in Echtzeit verfolgen. Der neue Ansatz beschleunigt Screenings, etwa bei der Suche nach pharmazeutischen Wirkstoffen. Um das zu erreichen, entwickelten wir ein neues Rasterverfahren. Dabei wird das Messsignal während der Aufnahme kontinuierlich analysiert und jeder Ort innerhalb der Probe nur genau so lange untersucht, wie es für die gewählte Bildqualität notwendig ist. Das Verfahren bietet weitere Vorteile, da nun nur noch ein Zehntel der bisher benötigten Lichtdosis gebraucht wird. Der Aufnahmeprozess schont daher die Probe.

Auch im Jahr 2020 konnten wir wie in den vorangegangenen Jahren rund zwei Drittel unserer Einnahmen durch Drittmittel erzielen. Mit unseren Partnern bearbeiteten wir insgesamt 33 Kooperationsprojekte, von denen 16 Projekte mit einem Volumen von annähernd 2,5 Millionen Euro neu gestartet worden sind. So suchen wir gemeinsam mit der deineMaschine GmbH nach Möglichkeiten, gekrümmte Flächen mit einem laserbasierten Verfahren in Strahlrichtung (Z-Richtung) diffraktiv zu beschriften. Solche hologrammartigen Kennzeichnungen zum Schutz vor Fälschungen und zur Verbesserung des Designs sollen auf beliebigen Werkstoffen, insbesondere aber auf Metallen, Halbleitern und hochempfindlichen Oberflächen, direkt, individualisierbar und mit industrietauglicher Geschwindigkeit möglich sein. Das auf zwei Jahre angelegte Projekt wird vom Bundesministerium für Wirtschaft mit Mitteln aus dem Zentralen Innovationsprogramm Mittelstand (ZIM) gefördert.

Im internationalen Projekt NanoVIB entwickeln wir den Prototyp eines supraauflösenden Mikroskopsystems der nächsten Generation, das auf dem MINFLUX-Konzept basiert. Es soll die ultimative Auflösungsgrenze in der Fluoreszenzmikroskopie erreichen und Moleküle in den Blick nehmen, die nur Nanometer voneinander entfernt sind. So lassen sich jene komplizierten Mechanismen aufdecken, die inter- und intrazellulären Prozessen zugrunde liegen.

Other members of our institute succeeded in accelerating image acquisition in stimulated emission depletion (STED) microscopy by a factor of up to ten. The new nanoscope also makes it possible to monitor extremely fast molecular processes, such as the movement of vesicles (small bubbles located in cells), in real time. The new approach helps to speed up screenings, for example in the search for active pharmaceutical compounds. To achieve this, we developed a new raster scanning method. In this process, the signal is continuously analyzed during imaging and each location within the sample is analyzed only for as long as is necessary to achieve the selected image quality. The method also offers further advantages. For example, only one-tenth of the previously required light dose is now needed, meaning that the imaging process helps preserve the specimen.

In 2020, as in previous years, we were able to generate around two-thirds of our revenue from third-party funding. We worked on a total of 33 collaborative projects with our partners, 16 of which were newly launched with total funding of almost two and a half million euros. For example, we are working with deine Maschine GmbH to find ways to use a laser-based process to diffraction-mark curved surfaces in the beam direction (z-direction). The aim is to make it possible to directly apply such hologram-like markings – which protect against counterfeiting and improve design – to any material, but particularly to metals, semiconductors, and highly sensitive surfaces, in a manner that allows them to be customized and at industrially feasible speeds. The two-year project is being subsidized by Germany's Federal Ministry for Economic Affairs with funds from the Central Innovation Program for SMEs (abbreviated ZIM in German).

In the international NanoVIB project, we are developing the prototype of a next-generation super-resolution microscope system based on the MINFLUX concept. Our objective is to achieve the ultimate resolution limit in fluorescence microscopy and get a glimpse of molecules that are only nanometers apart. Doing so will reveal the intricate mechanisms that underlie intercellular and intracellular processes. In the future, this could be used to dia-

# Vorwort

## Preface

Damit könnten künftig Krankheiten diagnostiziert werden, bevor Symptome auftreten. Wir arbeiten bei diesem Projekt in einer Public Private Partnership mit der Königlichen Technischen Hochschule und dem Karolinska-Institut in Stockholm sowie den Unternehmen Abberior Instruments, APE Angewandte Physik und Elektronik GmbH sowie Pi Imaging, einer Ausgründung aus der Eidgenössischen Technischen Hochschule Lausanne, zusammen. Die Europäische Union fördert das Projekt mit Mitteln aus dem Programm Horizont 2020.

Dass sich das Institut in dieser herausfordernden Zeit mit solcher Bravour schlägt, haben wir vor allem unseren hochmotivierten, kreativen Mitarbeitenden zu verdanken. Ihnen gilt mein herzlicher Dank.

Den Lesenden unseres Jahresberichts wünsche ich eine anregende Lektüre. Das Institut für Nanophotonik freut sich darauf, die gute Zusammenarbeit mit seinen langjährigen Partnern fortzusetzen, und hofft, neue Mitstreiter zu begeistern.

Ich wünsche Ihnen eine anregende Lektüre



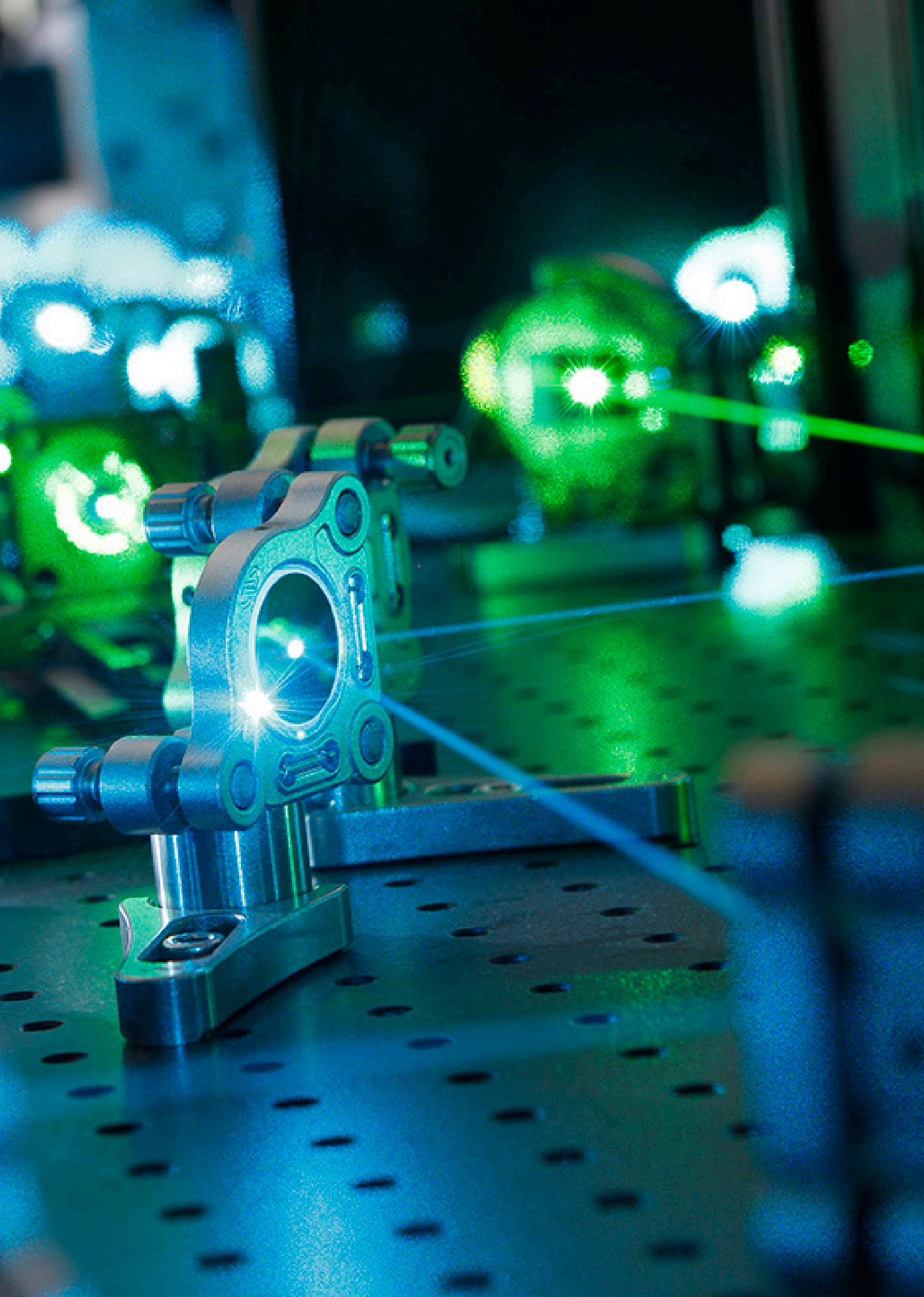
gnose diseases even before symptoms appear. We are working on this project as part of a public-private partnership with the Royal Institute of Technology and the Karolinska Institute in Stockholm, as well as the companies Abberior Instruments, APE Angewandte Physik und Elektronik GmbH, and Pi Imaging, a spin-off from the Swiss Federal Institute of Technology in Lausanne. The European Union is financing the project with funds from the Horizon 2020 program.

The fact that the institute has been able to perform so exceptionally well during these challenging times is, above all, thanks to our highly motivated, creativ employees. I would like to express my heartfelt thanks to all of them.

To the readers, I hope you enjoy reading our annual report. The Institute of Nanophotonics looks forward to continuing its fruitful collaboration with long-standing partners and hopes to inspire new ones to join us.

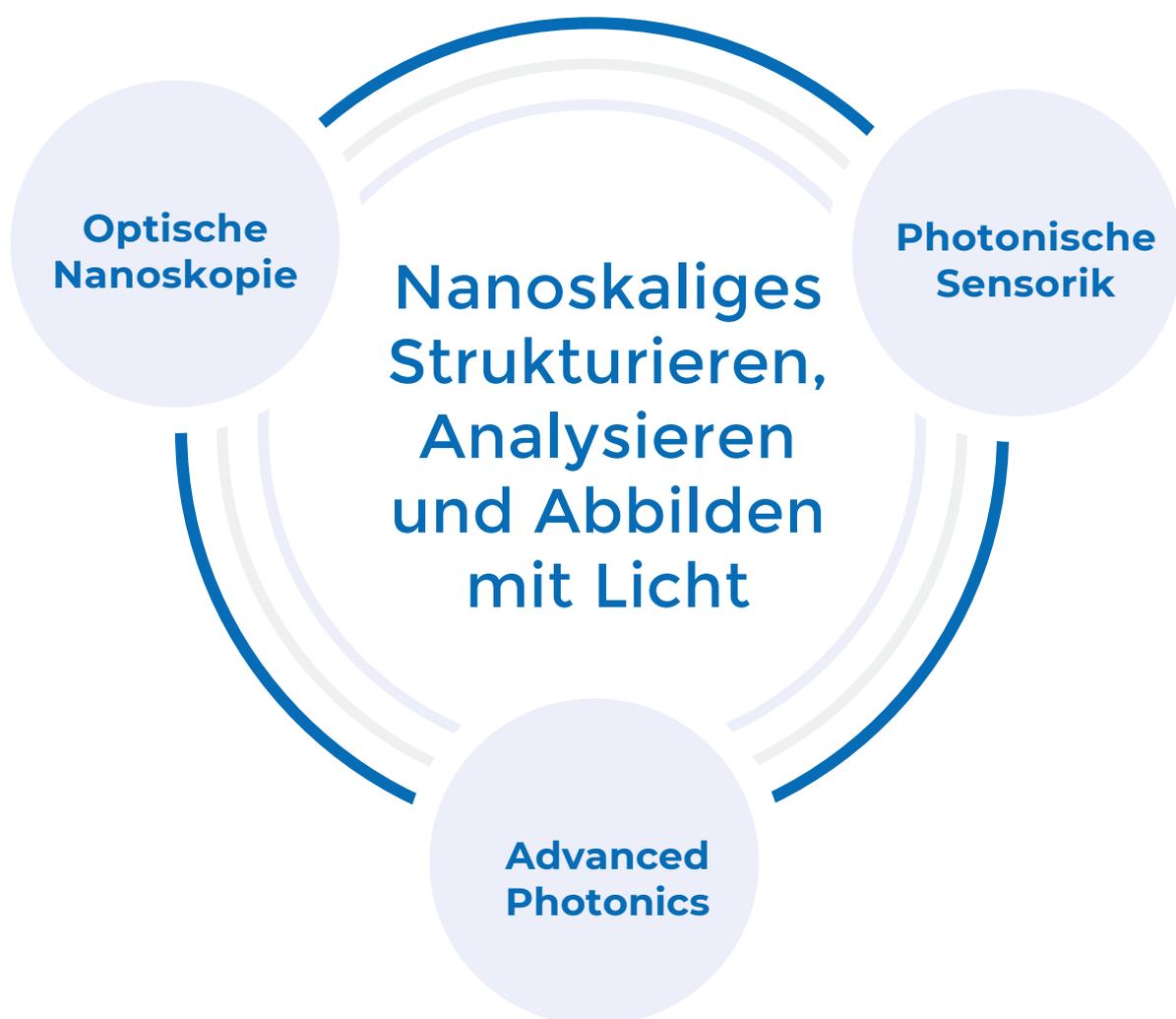
Enjoy reading





# 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 frontier 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 the worlds of 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 thanks to 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. Jürgen Troe**  
Vorstandsvorsitzender  
Universität



**Dr. Bernd Stoffregen**  
Schatzmeister  
Industrie



**Prof. Dr. Stefan W. Hell**  
Vorstandsmitglied  
Max-Planck Gesellschaft



**Prof. Dr. Claus Ropers**  
Vorstandsmitglied  
Universität

## INSTITUTSLEITUNG



**Apl. Prof. Dr. Alexander Egner**  
Institutsdirektor



**Roland Becker**  
Verwaltungsleiter

## KOMPETENZFELDER



**Apl. Prof. Dr. Alexander Egner**  
Optische Nanoskopie



**Dr. Peter Simon**  
Kurze Pulse/Nanostrukturen



**Dr. Jürgen Ihlemann**  
Kurze Pulse/Nanostrukturen



**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

**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-(0) 551/5035-33  
F +49-(0) 551/5035-99  
M [roland.becker@ifnano.de](mailto:roland.becker@ifnano.de)

### MITARBEITENDE / STAFF MEMBERS

Dirk Born  
Tatjana Kasten  
Uwe Lampe  
Olaf Mädiger

Andreas Spata  
Jutta Steckel  
Anette Zwingmann



### Betriebshaushalt

Der Betriebshaushalt im Jahr 2020 hatte ein Volumen von 4,29 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 63,8 %. Die Einnahmen aus der Industrie trugen mit 21,7 % zur Finanzierung bei.

### Investitionen

Im Jahr 2020 wurden Investitionen in die kontinuierliche Erweiterung der technologischen Ausstattung im Gesamtvolumen von 0,44 Millionen Euro getätigt.

### Personal

Am Institut für Nanophotonik Göttingen waren zum Stichtag 31.12.2020 insgesamt 46 Mitarbeiter beschäftigt, davon 35 Wissenschaftler und Techniker, was einem Anteil von 76,1 % an den Gesamtbeschäftigten entspricht. Die wissenschaftlichen Mitarbeiter verfügen mehrheitlich über einen Abschluss als M. Sc. Physik. Darüber hinaus arbeiten am Institut graduierte Photoniker, Chemiker, Informatiker und Kaufleute, die in interdisziplinären Forschungsgruppen tätig sind.

### Ausbildung und Qualifikation

Das IFNANO bietet Studentinnen und Studenten die Möglichkeit, ihr Studium mit praktischer wissenschaftlicher Arbeit in den Laboren und Werkstätten des IFNANO zu verbinden. Zum Jahresende 2020 wurden sechs wissenschaftliche und studentische Hilfskräfte betreut. Darüber hinaus konnte am IFNANO in 2020 eine Promotion in Kooperation mit der Georg-August-Universität Göttingen abgeschlossen werden.

### Operating budget

The operating budget in 2020 had a volume of 4.29 million euros. The basic funding as an important component is provided by the German State of Lower Saxony as an institutional grant. The financing share of own revenues in the operating budget was 63.8 %. Revenues from industry contributed 21.7 % to the financing.

### Investments

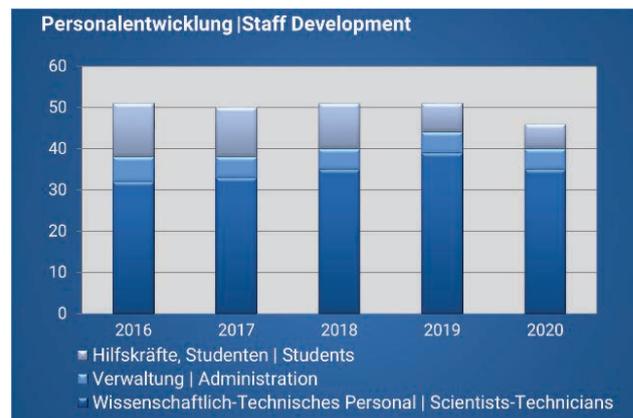
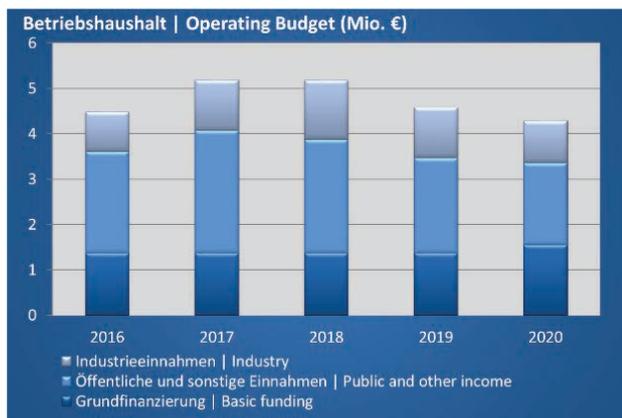
In 2020, a total of 0.4 million euros was invested in the continuous expansion of the technological equipment.

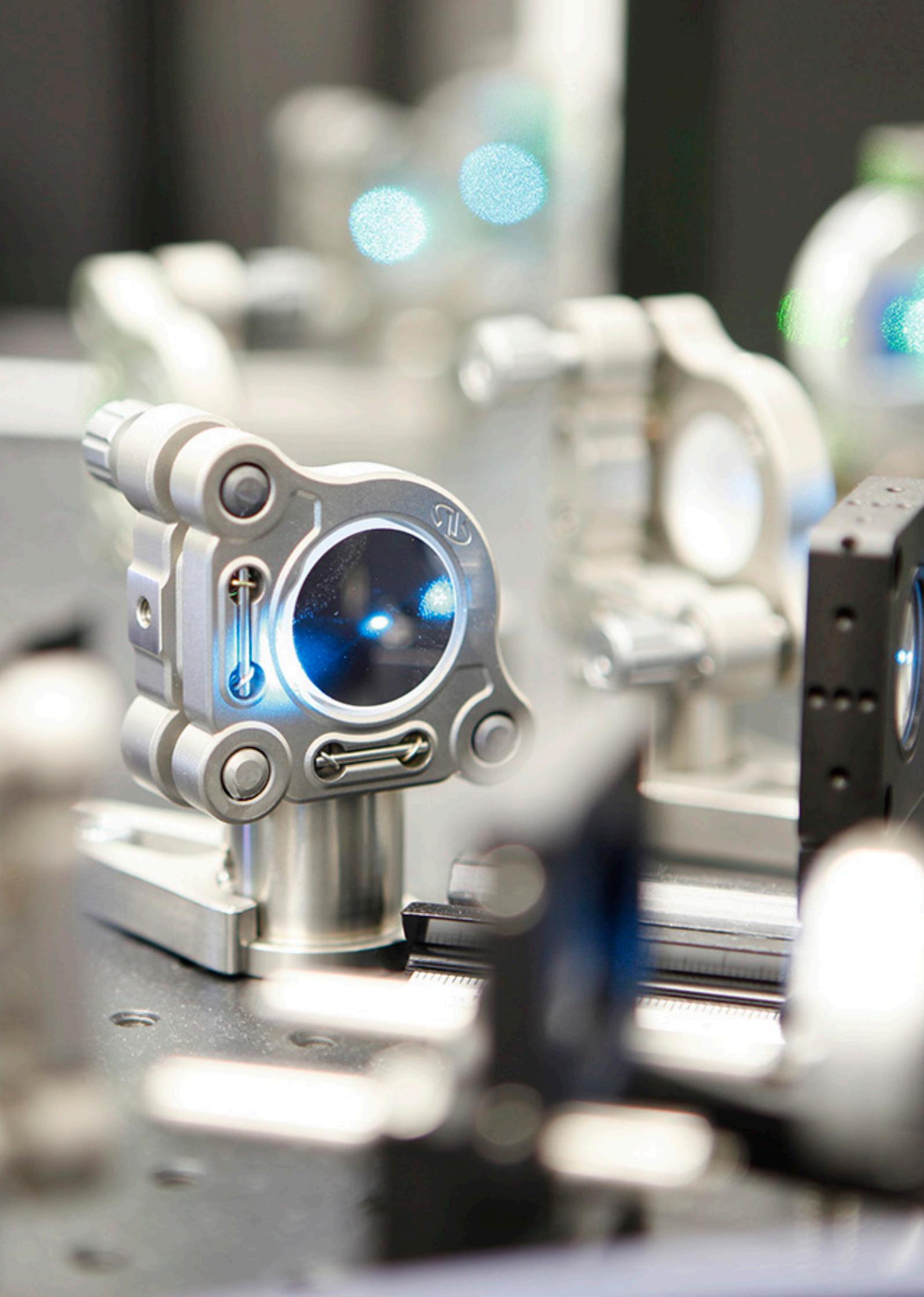
### Staff

At year-end 2020, Institut für Nanophotonik Göttingen had 46 employees, 35 of them scientists and technicians, which corresponds to 76.1 % of the total number of employees. Most of the scientific staff have a graduation as an MSc degree in physics. In addition, graduated photonics, chemists, computer scientists and business people work in interdisciplinary research groups at the institute.

### 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 2020, six students and research assistants were supported at the IFNANO. In addition, one doctoral candidate concluded their fellowship at the IFNANO in 2020 in cooperation with the Georg August Universität Göttingen.



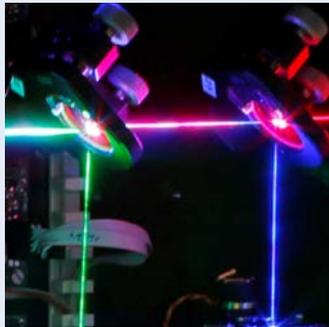


# Die Abteilungen

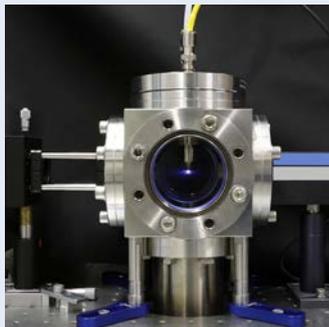
## The Departments



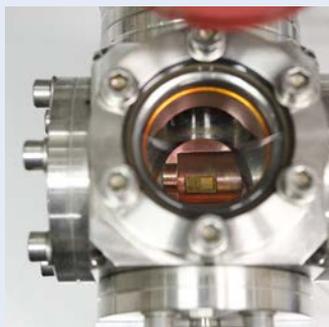
**Optische Nanoskopie**  
Optical Nanoscopy



**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-(0) 551/5035-35

F +49-(0) 551/5035-99

M [alexander.egner@ifnano.de](mailto:alexander.egner@ifnano.de)

## MITARBEITENDE / STAFF MEMBERS

Dr. Claudia Geisler

Dr. René Siegmund

Dr. Kareem Soliman

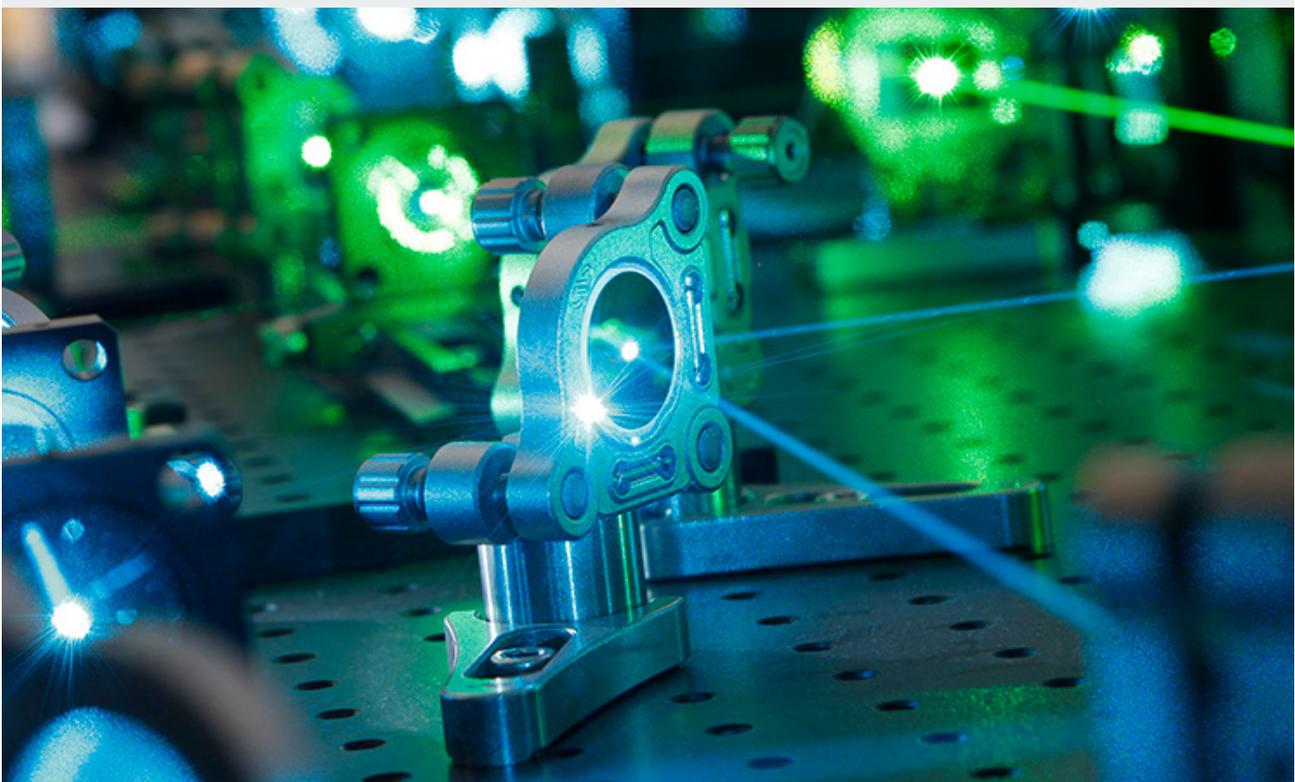
Dr. Britta Vinçon

Debadrita Ghosh

Parul Jain

Julia Kratz

Lenny Reinkensmeier



# Optische Nanoskopie

## Optical Nanoscopy

Das Beobachten der Nanowelt im Inneren von (lebenden) Zellen eröffnet einmalige Möglichkeiten zum Verständnis der dort ablaufenden molekularen Prozesse. Dieser Erkenntnisgewinn ist einer der Schlüssel für das Verständnis von Krankheiten und damit für die Entwicklung von diagnostischen Verfahren wie auch neuen Medikamenten und für deren therapeutischen Einsatz. Die konventionelle Lichtmikroskopie hat sich in den Lebenswissenschaften als ein unverzichtbares Instrument bewährt, leidet jedoch unter einer entscheidenden Einschränkung: Die durch die Wellennatur des Lichts auf 200–300 nm begrenzte Auflösung verschließt dem Betrachter die entscheidende Größenskala. Die Nanowelt bleibt verborgen.

Die hochauflösende Fluoreszenzmikroskopie umgeht diese Limitierung und bedient sich hierzu eines Tricks: Die Eigenschaften fluoreszierender Markermoleküle werden derart ausgenutzt, dass die Informationen, die sich innerhalb des Bereichs eines verwaschenen Lichtflecks befinden, sequenziell ausgelesen werden können. Die Auflösung des "optischen Nanoskops" ist dadurch nicht mehr durch die Beugung limitiert und der Blick in die Nanowelt der Zelle wird scharf. Für die Entwicklung der hochauflösenden Fluoreszenzmikroskopie wurden 2014 Stefan W. Hell, Eric Betzig und William E. Moerner mit dem Chemie-Nobelpreis ausgezeichnet. Die Abteilung "Optische Nanoskopie" befasst sich mit der anwendungsorientierten Grundlagenforschung auf diesem Gebiet und erweitert das Methodenspektrum innerhalb der hochauflösenden Fluoreszenzmikroskopie.

Taking a close look at the nanoworld inside (living) cells provides fantastic possibilities for gaining insight into the ongoing molecular processes. This knowledge is one of the keys to understanding diseases and developing new diagnostic tools, novel drugs, and their therapeutic use. Conventional light microscopy has emerged as an indispensable tool in the life sciences; however, it suffers from one major drawback. The light microscope's resolution is limited to 200–300 nm due to the wave nature of light. Therefore, the crucial dimensions stay out of reach of the observer: The nanoworld remains hidden.

Super-resolution fluorescence microscopy avoids this limitation by using a trick. The properties of fluorescent markers are used such that the information within a diffraction-limited spot is read out sequentially. As a result, the resolution of the "optical nanoscope" is no longer diffraction-limited and the nanoworld is revealed. In 2014, Stefan W. Hell, Eric Betzig, and William E. Moerner were awarded the Nobel Prize in Chemistry for the development of super-resolution fluorescence microscopy. The department of "Optical Nanoscopy" places emphasis on basic research and applications in this field, and develops new methods for high-resolution fluorescence microscopy.

# Optische Nanoskopie

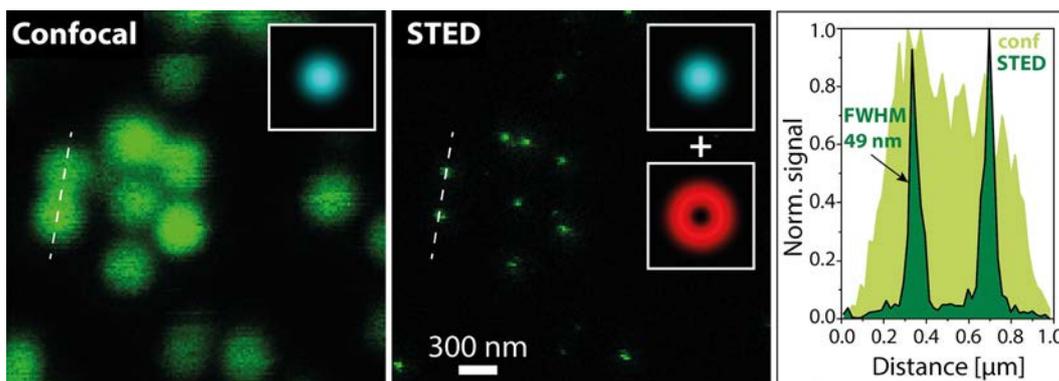
## Optical Nanoscopy

### Nanoskopie mittels stimulierter Emission: STED-Mikroskopie

Die STED-Mikroskopie ist die prominenteste Variante der ensemblebasierten Nanoskopiemethoden und erlaubt routinemäßig eine Auflösungssteigerung um mindestens eine Größenordnung. Sie nutzt den Prozess der stimulierten Emission, um Fluoreszenzmarker von einem hellen, fluoreszierenden in einen dunklen, nichtfluoreszierenden Zustand zu überführen. Typischerweise werden Fluorophore zunächst mit einem fokussierten Laserstrahl angeregt. Durch Überlagerung dieses Anregungsfokus mit einem weiteren Laserfokus werden angeregte Fluorophore durch stimulierte Emission am Fluoreszieren gehindert. Hat dieser sogenannte STED-Laserfokus eine Ringform mit einer zentralen Intensitätsnull, so werden Moleküle am Rand ausgeschaltet, Moleküle im Zentrum aber nicht beeinflusst. Daraus ergibt sich eine räumliche Einengung des fluoreszierenden Bereichs, was gleichbedeutend mit einer Auflösungsverbesserung ist. Zur Bilderstellung wird dieser eingengte fluoreszierende Bereich pixelweise durch das Bildfeld gerastert.

### Nanoscopy using stimulated emission: STED microscopy

STED microscopy is the most prominent technique among the ensemble-based nanoscopy methods, and routinely achieves a resolution increase of at least one order of magnitude. It uses stimulated emission to “switch” fluorescent markers from a bright, fluorescent state to a dark, non-fluorescent state. Typically, fluorophores are excited by a focused laser beam. By superimposing this excitation focus with another laser focus, the excited fluorophores are prevented from fluorescing by stimulated emission. If this so-called STED laser focus has a ring shape with a central intensity zero, molecules at the rim are switched off, while molecules in the center are not influenced. This results in a spatial narrowing of the fluorescent area, which is synonymous with an improvement in resolution. The STED image is recorded by scanning the confined fluorescent spot through the field of view pixel by pixel.



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.

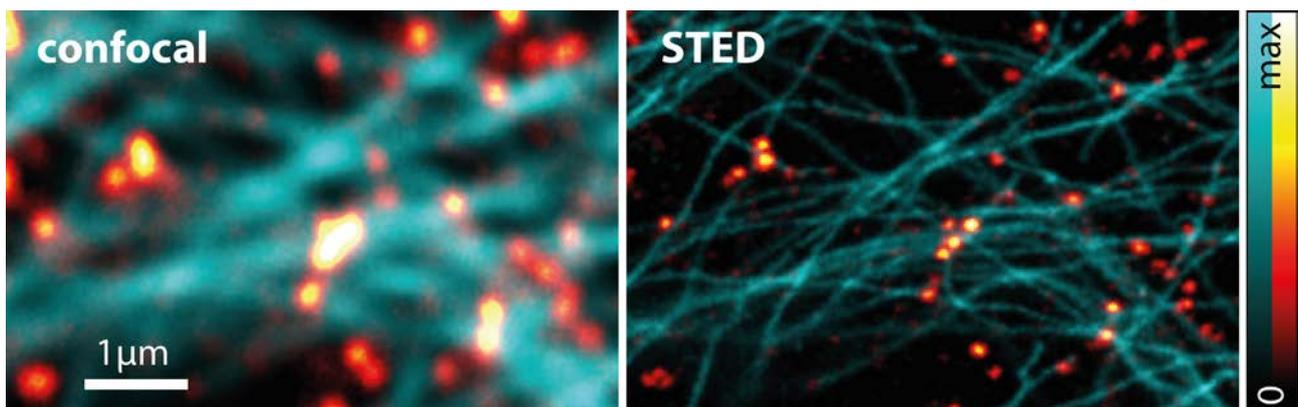
Confocal (left) and STED image (center) of fluorescent microspheres. The insets show the focal intensity distributions used in each case (excitation: cyan, STED: red). The graph (right) illustrates the resolution improvement with the help of intensity profiles along the dashed white lines.

# Optische Nanoskopie

## Optical Nanoscopy

Die Auflösung des STED-Bildes, die durch die Ausdehnung des fluoreszierenden Bereichs bestimmt wird, hängt somit von der Intensität des STED-Strahls und den photophysikalischen Eigenschaften der verwendeten Fluoreszenzmarker ab. Theoretisch kann die Auflösung beliebig gut werden und experimentell werden derzeit problemlos wenige zehn Nanometer erreicht. Für viele biologische Fragestellungen ist es interessant, die relative räumliche Verteilung zweier unterschiedlicher Proteinsorten in hoher Auflösung zu untersuchen. Aus einer farbkodierten Ortsdarstellung lassen sich dann Rückschlüsse auf die Funktion und Interaktion der Proteine ziehen. Unsere technische Realisierung eines entsprechenden STED-Mikroskops erreicht Hochauflösung in zwei Farbkanälen mit nur einem STED-Laser. Die Überlagerung beider Kanäle ist dadurch unabhängig von Justage und chromatischen Aberrationen. Zudem werden sie quasisimultan mit minimalem Übersprechen aufgenommen, wovon die Bildqualität und die Nutzerfreundlichkeit des Mikroskops deutlich profitieren.

The resolution of the STED image, which is given by the extent of the fluorescent area, depends on the applied STED intensity and the photophysical properties of the fluorophore. Theoretically, the resolution can get as good as required, and, experimentally, a few tens of nanometers can currently be achieved without any problem. For many biological questions, it is interesting to investigate the relative spatial distribution of two different types of proteins at high resolution. From the color-coded images of locations, conclusions can then be drawn regarding the protein's function and their interaction. Our technical implementation of a suitable STED microscope achieves high resolution in two color channels with only one STED laser. Hereby, the overlap of both channels is independent of alignment and chromatic aberrations. Also, both are acquired quasi-simultaneously with minimal crosstalk, from which the image quality and user friendliness benefit tremendously.



▲ Zweifarbiges Mikroskopbild in konfokaler Auflösung (links) und in Hochauflösung (rechts). Gezeigt sind das Mikrotubulinetzwerk (cyan) und Clathrin (gelb-rot) in einer U2-OS-Zelle.  
Two-color microscopy image in confocal (left) and in high resolution (right). Shown are the microtubule network (cyan) and clathrin (yellow-red) in a U2-OS cell.

# Optische Nanoskopie Optical Nanoscopy

## Schnellere und probenschonendere STED-Mikroskopie durch Pixel-Hopping

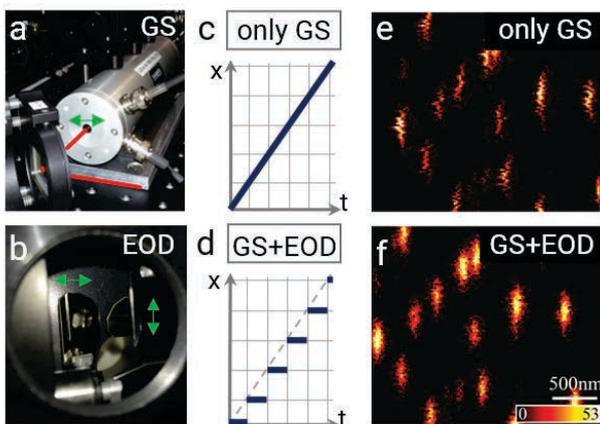
Für die Visualisierung schneller dynamischer Prozesse in lebenden Zellen sind sowohl die erreichbare zeitliche Auflösung als auch die Bildqualität von großer Bedeutung. Bei der Fluoreszenznanoskopie ist die Bildqualität in der Regel durch Photobleichen und die daraus resultierende Phototoxizität begrenzt. Besonders kritisch ist es, die richtige Balance zwischen einem guten Signal-Rausch-Verhältnis, das eine relativ hohe Lichtdosis erfordert, und der Lebensfähigkeit der Zellen zu finden. Die Reduzierung der auf die Probe einwirkenden Lichtdosis bei unverminderter Bildqualität ist daher eine Herausforderung für alle hochauflösenden Bildgebungsverfahren. Die meisten bekannten Techniken, die eine Reduzierung der Lichtdosis erreichen, übertragen diese nicht in eine schnellere Bildaufnahme und damit eine bessere zeitliche Auflösung. Dies ist auch für das RESCue-Schema der Fall, bei dem die Laser unter adäquaten Bedingungen während der Bildaufnahme zeitweise ausgeschaltet werden.

Wir haben mit FastRESCue eine Variante von RESCue entwickelt, bei der, anstatt die Laser auszuschalten, die nächste Pixelposition direkt angefahren werden kann. Damit wird STED-Mikroskopie mit geringer Lichtdosis und zusätzlich deutlich kürzeren Aufnahmezeiten möglich.

## Fast and sample-friendly STED microscopy enabled by pixel-hopping

For the visualization of fast dynamic processes in living cells, both the achievable temporal resolution and the image quality are of great importance. In fluorescence nanoscopy, the image quality is usually limited by photobleaching and, as a result, phototoxicity. Finding the right balance between a good signal-to-noise ratio, which necessitates a relatively high light dose, and cell viability is particularly critical. Reducing the light dose imposed on the sample at uncompromised image quality is thus a challenge for all high-resolution imaging techniques. Until now, most techniques which achieve a reduction of the light dose, do not transfer this reduction into a faster image recording and thus a better temporal resolution. This is also the case for the RESCue scheme, in which lasers are shut off under adequate conditions during the image acquisition.

With FastRESCue we have developed a variant of RESCue, where instead of switching off the lasers, the next pixel position can be directly addressed. This enables STED imaging with low light dose and considerably shorter acquisition times.



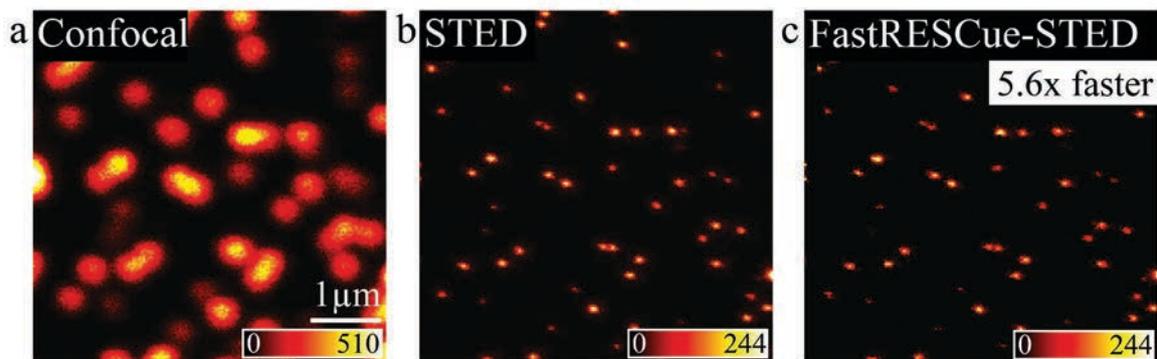
◀ Kombiniertes Scansystem. a) Foto der Scannerspiegel eines galvanometrischen Scanners (GS) und b) Foto eines elektrooptischen Deflektors (EOD). c) Mit dem GS lassen sich große Scanbereiche und d) mit der Kombination beider zudem eine kurze Reaktionszeit realisieren. e), f) Für eine verzerrungsfreie Bildgebung mit variablen Pixelverweildauern ist die Verwendung von EODs zusätzlich zum GS zwingend erforderlich. Combined scanning system. a) Photo of the scanning mirrors of a galvanometric scanner (GS) and b) photo of an electro-optical deflector (EOD). c) With the GS, large scan areas can be realized and d) with the combination of both also a short response time. e), f) For distortion-free imaging with variable pixel dwell times, the use of EODs in addition to the GS is mandatory.

# Optische Nanoskopie

## Optical Nanoscopy

Wesentlich für diese Verbesserung war ein modifiziertes Scansystem: Durch die Kombination eines Galvanometer-Scanners und elektrooptischer Deflektoren (EODs) konnte ein Scansystem mit geringerer Latenzzeit, aber dennoch großem Bildfeld realisiert werden. Damit kann das Mikroskop jede Position im Bildfeld sofort adressieren und ist nicht auf die typischen Scan-Muster beschränkt. Insbesondere ermöglicht dieses Pixel-Hopping eine verzerrungsfreie Abbildung bei variierenden Pixelverweildauern. In Verbindung mit einer gleichzeitigen pixelbasierten Analyse des Fluoreszenzsignals kann so eine smarte und probenstrukturspezifische Steuerung der Scan-Position und der Pixelverweildauer realisiert werden. Am Beispiel von RESCue-basierter STED-Bildgebung haben wir gezeigt, dass mit diesem kombinierten Scansystem eine Lichtdosisreduktion nahezu vollständig in eine schnellere Aufnahmezeit überführt werden kann. Insbesondere kann unser neues FastRESCue-Bildgebungsschema die Aufnahme von biologischen Proben lokal bis zu 10-fach beschleunigen und ermöglicht insgesamt eine 5-mal schnellere Aufnahme bei nur 20 % der Lichtdosis im Vergleich zur klassischen STED-Mikroskopie. In Zukunft wird Pixel-Hopping daher die Echtzeit-Aufnahme schneller molekularer Prozesse in lebenden Zellen erleichtern.

Essential for this improvement was an adapted scan system. With the combination of a galvanometer scanner and electro-optic deflectors (EODs), a scan system with low latency, but nonetheless a large field of view could be realized. With this, the microscope can address any position in the field of view instantaneously and is not restricted to typical scan patterns. In particular, this pixel-hopping allows distortion-free imaging at varying pixel dwell times. In conjunction with online pixel-based fluorescence signal analysis, a smart and sample structure-specific control of the scan position and the pixel dwell time can be implemented. For the example of RESCue-based STED imaging, we showed that by means of pixel-hopping, a reduction in light dose can almost completely be transferred into a faster recording time. In particular, in biological samples, our new FastRESCue imaging scheme is able to speed up the acquisition locally up to 10-fold, and allows overall for a 5-fold faster acquisition at only 20 % of the light dose compared to classical STED microscopy. In future, pixel-hopping will thus facilitate real-time imaging of fast molecular processes in living cells.



FastRESCue reduziert Lichtdosis und Aufnahmezeit. a)-c) Bilder von fluoreszierenden Mikrokugeln mit 48 nm Durchmesser für a) konfokale, b) STED- und c) FastRESCue-STED-Aufnahme. Die gewählten RESCue-Parameter führen zu einer Lichtdosis von 15,9 % und einer Bildaufnahmezeit von 17,8 % im Vergleich zur Standard-STED-Aufnahme.

FastRESCue reduces light dose and frame time. a)-c) Images of fluorescent microspheres of 48 nm diameter for a) confocal, b) STED and c) FastRESCue-STED acquisition. The chosen RESCue parameters result in a light dose of 15.9 % and a frame time of 17.8 % compared to the standard STED acquisition.

# Optische Nanoskopie

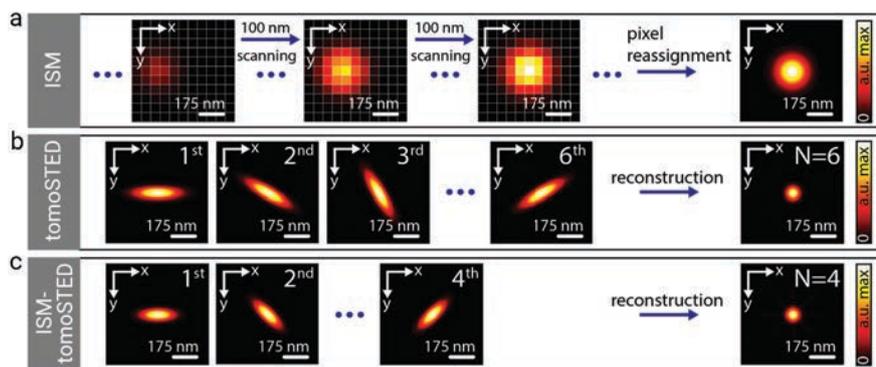
## Optical Nanoscopy

### Tomographische STED-Mikroskopie profitiert vom Prinzip der Image-Scanning-Mikroskopie

Die tomographische STED-Mikroskopie ist eine probenschonende Variante der STED-Mikroskopie und erreicht die gleiche Bildqualität bei nur einem Viertel der Lichtdosis. Dies ist insbesondere vorteilhaft für biologische Anwendungen, bei denen oft das Photobleichen und lichtinduzierte Probenschädigungen die Qualität der Bildgebung limitieren. Das Grundprinzip der tomoSTED-Mikroskopie basiert auf der Einschränkung des fluoreszierenden Bereichs in nur eine Richtung statt wie in der klassischen STED-Mikroskopie in zwei Richtungen. Ein zweidimensional hochaufgelöstes Bild lässt sich aus einer Serie von Einzelbildern rekonstruieren, die jeweils eine unterschiedliche Ausrichtung der hochaufgelösten Achse haben. Die Anzahl der hierfür erforderlichen Ausrichtungen hängt dabei vom Verhältnis der Auflösungen entlang der beugungslimitierten und der hochaufgelösten Achse ab.

### Tomographic STED microscopy benefits from the principle of image scanning microscopy

Tomographic STED microscopy is a sample-gentle variant of STED microscopy, which achieves the same image quality at only one-quarter of light dose. This is particularly beneficial for biological applications, in which photobleaching and light-induced sample damage often limit the imaging performance. The principle of tomoSTED microscopy is based on the one-dimensional confinement of the fluorescent area. This is in contrast to classical STED microscopy, where the fluorescent area is confined in two dimensions. A super-resolved two-dimensional image is then reconstructed from a series of single images, each exhibiting a different orientation of the high-resolution axis. The number of orientations required for reconstruction depends on the ratio of the resolution along the diffraction-limited and high-resolution axis.



Methodenschema. a) Image-Scanning-Mikroskopie: An jeder Scanposition wird die Fluoreszenz auf einem Pixeldetektor abgebildet. Durch geeignete Signalzuordnung kann die beugungsbegrenzte Auflösung um das  $\sqrt{2}$ -fache verbessert werden. b) tomoSTED-Mikroskopie: Eine Serie von Einzelbildern wird mit jeweils unterschiedlich orientierter hochaufgelöster Achse aufgenommen und daraus das zweidimensional hochaufgelöste Bild rekonstruiert. c) ISM-unterstützte tomoSTED-Mikroskopie: Zunächst wird die beugungsbegrenzte Achse der einzelnen tomoSTED-Bilder über die Signalzuordnung um das  $\sqrt{2}$ -fache verbessert. Dies führt zu einer Reduzierung der notwendigen Anzahl von Orientierungen für die anschließende tomoSTED-Rekonstruktion um den gleichen Faktor.

Schematics of the methods. a) Image scanning microscopy: at each scan position, the fluorescence is imaged onto a pixel detector. Via appropriate signal reassignment, the diffraction-limited resolution can be improved  $\sqrt{2}$ -fold. b) TomoSTED microscopy: a series of single images, each with a differently oriented high-resolution axis, is recorded and a two-dimensionally super-resolved image is reconstructed therefrom. c) ISM-assisted tomoSTED microscopy: The diffraction-limited axis of the single tomoSTED images is first improved  $\sqrt{2}$ -fold via signal reassignment. This leads to a reduction of the required number of orientations for the subsequent tomoSTED reconstruction by the same factor.

# Optische Nanoskopie

## Optical Nanoscopy

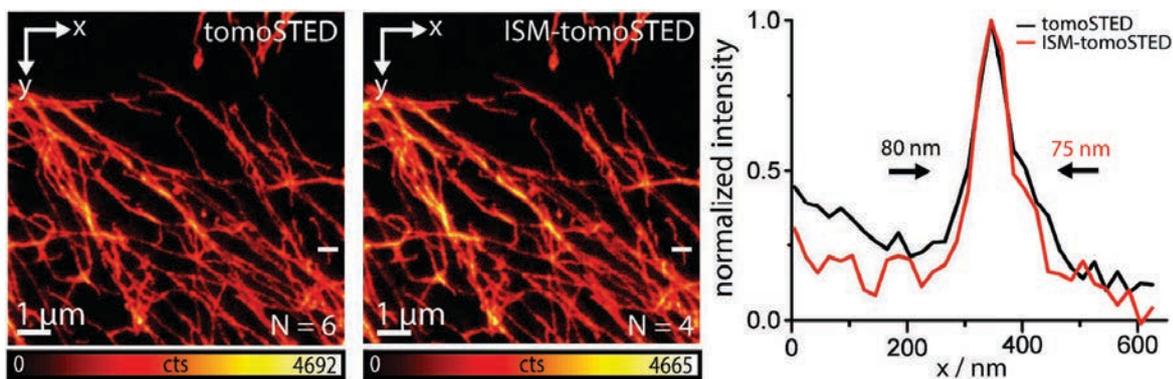
Die Methode bietet eine interessante Möglichkeit zur weiteren Verbesserung: Es ist bekannt, dass die Image-Scanning-Mikroskopie (ISM) die beugungslimitierte Auflösung eines Rastermikroskops um bis zu einem Faktor  $\sqrt{2}$  verbessern kann, ohne dabei Fluoreszenzsignal einzubüßen. In einem vom BMWi geförderten Projekt kombinieren wir daher die tomoSTED-Mikroskopie mit dem ISM-Prinzip. Dazu implementierten wir ein tomoSTED-Mikroskop mit ISM-Detektion und erweiterten die ISM-Rekonstruktionsalgorithmen auf asymmetrische Punktverteilungsfunktionen beliebiger Orientierung.

Wir konnten zeigen, dass sich die durch ISM-Unterstützung verbesserte Auflösung in beugungslimitierter Richtung in eine geringere Zahl an für die Rekonstruktion erforderlichen Einzelbilder übertragen lässt. Hierdurch reduziert sich die Bildaufnahmezeit entsprechend. Sowohl in Simulationen als auch im Experiment liegt die Verbesserung in etwa bei einem Faktor von  $\sqrt{2}$ . Unter typischen Aufnahmebedingungen entspricht dies insgesamt einer sechsfachen Reduzierung der benötigten Lichtdosis im Vergleich zu einem klassischen STED-Mikroskop.

The method offers an interesting possibility for further improvement: It is well known that image scanning microscopy (ISM) enables improving the resolution of a scanning microscope by a factor of  $\sqrt{2}$  without loss in fluorescence signal.

Within a project funded by the BMWi, we therefore combine tomoSTED microscopy with the ISM concept. To this end, we implemented a tomoSTED microscope with ISM detection and extended the ISM reconstruction algorithms to asymmetric point spread functions of arbitrary orientation.

We have shown that the ISM-improved resolution along the diffraction-limited direction translates into a reduction of the number of orientations needed for reconstruction. Thus, the total acquisition time is accordingly reduced. Both in simulations as well as in experiments, the improvement is approximately a factor of  $\sqrt{2}$ . Under typical image acquisition conditions, this corresponds to an overall six-fold reduction of the required light dose as compared to a classical STED microscope.



▲ Hochaufgelöste Bilder des fluoreszenzmarkierten Mikrotubuli-Netzwerks zeigen eine vergleichbare Auflösung und Bildqualität für tomoSTED-Aufnahmen mit sechs Orientierungen und für ISM-tomoSTED-Aufnahmen mit vier Orientierungen.

Super-resolved images of the fluorescently labeled microtubule network show comparable resolution and image quality for tomoSTED imaging with six orientations and for ISM-tomoSTED imaging with four orientations.

# Optische Nanoskopie

## Optical Nanoscopy

### IsoSTED-Mikroskopie von lebenden Zellen mit reduziertem Hintergrundsignal

Um dreidimensional ausgedehnte Strukturen objektgetreu abbilden zu können, ist eine identische Auflösung in allen drei Raumrichtungen notwendig. Mit unserem im Rahmen des SFB 755 für die Untersuchung von lebenden Zellen entwickelten isoSTED-Mikroskop können wir eine isotrope Hochauflösung von besser als 60 nm erreichen. Dies entspricht einer Reduktion des Fokusvolumens von weit mehr als zwei Größenordnungen im Vergleich zur konfokalen Mikroskopie.

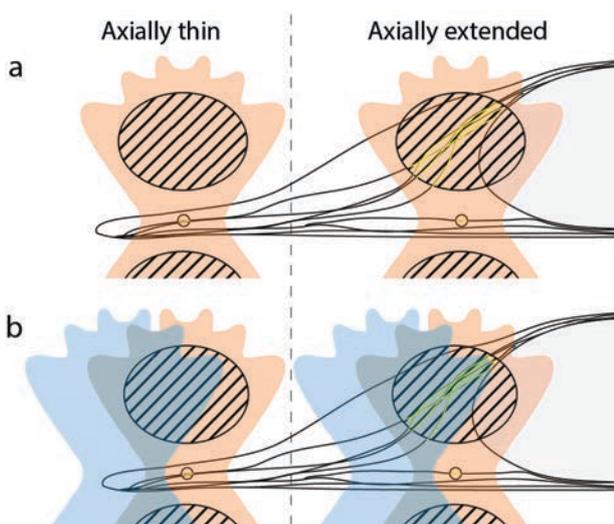
In diesem Zusammenhang wurde eine Herausforderung für die STED-Mikroskopie bei Auflösungen weit jenseits der Beugungsgrenze deutlich. Da das Detektionsvolumen nach wie vor beugungsbegrenzt ist, tragen bei ausgedehnten Proben auch Regionen oberhalb und unterhalb der Fokalebene signifikant zum Gesamtsignal bei. Diese Beiträge stammen von nicht ausreichend unterdrückter Fluoreszenz außerhalb des Fokus und treten bei jeder STED-Implementierung auf, bei der die Auflösung in axialer Richtung deutlich gesteigert wird. Daher haben wir eine Methode entwickelt, um diese unerwünschten Signalanteile gezielt zu bestimmen und zu entfernen.

### Live-cell isoSTED microscopy with reduced background signal

To image three-dimensional structures accurately, an identical resolution is required in all three spatial directions. With our live-cell-compatible isoSTED microscope, which has been developed within the scope of the SFB 755, we achieve an isotropic super-resolution better than 60 nm. This corresponds to a reduction of the focal volume by far more than two orders of magnitude as compared to confocal microscopy.

In this context a challenge for STED microscopy at resolutions well beyond the diffraction limit became evident. As the detection volume is still diffraction-limited, regions above and below the focal plane also contribute significantly to the overall signal in extended samples. These contributions originate from not sufficiently depleted fluorescence in out-of-focus regions, and can be observed in any STED implementation where the resolution is significantly increased in the axial direction.

That is why we have developed a method to selectively determine and remove these unwanted signal components.



- ◀ Signalbeiträge. a) Dargestellt sind zwei typische Szenarien bei der isoSTED-Bildgebung. Während in axial dünnen Probenbereichen (links) nur der Hauptfokus (kleiner Kreis) zum Signal beiträgt, tragen in ausgedehnten Probenbereichen (rechts) auch axial entfernte Strukturen bei. b) Ein lateral verschobener Detektionskanal (blau) detektiert nur das unerwünschte Signal, nicht aber das Signal aus dem Hauptfokus.
- Signal contributions. a) Two typical scenarios when imaging filaments with isoSTED microscopy are illustrated. While in axially thin sample regions (left) only the main focus (small circle) contributes to the signal, in axially extended sample regions (right) also axially distant structures contribute. b) An offset detection channel (blue) only detects the unwanted signal and not the signal from the main focus.

# Optische Nanoskopie

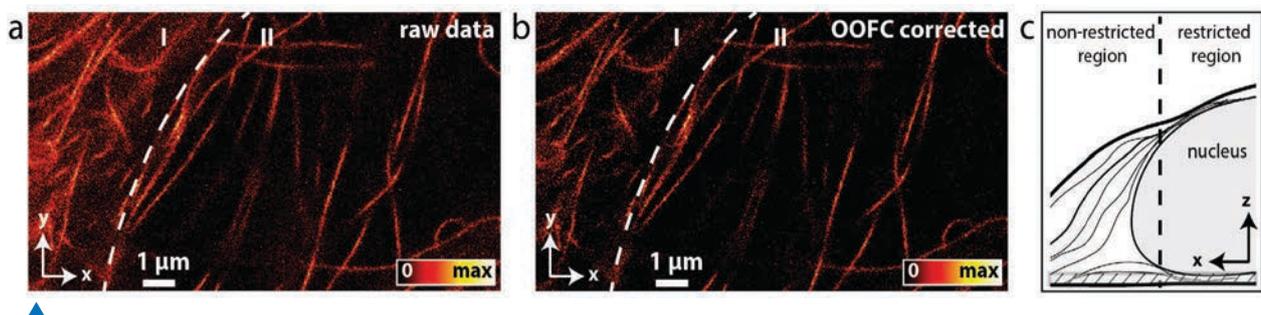
## Optical Nanoscopy

Unser Ansatz benötigt keine A-priori Informationen über die Probe oder die Punktverteilungsfunktionen und beruht auf folgendem Prinzip: Wenn ein Detektor orthogonal zur optischen Achse verschoben wird, verschiebt sich entsprechend auch sein Detektionsvolumen. Dies kann derart erfolgen, dass das Signal aus dem Hauptfokus nicht mehr detektiert wird, sondern nur noch Anteile der unerwünschten Beiträge von oberhalb und unterhalb der Fokalebene. Um das gesamte Hintergrundsignal zu erfassen, werden mehrere, symmetrisch um das Zentrum angeordnete Detektionskanäle benötigt.

Experimentell realisieren wir dies mit einer Multi-kernfaser. Der zentrale Faserkern wird als Hauptdetektionskanal verwendet, die symmetrisch darum angeordneten weiteren Faserkerne als seitlich verschobene Detektionskanäle. Das von Letzteren detektierte Signal wird geeignet skaliert und vom Signal des Hauptkanals subtrahiert, wodurch nur das gewünschte Signal aus dem Hauptfokus übrig bleibt. Am Beispiel von isoSTED-Aufnahmen des Mikrotubuli-Netzwerks in lebenden Zellen konnten wir zeigen, dass diese Methode der Hintergrundentfernung die Bildqualität deutlich verbessert, insbesondere in axial ausgedehnten und hell angefärbten Bereichen der Zelle.

Our approach does not require a priori information about the sample or the point spread functions and is based on the following principle: When a detector is shifted orthogonally with respect to the optical axis, its detection volume is also shifted accordingly. This can be realized in such a way that signal from the main focus is no longer detected, but only portions of the unwanted contributions from above and below the focal plane. To detect the entire out-of-focus signal, several detection channels arranged symmetrically around the center are required.

Experimentally, we realize this by means of a multi-core fiber. The central fiber core is used as the main detection channel, while the other fiber cores arranged symmetrically around this core are used as laterally displaced detection channels. The signal detected by the latter is suitably scaled and subtracted from the main channel's signal, resulting in the desired signal from the main focus. Taking isoSTED images of the microtubule network in living cells as an example, we were able to show that this approach of background removal significantly improves the image quality, especially in axially extended and brightly stained regions of the cell.



Hintergrundkorrigierte isoSTED-Bildgebung: a) Rohdaten und b) hintergrundkorrigierte Daten einer isoSTED-Messung des Mikrotubuli-Netzwerks in lebenden Zellen. Die gestrichelte weiße Linie zeigt die ungefähre Position der Kernmembran und trennt axial nicht eingeschränkte (links) und axial eingeschränkte (rechts) Bereiche in der Zelle. c) Darstellung eines x-z-Schnitts durch eine Zelle, wobei der schraffierte Bereich am unteren Rand die Position der in a) und b) dargestellten x-y-Schnitte anzeigt.

Background-corrected isoSTED imaging: a) Raw data and b) background-corrected data of an isoSTED measurement of the microtubule network in living cells. The dashed white line indicates the approximate position of the nuclear envelope and separates axially non-restricted (left) and axially restricted (right) regions within the cell. c) Illustration of an x-z section through a cell, where the hashed region at the bottom indicates the position of the x-y sections displayed in a) and b).

# Optische Nanoskopie

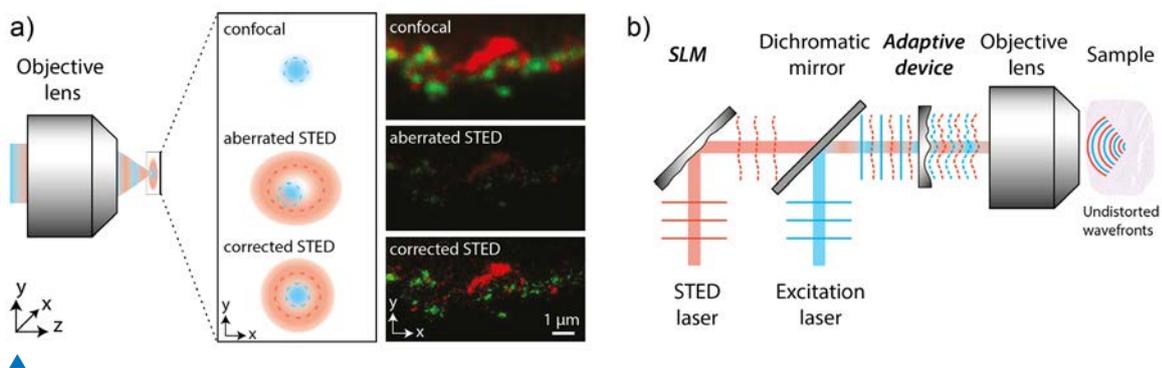
## Optical Nanoscopy

### Schnelle Aberrationskorrektur für die STED-Mikroskopie

Der Trend in der biomedizinischen Forschung hin zu minimalinvasiver Probenpräparation, zum Beispiel für die Untersuchung von Gewebeschnitten oder Modellorganismen, stellt eine immer größer werdende Herausforderung dar, denn probeninduzierte Aberrationen können die Bildqualität signifikant beeinträchtigen und sogar hochauflösende Fluoreszenzmikroskopie unmöglich machen. Die adaptive Optik (AO) ist ein vielversprechendes Werkzeug zur Aberrationskorrektur in der Mikroskopie und Nanoskopie, allerdings ist hierfür entweder eine direkte Messung der Wellenfront nötig oder das detektierte Fluoreszenzsignal selbst muss analysiert und hieraus eine geeignete Maßzahl abgeleitet werden. 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.

### Fast aberration correction for STED microscopy

The trend in biomedical research towards minimally invasive sample preparation, e. g. for investigation of tissue sections or model organisms, poses an increasing challenge, since sample-induced aberrations can severely impair the image quality or even make high-resolution microscopy impossible. Adaptive optics (AO) is a promising tool for aberration correction in microscopy and nanoscopy. However, it either requires direct measurement of the laser's wavefront or, preferably, the detected fluorescence signal itself must be analyzed and a suitable metric thereof derived. Up to now, image properties such as brightness and sharpness have been used for such a metric, which requires repeated image recordings. This approach is therefore slow, and leads to increased photobleaching, which can cause not only errors in the aberration correction, but also a greatly reduced image brightness.



(a) Schema der Auswirkungen von Aberrationen auf die Bildqualität. Fokale Intensitätsverteilung des Anregungs- und des STED-Lichts (links) und resultierende Bildqualität (rechts). b) Adaptive Elemente im Strahlengang korrigieren die probeninduzierten Aberrationen, so dass die Wellenfronten in der Probe nicht gestört sind und eine optimale Bildqualität erreicht werden kann.

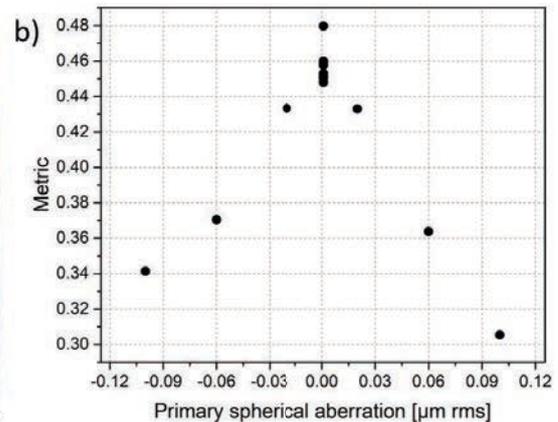
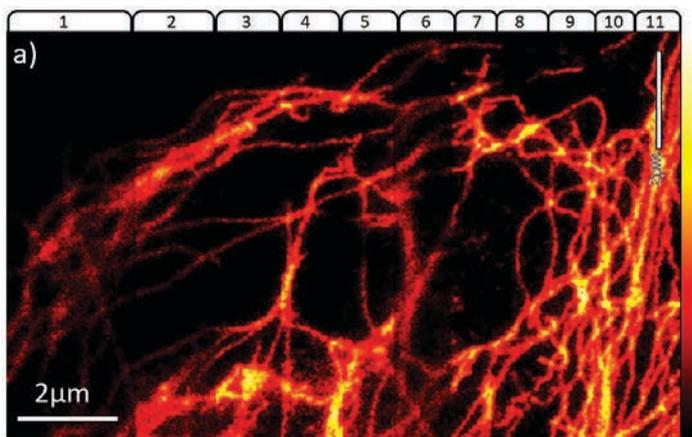
(a) Schematic of the effects of aberrations on the image quality. Focal intensity distribution of the excitation and the STED light (left) and resulting image quality (right). b) Adaptive elements in the beam path compensate sample-induced aberrations so that the wavefronts in the sample are not distorted and the optimal image quality can be achieved.

# Optische Nanoskopie

## Optical Nanoscopy

Statt eine Bildmetrik für die AO-basierte Aberrationskorrektur zu verwenden, analysieren wir den Fluoreszenz-Photonenstrom und nutzen dabei die Tatsache aus, dass die Fluoreszenzlebensdauer von der lokalen STED-Intensität abhängt. Die hieraus abgeleitete photonenstrombasierte Metrik ist unabhängig von Probeneigenschaften wie Struktur und Helligkeit. Daher kann die Aberrationskorrektur schnell, insbesondere kontinuierlich und ortsabhängig während der STED-Bilderfassung durchgeführt werden, wobei das begrenzte Budget an Fluoreszenzphotonen effizient genutzt wird. Infolge eines gemeinsamen Projekts hat die Mikroskopie-Firma Abberior Instruments ein Modul für adaptive Optik in ihr STED-Mikroskopie-Produktportfolio aufgenommen. Mögliche Anwendungen umfassen nicht nur die Abbildung tief aus dem Inneren inhomogener Proben, sondern auch die Erweiterung der Arbeitstiefe von Objektiven in Brechungsindex-fehlangepassten Proben.

Instead of using an image metric for AO-based aberration correction, we analyze the fluorescence photon stream and hereby exploit the fact that the fluorescence lifetime depends on the local STED intensity. This photon stream-based metric is independent of sample properties like structure and brightness. Therefore, aberration correction can be performed fast, in particular continuously and location dependent during the STED image acquisition, while making efficient use of the limited fluorescence photon budget. As a result of a joint project, the microscopy company Abberior Instruments introduced an adaptive optics module into their STED microscopy product portfolio. Potential applications not only include imaging deep into inhomogeneous samples, but also extending the working depth of objective lenses in refractive-index mismatched samples.



▲  
 Automatische Aberrationskorrektur mit Hilfe der photonenstrombasierten Metrik. a) STED-Bild des Vimentinnetzwerks zeigt von links nach rechts die schrittweise Optimierung. Die Klammern markieren die einzelnen Iterationsschritte, die zur besseren Visualisierung länger als nötig gewählt wurden. b) Die entsprechenden Metrikwerte zeigen ein Maximum für die optimale Bildqualität. Automatic aberration correction with the photon stream-based metric. a) STED image of vimentin network illustrates from left to right the stepwise optimization. The brackets mark the individual iteration steps which were selected longer than necessary for better visualization. b) The corresponding metric values show a maximum for optimal aberration strength.

# Optische Nanoskopie

## Optical Nanoscopy

### Nanoskopie an opaken Proben unter Verwendung von photochromen Dünnschichten

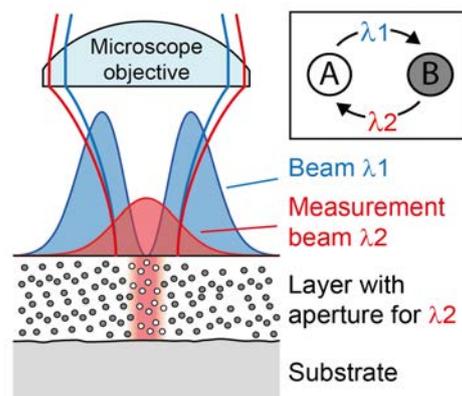
Die Eigenschaften von Verbundwerkstoffen werden stark von ihren mikrostrukturellen Merkmalen beeinflusst. Die Größe dieser Merkmale kann von mehreren Mikrometern bis hin zu wenigen Nanometern variieren. Beispielsweise verfügen moderne Metalle über hervorragende Festigkeit und Elastizität, was durch geringe Korngrößen weit unter einem Mikrometer bei einer entsprechenden chemischen Zusammensetzung erreicht wird. Aufgrund der Beugungsgrenze reicht das Auflösungsvermögen optischer Mikroskope für die Analyse solcher Metalllegierungen nicht aus, so dass auf aufwändigere und kostspieligere Mikroskopiemethoden, wie z. B. die Rasterelektronenmikroskopie, zurückgegriffen werden muss. Um die Auflösung der optischen Mikroskope bei Werkstoffuntersuchungen zu steigern, kann das STED-Prinzip nicht direkt angewendet werden, da die Werkstoffstruktur auf der Oberfläche nicht mit Farbstoffen markiert werden kann. Aus der optischen Lithographie ist jedoch bekannt, dass mit Hilfe von photochromen Dünnschichten, die unter Bestrahlung ihre Absorptionseigenschaften reversibel ändern, eine Auflösungsverbesserung erreicht werden kann. Diese wurde bereits für die Transmissionmikroskopie theoretisch und experimentell bestätigt, jedoch nicht für Messungen in Reflexion.

Schema zur Erzeugung einer dynamischen Blende in einer dünnen photochromen Schicht. Licht der Wellenlänge  $\lambda_1$  (blau) schaltet die Photochrome (Kreise) von einem für die Messwellenlänge  $\lambda_2$  (rot) transparenten Zustand A in einen für  $\lambda_2$  opaken Zustand B. Das Rückschalten erfolgt durch die Messwellenlänge  $\lambda_2$ .  
 Scheme for the generation of a dynamic aperture in a thin photochromic layer. Light with wavelength  $\lambda_1$  (blue) switches the photochromic molecules (circles) from state A, which is transparent for the measurement wavelength  $\lambda_2$  (red), into state B, which is opaque for  $\lambda_2$ . The reverse transition is induced by the measurement wavelength  $\lambda_2$ .

### Nanoscopy of opaque samples by means of photochromic thin films

Properties of composite materials are strongly influenced by their microstructural features. The size of these features can vary from several micrometers to a few nanometers. Modern metals, for example, have excellent strength and elasticity achieved by small grain sizes well below one micrometer with an appropriate chemical composition. Due to the diffraction limit, the resolution capability of optical microscopes is not sufficient for the investigation of such metal alloys, which is why more complex and costly microscopy methods, like scanning electron microscopy, are used. In order to improve the resolution of optical microscopes for material analysis, the STED principle cannot be directly applied, because the material structure on the surface cannot be labeled with fluorescent markers.

However, it is known from optical lithography that an increase in resolution can be achieved with the aid of photochromic thin films that reversibly change their absorption properties under irradiation. This has already been theoretically and experimentally confirmed for transmission microscopy, but not for measurements in reflection.



# Optische Nanoskopie

## Optical Nanoscopy

Unsere theoretischen Vorarbeiten haben gezeigt, dass die Reflexionsnanoskopie auf Basis von photochromen Schichten vielversprechend für die hochaufgelöste Untersuchung von Materialoberflächen ist. Das Messprinzip funktioniert dabei wie folgt: Die zu untersuchende Substratoberfläche wird zuerst mit einer dünnen photochromen Schicht versehen. Mit dem ringförmigen Fokus eines Laserstrahls, dessen Wellenlänge z. B. im UV-Bereich liegt, wird die Schicht für einen Messlaserstrahl im sichtbaren Wellenlängenbereich absorbierend geschaltet. Im Zentrum des Rings bildet sich so ein transparenter enger Messkanal aus. Da die Schicht reversibel zwischen opakem und transparentem Zustand schaltbar ist, kann dieser Kanal wieder gelöscht und an anderer Stelle neu erzeugt werden. So können die optischen Eigenschaften der Oberfläche in einem ausgedehnten Bildfeld analysiert werden.

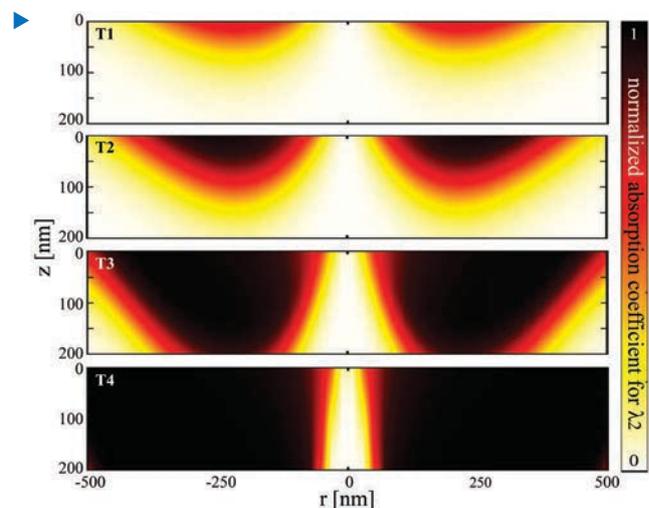
Im Rahmen eines DFG-geförderten Forschungsprojekts arbeiten wir zusammen mit unseren Kooperationspartnern von der TU Clausthal an der experimentellen Realisierung dieses Konzepts und vereinen dazu Expertisen aus den Bereichen organische Chemie, physikalische Chemie, Materialtechnik, Optik und Mikroskopie.

Simulation der Blendenentstehung in einer photochromen Schicht. Weiß entspricht einer transparenten und schwarz einer opaken Schicht. Für frühe Zeitpunkte ist das Intensitätsprofil des ringförmigen UV-Laserstrahls zu erkennen. Im letzten Bild ist ein transparenter Kanal mit einem Durchmesser eines Bruchteils der verwendeten Laserwellenlänge entstanden.

Simulation of aperture generation in a photochromic layer. White corresponds to transparent and black to opaque. For early time points, the intensity profile of the ring-shaped UV laser beam can be recognized. In the last image a transparent channel with a diameter of a fraction of the laser wavelength employed has been formed.

Our preliminary theoretical work has shown that reflection nanoscopy based on photochromic layers is promising for material surface analysis at super-resolution. The measurement principle works as follows: First, the surface under investigation is coated with a thin photochromic layer. With a ring-shaped focus of a laser beam that has a wavelength in the UV range, for example, the layer is switched opaque for measurement light within the visible wavelength range. Thus, a transparent narrow measurement channel is generated in the center of the ring. Since the layer can be reversibly switched between the opaque and the transparent state, this channel can be erased and regenerated at another position. This allows the optical properties of the material surface to be analyzed over an extended field of view.

Within the framework of a DFG-funded research project, we are working on the experimental realization of this concept in cooperation with our partners from the TU Clausthal, combining expertise from the fields of organic chemistry, physical chemistry, materials technology, optics and microscopy.



# Optische Nanoskopie

## Optical Nanoscopy

### Vorhersage der Zellgängigkeit von Fluoreszenzsonden mit Hilfe eines tiefen neuronalen Netzwerks

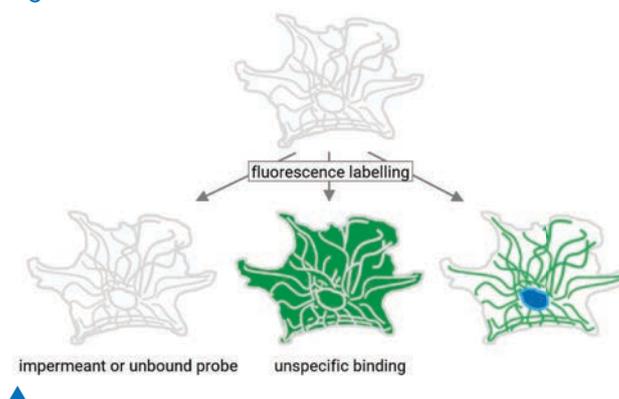
Die jüngsten Fortschritte in der supraauflösenden Fluoreszenzmikroskopie erlauben es, biologische Proben mit einer Auflösung von bis zu wenigen Nanometern abzubilden. Die direkte Visualisierung von intrazellulären Strukturen in vivo und in vitro bei dieser beispiellosen Auflösung erfordert den Einsatz von Fluoreszenzsonden mit exzellenter Zellpermeabilität und hoher Spezifität.

Die Identifizierung zellpermeabler Sonden innerhalb einer großen Menge verfügbarer regulärer Fluorophore basiert heutzutage immer noch auf einem Trial-and-Error-Prinzip, bei dem Hunderte von Verbindungen gescreent werden. Hochdurchsatz-Syntheseplattformen können diesen Prozess beschleunigen, sind aber ineffektiv und kostenintensiv. Ein präzises computergestütztes Modell, das die Vorhersage der Zellpermeabilität auf Grundlage der chemischen Struktur ermöglicht, wäre daher ein unschätzbare Vorteil für die Entwicklung von Fluoreszenzsonden. Leider sind die derzeitigen Modelle, die auf mehreren molekularen Deskriptoren basieren, für diese Aufgabe nicht gut geeignet, da sie nur eine moderate Vorhersagegenauigkeit aufweisen.

### Predicting the cell permeability of fluorescent probes with the help of a deep neural network

The recent advances in super-resolution fluorescence microscopy enable biological samples to be imaged with a resolution down to few nanometers. The direct visualization of intracellular targets in vivo and in vitro at this unprecedented resolution requires the use of fluorescent probes with excellent cell permeability and high specificity.

Identification of cell-permeable probes within a large set of available regular fluorophores is nowadays still based on a trial-and-error approach, which involves screening hundreds of compounds. High-throughput-screening synthesis platforms can speed up this process but are tedious and costly. An accurate computer-based model that enables the prediction of the cell permeability based on the chemical structure would therefore be an invaluable asset for the development of fluorescent probes. Unfortunately, current models which are based on multiple molecular descriptors are not well suited for this task as they exhibit only a moderate prediction accuracy.



Die Färbung von lebenden Zellen mit Fluoreszenzsonden ist nicht erfolgreich, wenn die Fluoreszenzsonden die Zellmembran nicht durchdringen können oder wenn sie nur unspezifisch binden. Nur zellpermeable Fluoreszenzsonden, die eine spezifische Bindung aufweisen, führen zu einer guten Färbung.

Labeling of living cells with fluorescent probes fails if fluorescent probes are impermeant or exhibit unspecific binding. Only cell-permeable fluorescent probes which exhibit specific binding result in good staining.

# Optische Nanoskopie

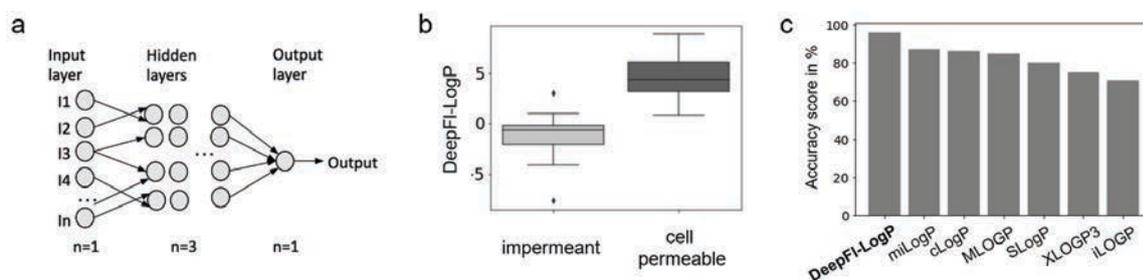
## Optical Nanoscopy

Der aussagekräftigste Indikator für die Zellpermeabilität ist der sogenannte LogP-Wert, der ein Maß für die Fettlöslichkeit einer Substanz ist. Es wurde bereits gezeigt, dass zellpermeable Fluoreszenzmoleküle dazu neigen, LogP-Werte größer oder gleich 1 aufzuweisen. Es wurde bisher jedoch noch nicht quantitativ untersucht, ob der LogP-Wert allein zur genauen Kategorisierung der Permeabilität dieser Molekülklasse verwendet werden kann.

In Zusammenarbeit mit der Abberior GmbH haben wir in einem vom BMWi geförderten Projekt den neuartigen Deskriptor DeepFL-LogP entwickelt. Der dazugehörige Algorithmus basiert auf einem tiefen neuronalen Netzwerk, das mit über 300 molekularen Merkmalen trainiert wurde. Dieser neue Deskriptor zeigt eine exzellente Korrelation mit den experimentellen Referenzdaten für arzneimittelähnliche Substanzen. Im Vergleich mit mehreren LogP-Deskriptoren auf dem Stand der Technik zeigte unser Deskriptor eine verbesserte Genauigkeit bei der Kategorisierung der Permeabilität von strukturell unterschiedlichen Fluoreszenzsonden. Insbesondere lässt sich mit ihm durch einfache Schwellwertbildung die Zellgängigkeit von Fluoreszenzsonden mit 96 % Genauigkeit klassifizieren. Wir erwarten, dass dieser Deskriptor den Entwicklungsprozess für neue zellpermeable Fluorophore zukünftig weitgehend vereinfachen und beschleunigen wird.

When it comes to cell permeability the LogP descriptor is the most significant descriptor. It is a measure for the lipophilicity of a compound. It has already been shown that cell-permeable fluorescent molecules tend to exhibit LogP values greater or equal to 1. However, it has not been quantitatively tested whether the LogP descriptor could be solely used to accurately categorize the permeability of this molecule class.

Within the scope of a project funded by the BMWi and in collaboration with Abberior GmbH, we developed the novel lipophilicity descriptor DeepFL-LogP. The underlying algorithm is based on a deep neural network, which was trained with over 300 molecular features. This new descriptor exhibits excellent correlation with the experimental reference data of drug-like substances. In comparison with several state-of-the-art LogP descriptors, our descriptor showed improved accuracy in categorizing the permeability of structurally diverse fluorescent probes. In particular, it can be used to classify the cell permeability of fluorescent probes with 96 % accuracy on the basis of a simple thresholding method. Thus, we expect our descriptor to largely simplify and speed up the development process of novel cell-permeable fluorophores.



Neuartiger Deskriptor für die Zellgängigkeit von Fluoreszenzsonden auf Basis eines tiefen neuronalen Netzwerks. a) Diagramm der Architektur des tiefen neuronalen Netzwerks. b) Der durchschnittliche DeepFL-LogP-Wert ist für nichtzellgängige Sonden deutlich niedriger als für zellgängige. c) Der DeepFL-LogP-Deskriptor kategorisiert Sonden mit höherer Genauigkeit als andere Standard-LogP-Deskriptoren. Novel descriptor for the cell permeability of fluorescent probes on the basis of a deep neural network. a) Diagram of the deep neural network architecture. b) The average DeepFL-LogP value is significantly smaller for cell impermeable probes than for cell permeable probes. c) The DeepFL-LogP descriptor correctly categorizes probes with higher accuracy than other state-of-the-art descriptors.

# Berichte aus der Abteilung

## Departmental Reports



**Dr. Peter Simon**  
Abteilungsleiter

T +49-(0) 551/5035-21  
F +49-(0) 551/5035-99  
M [peter.simon@ifnano.de](mailto:peter.simon@ifnano.de)

**Dr. Jürgen Ihlemann**  
Ansprechpartner  
für Nanostrukturtechnologie:

### MITARBEITENDE / STAFF MEMBERS

Dr. Andreas Blumenstein

Laura Fütterer

Lukas Janos Richter

Dr. Jörg Meinertz

Frederick Kleinwort

Till Schröder

Clemens Beckmann

Jan-Hendrik Klein-Wiele

Hendrik Wrigge

Max Buczek

Jens Oltmanns



# Kurze Pulse / Nanostrukturen

## Short Pulses / Nanostructures

Mikro- und nanostrukturierte Oberflächen verfügen über besondere Funktionalitäten, die vielfältige Einsatzmöglichkeiten in mikrofluidischen, tribologischen, medizintechnischen oder optischen Anwendungen bieten. Laserablation und Lasermodifikation sind Schlüsseltechnologien zur Erzeugung der dafür notwendigen Strukturen und haben den besonderen Vorteil, die Oberflächenfunktionalisierung mit einem berührungslosen Verfahren zu bewerkstelligen. Mit angepassten Bestrahlungsstrategien, unter Ausnutzung von Maskenprojektion oder interferenzbasierter Strahlmanipulation, wird bei geeigneter Laserwellenlänge und Pulsdauer Sub- $\mu\text{m}$ -Präzision routinemäßig erreicht. Dabei gewinnt der Einsatz ultrakurzer Pulse im Piko- und Femtosekundenbereich in immer mehr Anwendungsgebieten zunehmend an Bedeutung. Für die Qualitäts- und Effizienzsteigerung in bestehenden und für die Erschließung neuer Anwendungen ist die ständige Weiterentwicklung ultrakurzpulsbasierter Techniken unabdingbar. Dabei stehen die Erzeugung leistungsstarker ultrakurzer Pulse sowie die Herstellung von periodischen Nanostrukturen auf technischen Oberflächen im Mittelpunkt.

Aktuelle Themen sind die Erzeugung von ultrakurzen Hochleistungspulsen mit gasgefüllten gestreckten Hohlfasern, der Einsatz lasergenerierter Nanostrukturen zur Veränderung der Zellwachstumseigenschaften für medizinische Anwendungen, die Entwicklung von Methoden zur parallelisierten Laser-Direktstrukturierung für die Erzeugung computergenerierter Hologramme und die grundlegende Untersuchung der Strukturentstehung bei der Laserablation mittels ultrakurzer UV-Pulse. Weitere Arbeiten befassen sich mit der Erzeugung und Anordnung von plasmonischen Nanopartikeln und Silizium-Nanokristallen. Darüber hinaus wird die laserbasierte Herstellung mikrooptischer und mikrofluidischer Komponenten untersucht.

Micro- and nanostructured surfaces provide special functionalities that give rise to numerous applications in various fields like photonics, fluidics, tribology, and medicine. Laser ablation or surface modification are key enabling technologies for the generation of such surface structures, and based on their non-contact character they provide a flexible and economic processing capability. With appropriate beam delivery concepts like mask projection and interference methods, sub- $\mu\text{m}$  precision is routinely achieved, if the laser wavelength and the pulse duration are suitably chosen.

In this field, ultrashort laser pulses are gaining rapidly increasing importance for a range of emerging applications. For sustainable growth of this technology field it is essential to further develop various short pulse-based techniques. This is one of the main objectives of our department. A special emphasis is put on the generation of high-power ultrashort pulses, and the fabrication of periodic nanostructures on technical surfaces.

Current topics are the generation of high-power pulses using gas-filled stretched hollow-core fibers, changing the cell growth properties on medical implants by laser generated nanostructures, the development of parallel laser processing techniques for the fabrication of computer generated holograms and the study of the structure formation during surface ablation upon irradiation by ultrashort UV pulses. Additional research is focused on the generation and arrangement of plasmonic nanoparticles and silicon nanocrystals. Furthermore, laser-based fabrication of micro-optical elements and microfluidic components is also investigated.

# Kurze Pulse / Nanostrukturen

## Short Pulses / Nanostructures

### Kompression von ultrakurzen Hochleistungspulsen mit gasgefüllten gestreckten Hohlfasern

In unserem Institut wurden vor über zehn Jahren die Grundlagen für eine neuartige Hohlfaserkonstruktion für die Kompression von ultrakurzen Pulsen gelegt und die Technologie wurde seitdem stetig weiterentwickelt. Die Technik beruht auf der Streckung von flexiblen Hohlfasern, wodurch eine unübertroffene Geradheit bei großen Längen erreicht werden kann, was für eine Vielzahl von Kernparametern (Leistung, Transmission und Kompressionsfaktor) essenziell wichtig ist. So konnten in den vergangenen Jahren mehrere Rekordergebnisse mit dieser neuartigen Faservorrichtung erzielt werden.

### Compression of high power ultrashort pulses with stretched flexible hollow fibers

In our institute, the fundamentals of a new type of hollow-fiber device for the compression of ultrashort pulses were laid more than ten years ago, and the technology has been continuously developed since then. The technique is based on stretching flexible hollow fibers, thus achieving unsurpassed straightness even for long lengths, which is essential for a large number of core parameters (power, transmission and compression factor). Several record results have been achieved with this novel fiber device in recent years.

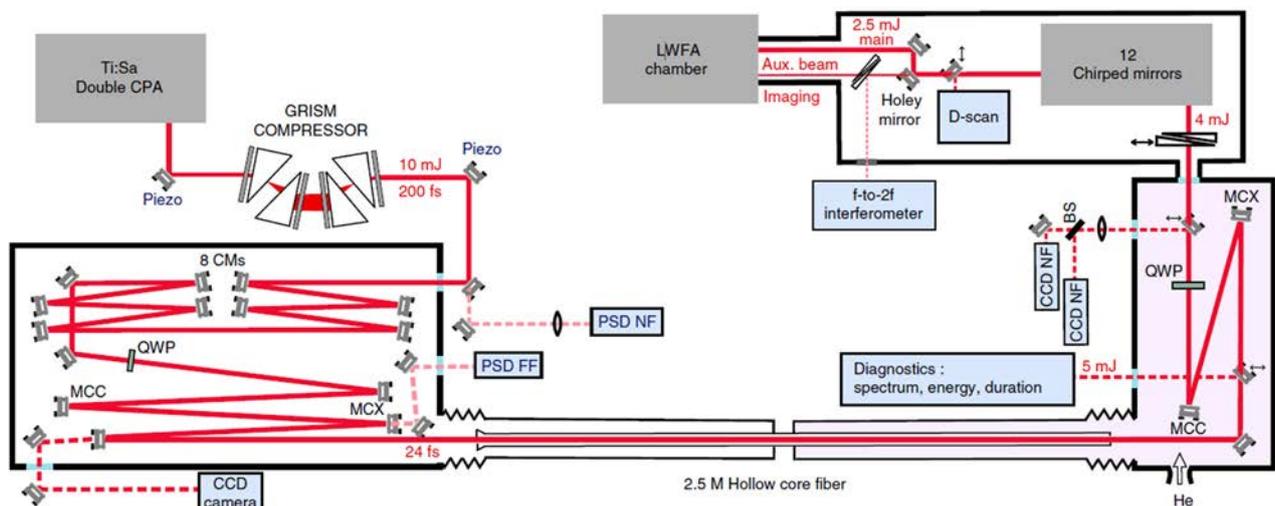


Abb. 1: Schematische Darstellung der Versuchsanordnung inkl. Lasersystem, Hohlfaser, Kompressionseinheit, Diagnostik und Targetkammer [1].

Fig. 1: Experimental layout incorporating the laser system, hollow fiber, pulse compressor, diagnostics, and target chamber [1].

[1] M. Oullé et al., Relativistic-intensity near-single-cycle light waveforms at kHz repetition rate, Light Sci Appl 9, 47 (2020)

# Kurze Pulse / Nanostrukturen

## Short Pulses / Nanostructures

In einem aktuellen Vorhaben in Zusammenarbeit mit Forschern aus dem Laboratoire d'Optique Appliquée (LOA), CNRS, der Ecole Polytechnique, ENSTA Paris und dem Max-Born-Institut für Nichtlineare Optik und Kurzzeitspektroskopie haben wir die Eignung der Technologie für die Kompression von Pulsen mit extrem hoher Spitzenleistung gezeigt. Die am LOA in Paris betriebene Laseranlage (Abb. 1), in der unsere Hohlfasern integriert ist, liefert Pulse mit einer Spitzenleistung von bis zu 1 TW, einer Pulsdauer von 3,4 fs und dazu exzellente Strahlqualität. Dieses Lasersystem ist zurzeit das einzige weltweit, das in der Lage ist, CEP-stabile Sub-4-fs Pulse mit TW-Leistung bei kHz-Repetitionsrate zu erzeugen (Abb. 2). Somit eignet sich diese Laserquelle zur Untersuchung relativistischer Licht-Materie-Wechselwirkungseffekte auf der Sub-Lichtzyklus-Zeitskala. Diese besondere Eigenschaft wurde durch erste Beobachtungen zu CEP-Effekten in Laser-Kiefeld-Beschleunigungsexperimenten (wakefield acceleration) demonstriert [1].

In a current project in collaboration with researchers from the Laboratoire d'Optique Appliquée (LOA), CNRS, Ecole Polytechnique, ENSTA Paris, and the Max Born Institute for Nonlinear Optics and Short Pulse Spectroscopy, we have successfully applied the technology for the compression of pulses to reach extremely high peak intensities. The laser system operated at the LOA in Paris (Fig. 1), in which our hollow fiber is integrated, delivers pulses with a peak power of up to 1 TW, a pulse duration of 3.4 fs and excellent beam quality. This laser system is currently the only one in the world that is able to generate CEP-stable sub-4-fs pulses with TW peak power at kHz repetition rate (Fig. 2). Thus, this laser source is suitable for the investigation of relativistic light-matter interaction effects on the sub-cycle time scale, as was demonstrated by first observations of CEP effects in laser wakefield acceleration experiments [1].

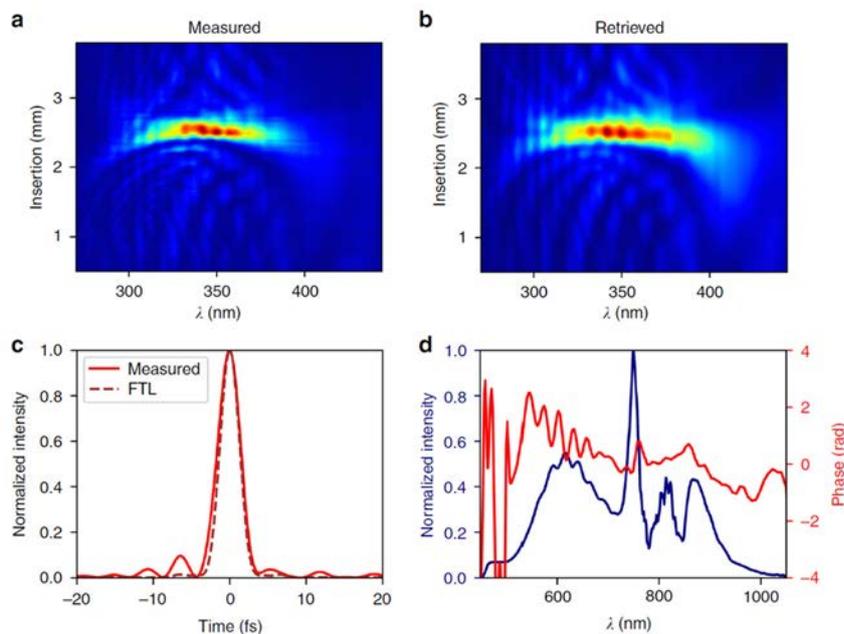


Abb. 2: Gemessene (a) und zurückgerechnete (b) D-Scan-Daten der komprimierten Pulse. Die zurückgerechnete zeitliche Pulsform (c) sowie die spektrale Intensität und Phase (d) sind ebenso gezeigt [1].

Fig. 2: D-scan measurement of compressed pulses. Besides the recorded (a) and retrieved (b) traces, the temporal pulse shape (c) as well as the spectral intensity and phase (d) are shown [1].

# Kurze Pulse / Nanostrukturen

## Short Pulses / Nanostructures

### Periodische Nanostrukturen beeinflussen Adhäsion, Morphologie und Differenzierung von Zellen

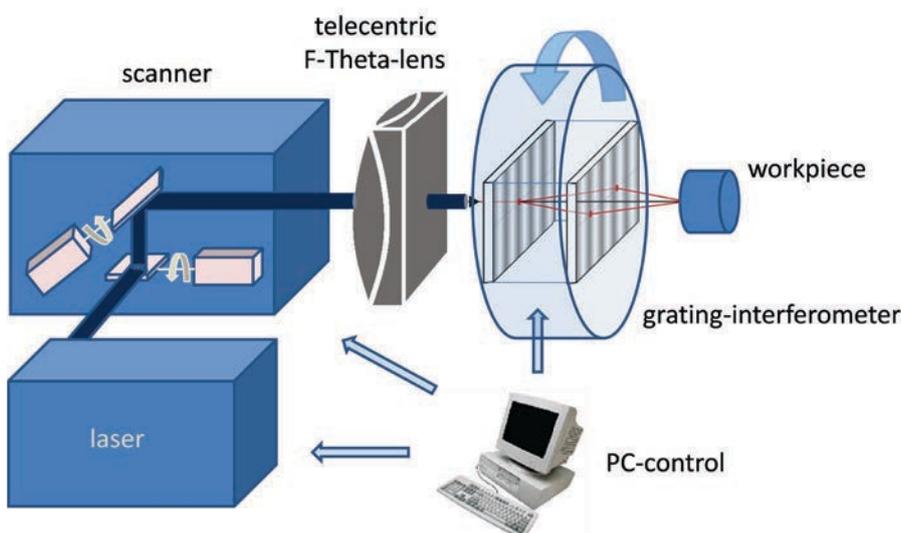
Trauma-Implantate, wie z.B. Marknägel, Platten oder Schrauben, werden in der Medizin zur Osteosynthese eingesetzt und sind in der Regel aus Titan oder Edelstahl gefertigt. Oft wird die Entnahme dieser Implantate nach dem Heilungsprozess durch Einwachseffekte erschwert, da das Knochengewebe stark an der Implantatoberfläche anhaftet. In der Vergangenheit konnte im Rahmen eines IGF-Projektes am IFNANO bereits gezeigt werden, dass Osteoblasten auf laserstrukturiertem Edelstahl eine stark reduzierte Vernetzung zeigen.

Um auf den früheren Erkenntnissen aufzubauen, wurden am IFNANO gemeinsam mit der Klinik für Unfallchirurgie, Orthopädie und Plastische Chirurgie der Universitätsmedizin Göttingen Versuche zu periodischen Nanostrukturen auf Edelstahl- und Titanplättchen und deren Einfluss auf die Adhäsion, Morphologie und osteogene Differenzierung von mesenchymalen Stammzellen durchgeführt. Bei mesenchymalen Stammzellen handelt es sich um multipotente Vorläuferzellen verschiedener Zelltypen, die sich unter anderem in Osteoblasten (Knochenzellen) differenzieren können.

### Periodic nanostructures influence adhesion, morphology, and differentiation of cells

Trauma implants, such as intramedullary nails, plates or screws, are used in medicine for osteosynthesis and are usually made of titanium or stainless steel. Removal of these implants after the healing process is often complicated by ingrowth effects, as bone tissue strongly adheres to the implant surface. In the past, it could already be shown within the context of an IGF project at IFNANO that osteoblasts show a strongly reduced cross-linking on laser-structured stainless steel.

To follow up on previous findings, IFNANO, in collaboration with the Department for Trauma Surgery, Orthopedics, and Plastic Surgery at the University Medical Center Göttingen, carried out experiments on periodic nanostructures on stainless steel and titanium and their influence on adhesion, morphology and osteogenic differentiation of mesenchymal stem cells. Mesenchymal stem cells are multipotent progenitor cells of different cell types which can for instance differentiate into osteoblasts (bone cells).



◀ Abb. 1: Schematischer Aufbau zur Laserstrukturierung.

Fig. 1: Schematic of the laser structuring process.

# Kurze Pulse / Nanostrukturen

## Short Pulses / Nanostructures

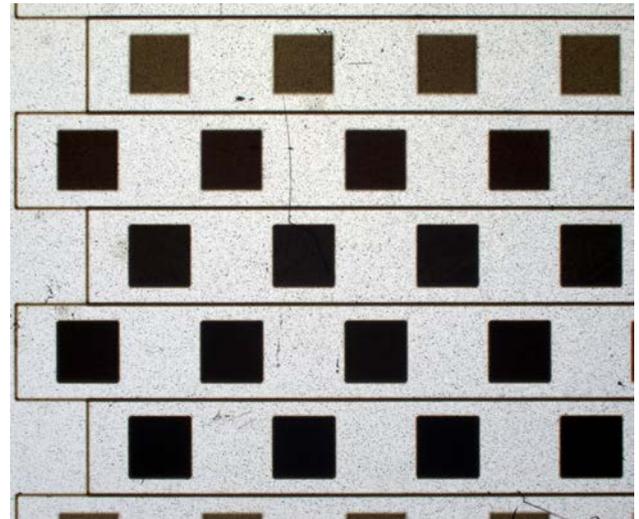
Die Metallproben wurden am IFNANO strukturiert und die Strukturen mittels Rasterelektronenmikroskop (REM) und Rasterkraftmikroskop (AFM) analysiert. An der der Klinik für Unfallchirurgie, Orthopädie und Plastische Chirurgie wurden die Zelltests durchgeführt und ausgewertet.

Für die Versuche wurden 1 x 1 cm<sup>2</sup> große polierte Plättchen aus medizinischem Edelstahl bzw. Titan verwendet. Die Oberfläche dieser Metallplatten wurde mit einem speziellen Aufbau laserstrukturiert, welcher auf einem Gitterinterferometer basiert. Als Laserquelle kam dabei ein Pikosekundenlaser bei 355 nm Wellenlänge zum Einsatz. Ein Scanner und eine fokussierende Optik ermöglichten eine präzise und flexibel gestaltbare Bearbeitung von Oberflächen (Abb. 1).

Abb. 2: Lichtmikroskop-Aufnahme der Teststrukturen: Die verschiedenen Strukturen wurden in 5-facher Ausfertigung als kleine Quadrate auf die Metallplättchen durch Laserbestrahlung erzeugt. Fig. 2: Light microscope image of the test structures: The various structures were produced 5-fold as small squares on the metal plates by laser irradiation.

The metal samples were structured at IFNANO and the structures were analyzed using a scanning electron microscope (SEM) and an atomic force microscope (AFM). The cell tests were performed and evaluated at the Department for Trauma Surgery, Orthopedics, and Plastic Surgery.

For the experiments, 1 x 1 cm<sup>2</sup> polished plates of medical stainless steel and titanium were used. The surfaces of these metal plates were laser-structured with a special setup based on a grating interferometer. A picosecond laser of 355 nm wavelength was used as the laser source. A scanner and a focusing optic provided precise and flexible surface processing (Fig. 1).



Im ersten Schritt wurden mit dem Laser-Setup lineare Strukturen mit einer Periode von 1,5 µm und verschiedenen Tiefen von 200-1400 nm erzeugt. Durch Drehung der Linienausrichtung und Überlagerung mehrerer linearer Strukturen konnten sechs verschiedene Topologien erzeugt werden: Linear, 45°-gekreuzt, 67,5°-gekreuzt, 90°-gekreuzt, 60/120°-zweifach-gekreuzt und 45/90/135°-dreifach-gekreuzt. Jede dieser Topologien wurde in 5 verschiedenen Tiefen erzeugt, so dass insgesamt 30 Strukturen entstanden (Abb. 2).

As a first step, linear structures with a period of 1.5 µm and different depths of 200-1400 nm were generated with the laser setup. By rotating the line alignment and superimposing several linear structures, six different topologies could be generated: Linear, 45°-crossed, 67.5°-crossed, 90°-crossed, 60/120°-twice-crossed, and 45/90/135°-triple-crossed. Each of these topologies was created with 5 different depths, resulting in a total of 30 individual structures (Fig. 2).

# Kurze Pulse / Nanostrukturen

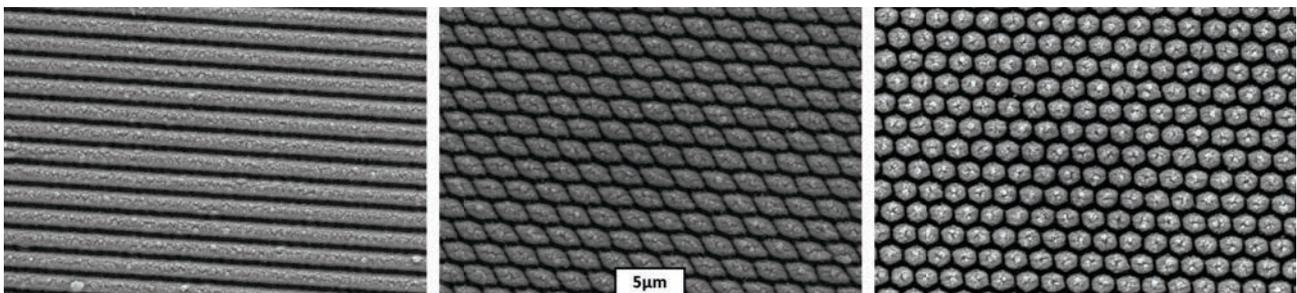
## Short Pulses / Nanostructures

Die gekreuzten Strukturen ergeben dabei Nanodots in unterschiedlicher Form und Größe auf der Oberfläche, welche mit REM und AFM vermessen wurden (Abb. 3). Die Ergebnisse der biologischen Untersuchung sind vielversprechend: Für vier der getesteten Strukturen konnte eine signifikant verringerte Zelladhäsion auf Edelstahl- und Titanplatten nachgewiesen werden. Zudem war bei zwei der Strukturen die Zellmorphologie sichtbar verändert (s. Abb. 4). Im Falle linearer Oberflächenstrukturierung hatten sich die Zellen entlang der Linien ausgerichtet und waren stark in die Länge gezogen. Für die verschiedenen Strukturtopologien verursachten die tiefsten der erzeugten Strukturen die größte Reduzierung der Zelladhäsion. Zukünftig sollen daher noch tiefere Strukturen getestet werden, um das Optimum zu finden. Um den Einfluss des Zellwachstums näher zu untersuchen, wurden für die drei Strukturen mit der größten Reduzierung der Zelladhäsion (linear, 45°-gekreuzt, 60/120°-dreifach-gekreuzt) Edelstahl- und Titanproben vollflächig mit diesen Strukturen versehen, um eine Genexpressionsanalyse durchzuführen. Hierbei konnte eine reduzierte osteogene Differenzierung nachgewiesen werden, was ebenfalls darauf hinweist, dass sich die Strukturen eignen, um osteogene Einwachseffekte bei Implantaten zu mindern.

The crossed structures result in nanodots of different shapes and sizes on the surface, which were measured by SEM and AFM (Fig. 3).

The results of the biological investigation are promising: For four of the tested structures, significantly reduced cell adhesion on stainless steel and titanium plates was demonstrated. In addition, the cell morphology was visibly altered in two of the structures (see Fig. 4). In the case of linear surface structuring, the cells had aligned along the lines and were strongly elongated. For the different structural topologies, the deepest of the created structures caused the greatest reduction in cell adhesion. Therefore, in the future, even deeper structures should be tested to find the optimum.

To further investigate the influence of the structures on the cell growth, a gene expression analysis was performed. For this, stainless steel and titanium samples were fully covered with the structures for the three structural types which generated the greatest reduction in cell adhesion (linear, 45°-crossed, 60/120°-triple-crossed).



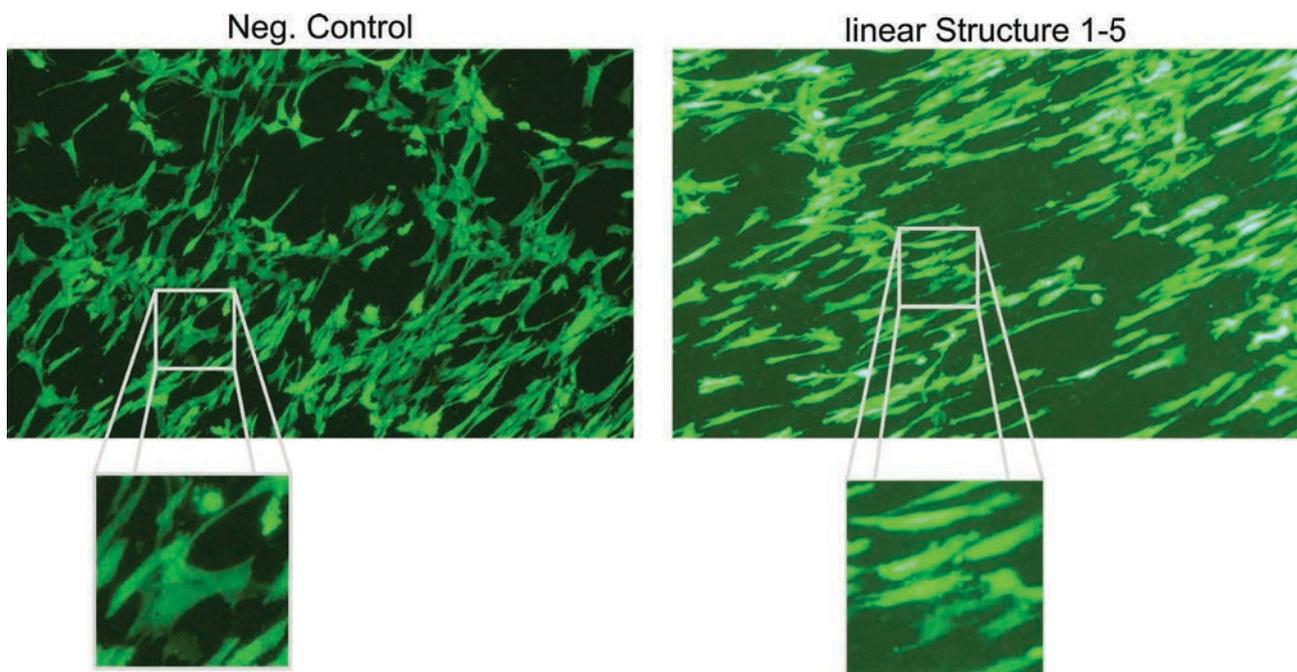
▲  
Abb. 3: REM-Aufnahmen verschiedener Strukturen auf Titan: linear (links), 45°-gekreuzt (Mitte), 60/120°-zweifach-gekreuzt (rechts).  
Fig. 3: SEM images of various structures on titanium: linear (left), 45°-crossed (center), 60/120°-twice-crossed (right).

# Kurze Pulse / Nanostrukturen

## Short Pulses / Nanostructures

Die Ergebnisse dieser Versuche zeigen, dass laserstrukturierte, periodische Nanotopographien eine geeignete Technologie darstellen, um Zelladhäsion, -morphologie und -differenzierung zu beeinflussen. Somit könnten in Zukunft Implantate aus Edelstahl oder Titan entwickelt werden, welche nach der Osteosynthese leichter zu entnehmen sind, um Operationszeiten zur Implantatentnahme zu verkürzen und somit Kosten im Gesundheitssystem zu senken.

The gene expression analysis revealed reduced osteogenic differentiation, which also indicates that the structures are suitable for mitigating osteogenic ingrowth effects in implants. The results of these experiments show that laser-structured periodic nanotopographies provide a suitable technology to influence cell adhesion, morphology, and differentiation. Therefore, in the future, implants made of stainless steel or titanium could be developed, which are easier to remove after osteosynthesis and thus shorten operation time of implant removal and reduce costs in the health care system.



▲  
Abb.4: Auf der mit Linien strukturierten Edelstahlfläche (rechts) haften deutlich weniger Zellen als auf der Referenzfläche. Zudem ist die veränderte Zellmorphologie deutlich sichtbar.

Fig. 4: Significantly fewer cells adhere to the stainless steel surface structured with lines (right) than to the reference surface. In addition, a change in cell morphology is clearly visible.

# Kurze Pulse / Nanostrukturen

## Short Pulses / Nanostructures

### Hochaufgelöste, parallelisierte Laser-Direktstrukturierung zur Erzeugung individualisierter computergenerierter Hologramme auf Metallen und Halbleitern

Die fortschreitende Digitalisierung der industriellen Produktion sowie die geforderte möglichst genaue Nachverfolgbarkeit von kritischen Produkten, z.B. in der Medizintechnik, erfordern neue, fälschungssichere Markierungen mit hoher Informationsdichte und hoher Resistenz gegen Beschädigungen. Hier eignen sich computergenerierte Hologramme (CGH) in besonderem Maße, da sie auch bei starker Miniaturisierung sehr kostengünstig und zuverlässig ausgelesen werden können.

In einem vom BMWi geförderten Kooperationsprojekt wurde in unserer Gruppe daher eine Beschriftungstechnologie entwickelt, mit der sich binäre CGH auf Metallen und Halbleitern mit hoher Qualität und industrietauglicher Geschwindigkeit per direkter Ultrakurzpuls-Laserablation erzeugen lassen. Das aktuelle System ist in der Lage, ein Merkmal von 1 mm<sup>2</sup> Fläche mit Pixelgrößen von 3 µm in weniger als einer Sekunde zu schreiben.

### High resolution, parallelized laser direct structuring for the generation of individualized computer-generated holograms on metals and semiconductors

The advancing digitalization of industrial production, as well as the required traceability of critical products, e.g. in medical technology, require new, forgery-proof markings with high information density and high resistance to damage. Computer-generated holograms (CGH) are particularly suitable here, as they can be read out very cost-effectively and reliably even with high levels of miniaturization.

In a cooperation project funded by the BMWi, a marking technology was therefore developed in our group with which binary CGH can be generated on metals and semiconductors with high quality and industry-scale speed using direct ultrashort pulse laser ablation.

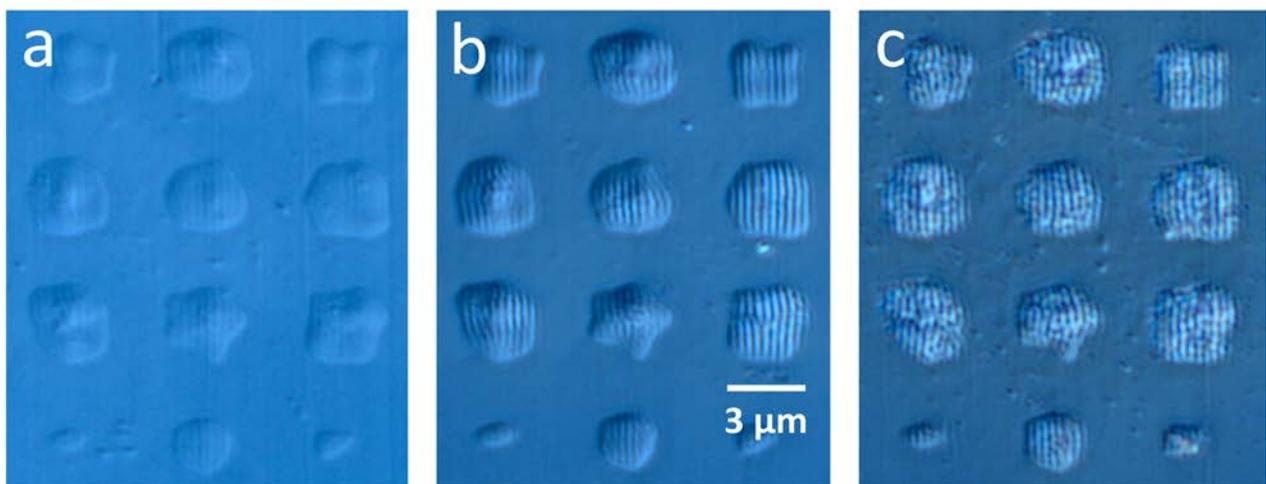


Abb. 1: 5 x 5 Pixelmuster in Edelstahl, das mit einem (a), drei (b) bzw. sechs (c) Laserpulsen geschrieben wurde.  
Fig. 1: 5 x 5 pixel pattern ablated into stainless steel with one (a), three (b), and six (c) laser pulses, respectively.

# Kurze Pulse / Nanostrukturen

## Short Pulses / Nanostructures

Neben binären CGH, die Pixel mit identischer Tiefe aufweisen, sind mehrstufige CGH besonders interessant. Diese bieten einen besseren Signal-Rausch-Abstand sowie eine deutlich erhöhte Effizienz. Dazu muss allerdings die Tiefe der einzelnen Pixel mit einer Genauigkeit von weniger als 10 nm variiert werden können. Dies erfordert einen sehr gleichmäßigen Materialabtrag über den Pixelboden hinweg. Versuche in dieser Richtung erwiesen sich bis jetzt leider als erfolglos. Der Grund hierfür liegt in einer starken Ausprägung von Ripple-Strukturen am Boden der Pixel, der zu einer irregulären Aufrauung der Oberfläche in diesem Bereich führt (Abb. 1). Eine Variation der Polarisation der Laserstrahlung beeinflusst zwar die Topologie der entstehenden Strukturen, führt allerdings nicht zur Vermeidung von Irregularitäten (Abb. 2). Eine Verbesserung kann eventuell durch den Einsatz von Puls-„Bursts“ bei der Ablation erreicht werden. Entsprechende Versuche in dieser Richtung werden zurzeit vorbereitet.

The current system is able to write features of 1 mm<sup>2</sup> area with pixel sizes of 3 μm in less than a second. In addition to binary CGH, which have pixels with identical depth, multilevel CGH are particularly interesting. These offer a better signal-to-noise ratio as well as a significantly increased efficiency. For this, however, the depth of the individual pixels must be able to be varied with an accuracy of less than 10 nm. This requires a very even material removal over the bottom of the pixels. Attempts in this direction have, unfortunately, so far proven unsuccessful. The reason for this is a strong development of ripple structures at the bottom of the pixels, which leads to an irregular roughening of the surface in this area (Fig. 1). Although variation of the polarization of the laser radiation has an influence on the resulting topology, it does not help to prevent the onset of irregularities (Fig. 2). However, an improvement can possibly be achieved by the use of pulse “bursts” during the ablation. Corresponding attempts in this direction are currently being prepared.

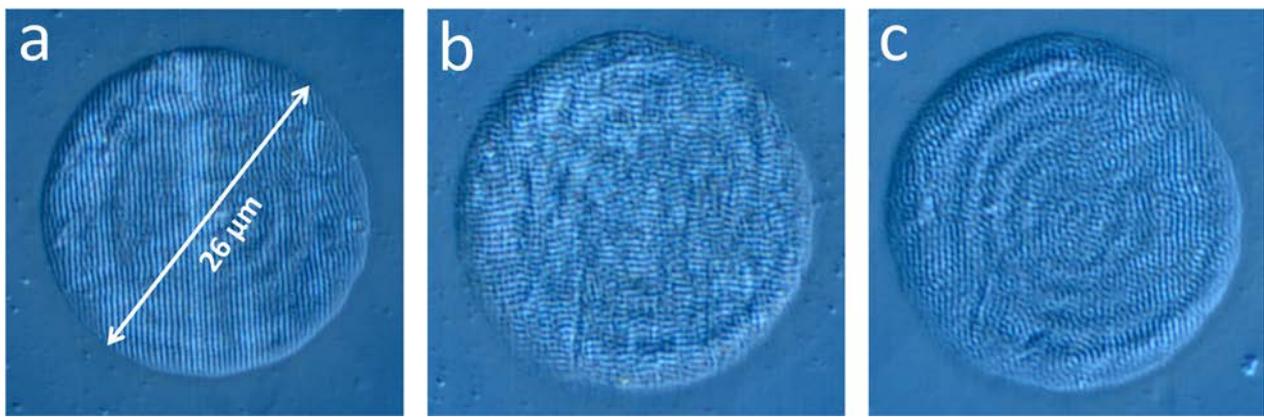


Abb. 2: Abtrag von Edelstahl mit vier Pulsen, homogenem Strahlprofil und unterschiedlicher Polarisation: horizontal (a), vertikal (b), und zirkular (c.)

Fig. 2: Area ablated in stainless steel with four pulses, homogeneous beam profile, and different polarization: horizontal (a), vertical (b), and circular (c).

# Kurze Pulse / Nanostrukturen

## Short Pulses / Nanostructures

### Periodische Nanostrukturierung durch Einzelpuls-Bestrahlung

Es wurde die Bildung von laserinduzierten Nanostrukturen durch direkten Vergleich von theoretischen Simulationen und Experimenten in identischem Maßstab verglichen. Es wird eine Laserwellenlänge von 248 nm und eine Pulslänge von 1,6 ps verwendet (Abb. 1). Mit einem Maskenprojektionsaufbau wird ein räumlich periodisches, sinusförmiges Intensitätsprofil auf einer Goldoberfläche mit Perioden von 270 nm, 350 nm und 500 nm erzeugt. Die entstehenden Strukturen werden durch Raster- und Transmissionselektronenmikroskopie (REM und TEM) analysiert. Ein hybrider Atomistischer-Kontinuum-Ansatz modelliert die Wechselwirkung des Laserpulses mit der Goldoberfläche und die anschließende zeitliche Entwicklung des Materialsystems. Die Simulationen wurden an der Universität Kassel von D. S. Ivanov durchgeführt. Die Bildung verschiedener Strukturdetails wird in Abhängigkeit der angewendeten Fluenzen und Periodizitäten beschrieben.

### Periodic nanostructure formation by single laser pulse irradiation

We investigated the formation of short pulse UV laser-induced surface nanostructures by direct comparison of theoretical simulations and experiments on an identical scale. A laser wavelength of 248 nm and a pulse length of 1.6 ps is used in a mask projection setup (Fig. 1). This forms a spatially periodic intensity profile on a gold surface with a sinusoidal shape and periods of 270 nm, 350 nm, and 500 nm, respectively. The structures are analyzed by scanning and transmission electron microscopy (SEM and TEM). A hybrid atomistic-continuum approach models the interaction of the laser pulse with the gold target and the subsequent time evolution of the system. The simulations were performed at the University of Kassel by D. S. Ivanov. The formation of various features is categorized depending on the range of applied fluences and periodicities.

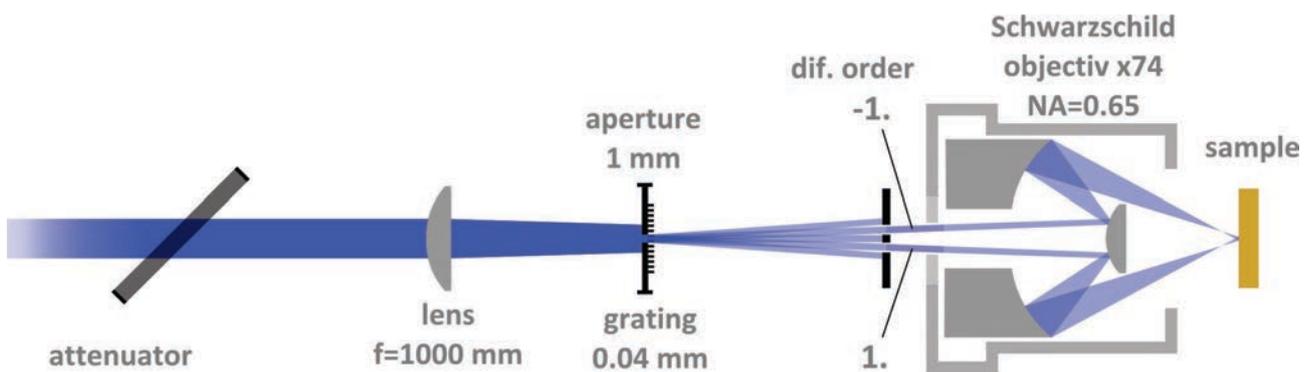


Abb. 1: Maskenprojektionsaufbau für die periodische Oberflächenstrukturierung. Ein sinusförmiges Interferenzmuster wird erhalten, indem nur die  $\pm 1$ . Beugungsordnungen für die Maskenabbildung verwendet werden.  
Fig. 1: Mask projection setup for periodic surface structuring. A sinusoidal interference pattern is obtained by using only the  $\pm 1$ st diffraction orders for mask imaging.

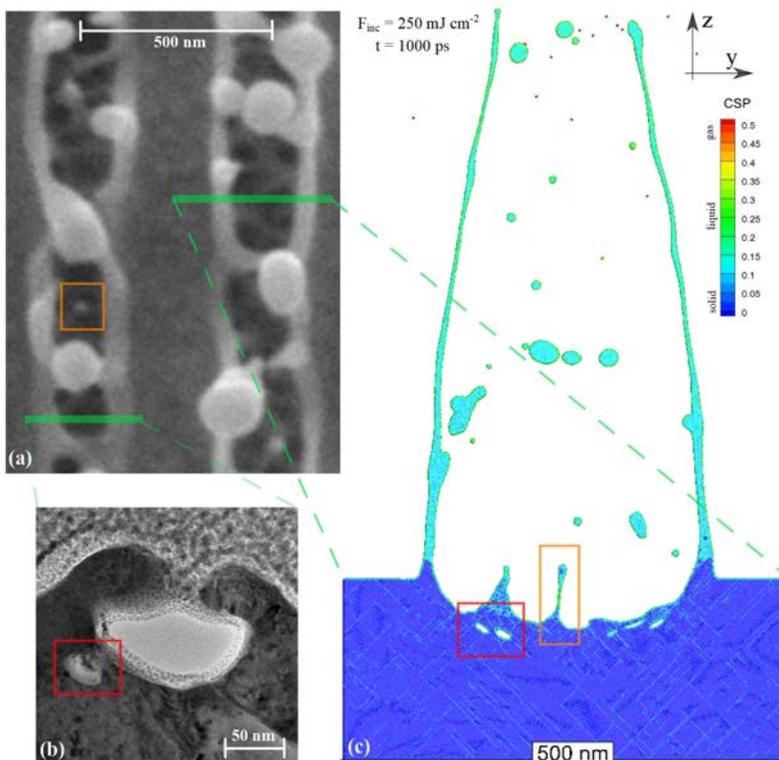
[1] A. Blumenstein, M. E. Garcia, B. Rethfeld, P. Simon, J. Ihlemann, and D. S. Ivanov, Formation of Periodic Nanoridge Patterns by Ultrashort Single Pulse UV Laser Irradiation of Gold, *Nanomaterials* 10, 1998 (2020).

# Kurze Pulse / Nanostrukturen

## Short Pulses / Nanostructures

Das Simulationswerkzeug kann selbst kleine Details wie Hohlräume unter der Oberfläche korrekt beschreiben, wie in Abbildung 2 (b) und (c) im roten Rechteck dargestellt. Auch erstarrte Schmelzspritzer sind sowohl im Experiment als auch in der Simulation sichtbar, siehe Abbildung 2 (a) und (c) im orangenen Rechteck. Die starke Abkühlrate der sich entwickelnden Strukturen ist für die Bildung der Nanostrukturdetails verantwortlich. Es konnten die Mechanismen, die für die Bildung der Nanostruktur verantwortlich sind, beschrieben werden. Ein Hauptgrund ist dabei die hydrodynamische Bewegung der ausgestoßenen geschmolzenen Oberflächenschicht nach außen. Das verwendete numerische Modell ist ein leistungsstarkes Werkzeug zur Untersuchung von Nanostrukturierungsprozessen mit ultrakurzen Laserpulsen auf Metallen. Die Ergebnisse sind relevant für industrielle Anwendungen und die Erzeugung von Materialoberflächen mit vordefinierten Eigenschaften und Topographien.

The simulation tool is able to describe correctly even small details like subsurface voids as shown in Figure 2 (b) and (c) in the red rectangles. In addition, frozen melt splashes are visible both in experiment and simulation, Figure 2 (a) and (c) in the orange rectangles. The strong cooling rate of the developing structures is responsible for the formation of the nanostructures. We found that the mechanisms responsible for the nanostructure formation are the outward hydrodynamic motion of the expelled melted surface layer. The used numerical model is a powerful tool to investigate ultrashort laser pulse nanostructuring processes on metals. The results are relevant for industrial applications and the generation of material surfaces with predefined properties and topography.



◀ Abb. 2: Direkter Vergleich der berechneten und experimentell erhaltenen Ablationsergebnisse von Gold: SEM-Draufsicht (a), TEM-Querschnitt (b) und Simulationsergebnisse der Atomkonfiguration  $40 \times 500 \times 200 \text{ nm}^3$  (c). Die Atome werden durch den Central Symmetry Parameter (CSP) gefärbt. Der Ablationsprozess führt zu einer Öffnung der erzeugten Struktur und zur Bildung einer Reihe von Tröpfchen und säulenartigen Strukturen auf der Oberfläche (orange-farbene Rechtecke). Der Ablationsprozess geht mit der Erzeugung von Hohlräumen unter der Oberfläche (rote Rechtecke) einher, die sowohl im Experiment als auch in der Simulation sichtbar werden. (Entnommen aus [1]).

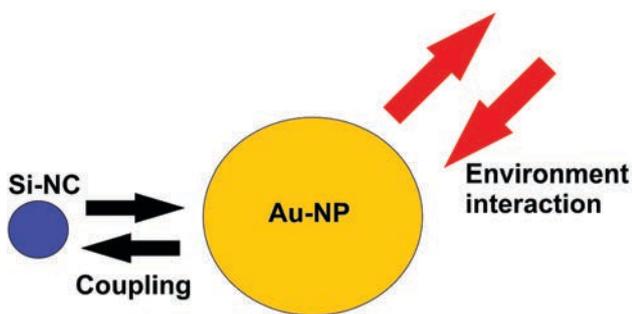
Fig. 2: Direct comparison of calculated and experimentally obtained ablation results of gold: SEM top view (a), TEM cross-section (b), and simulation results of the atomic configuration of  $40 \times 500 \times 200 \text{ nm}^3$  (c). The atoms are colored according to the central symmetry parameter (CSP). The process of spallation results in an opening of the generated structure and formation of a number of droplets and pillar-like structures on the surface (orange rectangle). The spallation process is accompanied by the generation of subsurface voids (red rectangle) registered in both experiment and simulation. (from [1]).

# Kurze Pulse / Nanostrukturen

## Short Pulses / Nanostructures

### Steigerung der Photolumineszenz von Si-Quantenpunkten durch Kopplung an plasmonische Partikel

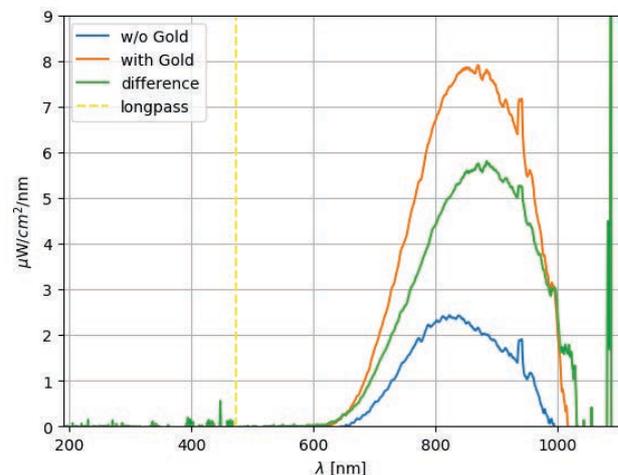
Während Silizium aus der Halbleiterindustrie nicht wegzudenken ist, sind dessen Anwendungen in der Photonik noch sehr begrenzt. Die so genannte indirekte Bandlücke erschwert die Wechselwirkung von Si mit Licht. Allerdings ist bekannt, dass Silizium bei einer Größenreduktion auf wenige Nanometer andere optische Eigenschaften aufweist als im Volumenmaterial. Diese so genannten Silizium-Nanokristalle oder Silizium-Quantenpunkte ermöglichen die Absorption und Emission von Licht im sichtbaren und nahinfraroten Spektrum. Eine mögliche Anwendung wäre die Integration aktiver Emittoren in der Si-Photonik. Allerdings lassen sich auch viele weitere Anwendungen finden, beispielsweise in der Datenspeicherung oder in der Photovoltaik. Obwohl die Effizienz der Silizium-Nanokristalle in den vergangenen Jahren gesteigert wurde, reicht diese weiterhin nicht aus, um in den Anwendungen umgesetzt zu werden.



▲  
Abb. 1: Kopplung zwischen Si-Nanokristallen (Si-NC) und Gold-Nanopartikeln (Au-NP). Die Goldpartikel wirken als eine Art „Antenne“ für die Lumineszenz.  
Fig. 1: Coupling between Si nanocrystals (Si-NC) and gold nanoparticles (Au-NP). The gold particles act as a kind of "antenna" for the luminescence.

### Enhancement of photoluminescence of Si quantum dots by coupling to plasmonic particles

While silicon is indispensable in the semiconductor industry, its applications in photonics are still very limited. The so-called indirect band gap makes it difficult for Si to interact with light. However, it is known that silicon exhibits different optical properties when reduced in size to a few nanometers than in bulk material. These so-called silicon nanocrystals or silicon quantum dots enable the absorption and emission of light in the visible and near-infrared spectrum. One possible application would be the integration of active emitters in Si photonics. However, many other applications can be found, for example in data storage or photovoltaics. Although the efficiency of silicon nanocrystals has been increased in recent years, it is still not sufficient to be implemented in such applications.



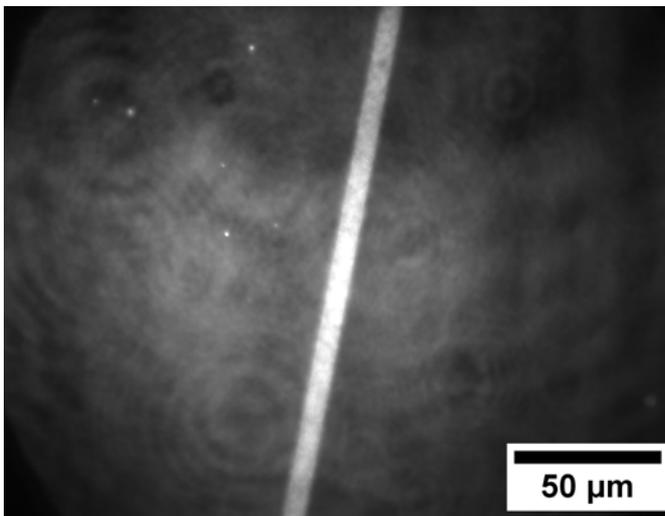
▲  
Abb. 2: Photolumineszenz von Si-Nanokristallen ohne (blau) und mit (orange) Gold-Nanopartikeln. Die Photolumineszenz wird durch 405 nm angeregt.  
Fig. 2: Photoluminescence of Si nanocrystals without (blue) and with (orange) gold nanoparticles. The photoluminescence is excited by 405 nm.

# Kurze Pulse / Nanostrukturen

## Short Pulses / Nanostructures

Es werden daher laserbasierte Methoden entwickelt, um die Effizienz zu steigern. Dazu sollen metallische Nanopartikel, z. B. Gold, an die Silizium-Quantenpunkte gekoppelt werden. Eine Möglichkeit hierfür bietet die laserbasierte Implantation von Gold-Nanopartikeln in eine Oxidmatrix, die Si-Nanokristalle enthält. Weisen die Gold-Nanopartikel die richtigen Größen und Formen auf, können sie die Lichtabsorption und Lichtemission der Si-Nanokristalle verstärken. Entscheidend ist hierfür auch der Abstand zwischen den metallischen Partikeln und den Si-Quantenpunkten. Schematisch ist diese Kopplung in Abbildung 1 dargestellt. Hier verstärkt das Gold-Nanopartikel die Photolumineszenz (PL) des Si-Nanokristalls und wirkt als eine Art „Antenne“. Die Verstärkung der Lumineszenz von Si-Nanokristallen durch Goldpartikel lässt sich anhand von Abbildung 2 deutlich sehen. In Blau sind die PL-Intensitäten ohne Goldpartikel zu sehen und in Orange bei Vorhandensein der Gold-Nanopartikel. Es ergibt sich eine Verstärkung um einen Faktor von bis zu 4. In Abbildung 3 ist ein PL-Mapping von Si-Nanokristallen zu sehen. Entlang der hellen Linie wurden Goldpartikel implantiert, die das Lumineszenzsignal sichtbar erhöhen.

Laser-based methods are therefore being developed to increase the efficiency. For this purpose, metallic nanoparticles, e.g. gold, are coupled to the silicon quantum dots. One possible implementation for this is the laser-based implantation of gold nanoparticles into an oxide matrix containing Si nanocrystals. If the gold nanoparticles have suitable sizes and shapes, they can enhance the light absorption and light emission of the Si nanocrystals. The distance between the metallic particles and the Si quantum dots is also crucial for this. Schematically, this coupling is shown in Figure 1. Here, the gold nanoparticle amplifies the photoluminescence (PL) of the Si nanocrystal and acts as a kind of "antenna". The enhancement of the luminescence of Si nanocrystals by gold particles can be clearly seen from Figure 2. The PL intensity without gold particles is shown in blue and in the presence of the gold nanoparticles in orange. This results in an enhancement by a factor of up to 4. Figure 3 shows a PL mapping of Si nanocrystals. Gold particles were implanted along the bright line, visibly increasing the luminescence signal.



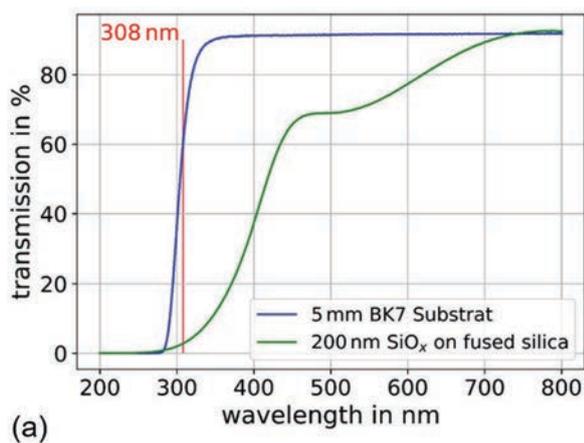
◀ Abb. 3: Aufnahme eines Photolumineszenzmikroskops. Es wurde entlang der hellen Linie Gold in eine Siliziumoxidmatrix implantiert. Die Goldpartikel verstärken das Signal, die Linie erscheint dadurch deutlich heller als die Bereiche ohne implantierte Goldpartikel.  
Fig. 3: Photoluminescence microscope image. Gold has been implanted into a silicon oxide matrix along the bright line. The gold particles amplify the signal, making the line appear much brighter than the areas without implanted gold particles.

# Kurze Pulse / Nanostrukturen

## Short Pulses / Nanostructures

### Silizium-Suboxid

Silizium-Suboxid ( $\text{SiO}_x$ ,  $x < 2$ ) ist ein vielseitig einsetzbares Schichtmaterial. Es kann aufgrund seiner starken UV-Absorption mit einem Excimerlaser präzise bearbeitet und anschließend durch Oxidation in transparentes  $\text{SiO}_2$  überführt werden. So sind verlustarme Phasenmasken für Mikroskopie und Lasermaterialbearbeitung herstellbar. Bisher wurde die für eine Präzisionsstrukturierung erforderliche Rückseitenablation nur auf Quarzglassubstraten und vorwiegend mit der Laserwellenlänge 193 nm durchgeführt. In vielen Fällen sind jedoch Standardglas-Substrate, z.B. aus BK7, erwünscht. Diese sind bei 193 nm nicht transparent. Die Rückseitenablation, bei der die Laserstrahlung das Substrat durchdringen muss, wird daher bei der Laserwellenlänge 308 nm durchgeführt. Hier hat selbst ein 5 mm dickes BK7-Substrat noch eine Transmission von 60 %, das  $\text{SiO}_x$  dagegen ist noch hinreichend absorbierend für eine Laserbearbeitung (Abb. 1 (a)).



(a)

### Silicon suboxide

Silicon suboxide ( $\text{SiO}_x$ ,  $x < 2$ ) is a multipurpose film material. Due to its high UV absorption, it can be precisely processed with excimer lasers and subsequently oxidized to transparent  $\text{SiO}_2$ . This way, low-loss phase masks for microscopy and laser materials processing can be fabricated. Up to now, the so-called backside ablation, which is necessary for precise patterning, has been performed only on fused silica substrates and mainly at a laser wavelength of 193 nm. In many applications, the use of standard glass substrates (borosilicate glass, e.g. BK7) is required. These glasses are not sufficiently transparent at 193 nm. The backside ablation demanding laser pulse delivery through the substrate is therefore performed at 308 nm. At this wavelength, even a 5-mm-thick BK7 substrate has a transmission of 60 %;  $\text{SiO}_x$  in contrast is sufficiently absorbing for laser ablation (Fig. 1 (a)).



(b)

Abb. 1: (a) Transmissionsspektren von BK7 und  $\text{SiO}_x$ . (b) Ablationsmuster aus Stegen (gelb) und Gräben (braun) in 320 nm  $\text{SiO}_x$  auf 5 mm BK7; Laser: 308 nm; Periode 40  $\mu\text{m}$ .

Fig. 1: (a) Transmission spectra of BK7 and  $\text{SiO}_x$ . (b) Ablation pattern of stripes (yellow) and spaces (brown) in 320 nm  $\text{SiO}_x$  on 5 mm BK7; Laser: 308 nm; period 40  $\mu\text{m}$ .

Abb. 3: Mikroskopische Aufnahme einer 100 nm dicken  $\text{SiO}_x$ -Schicht nach zwei Stunden Nassoxidation bei 600°C. (a) Inhomogene Oxidation bei Dampfeinlass vor Heizbeginn. (b) Homogene Oxidation bei Dampfeinlass erst bei Prozesstemperatur.

Fig. 3: Microscope image of a 100-nm-thick  $\text{SiO}_x$  film after two hours of wet oxidation at 600°C. (a) Steam inlet prior to heating: inhomogeneous oxidation. (b) Steam inlet at process temperature: homogeneous oxidation.

# Kurze Pulse / Nanostrukturen

## Short Pulses / Nanostructures

So konnte eine Linienstruktur (Stege und Gräben) mit 40  $\mu\text{m}$  Periode hergestellt werden (Abb. 1 (b)), eine typische Struktur für Phasenmasken. Die volle Transparenz einer derartigen Phasenmaske erhält man durch Oxidation der verbleibenden  $\text{SiO}_x$ -Stege. Diese muss allerdings bei mäßigen Temperaturen ( $< 600^\circ\text{C}$ ) durchgeführt werden, da BK7 im Gegensatz zu Quarzglas höheren Temperaturen nicht standhält. Bei diesen Temperaturen erfolgt die Oxidation in trockener Luft oder in Sauerstoff allerdings nur sehr langsam. Um eine Oxidation innerhalb weniger Stunden zu ermöglichen, wird sie in einer Wasserdampfatmosfera durchgeführt (Nassoxidation). Dies ermöglicht eine Oxidationszeit einer 90 nm dicken  $\text{SiO}_x$ -Schicht von etwa zehn Stunden bei  $500^\circ\text{C}$  und vier Stunden bei  $600^\circ\text{C}$  (Abb. 2). Dabei ist eine kontrollierte Wasserdampfkonzentration und die Einleitung des Dampfes erst bei erreichter Prozesstemperatur entscheidend, um Bedingungen für eine homogene Oxidation zu schaffen (Abb. 3).

A line pattern with 40  $\mu\text{m}$  period, which is a typical phase mask pattern, could be fabricated this way (Fig. 1 (b)). Full transparency of such a phase mask is obtained by oxidation of the remaining  $\text{SiO}_x$  lines. This oxidation has to be performed at moderate temperatures ( $< 600^\circ\text{C}$ ), as BK7 does not withstand higher temperatures. If the oxidation is performed in dry air or oxygen, the process is rather slow. In order to accomplish oxidation in a few hours, it is performed in a water steam atmosphere (wet oxidation). This enables an oxidation time for a 90-nm-thick  $\text{SiO}_x$  film of about ten hours at  $500^\circ\text{C}$  and four hours at  $600^\circ\text{C}$  (Fig. 2). Controlled conditions (moderate steam concentration and a steam inlet not before the process temperature is reached) are essential for obtaining a homogeneous oxidation (Fig. 3).

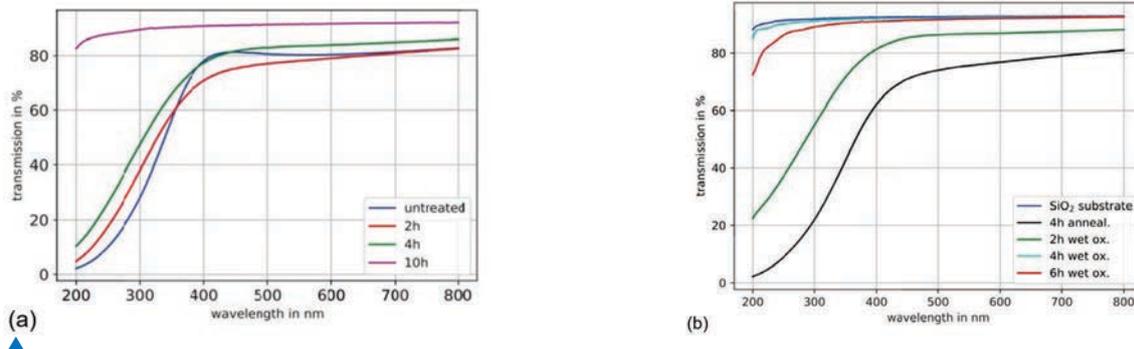
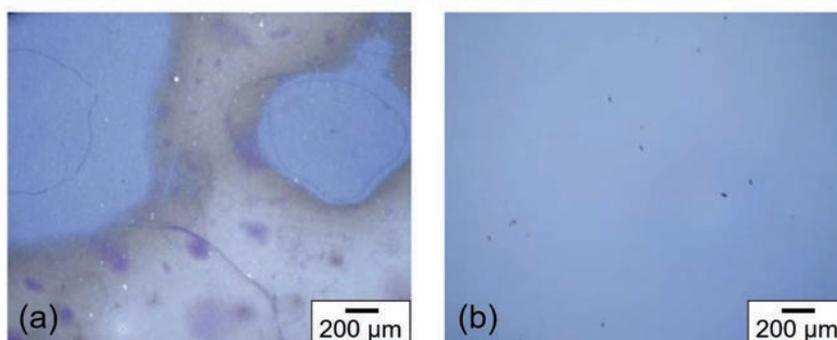


Abb. 2: Transmissionsspektren von 90 nm  $\text{SiO}_x$  auf Quarzglas mit fortschreitender Zeit während der Nassoxidation. (a) Oxidation bei  $500^\circ\text{C}$ , (b) Oxidation bei  $600^\circ\text{C}$ .

Fig. 2: Transmission spectra of 90 nm  $\text{SiO}_x$  on fused silica at progressing time during wet oxidation. (a) Oxidation at  $500^\circ\text{C}$ , (b) oxidation at  $600^\circ\text{C}$ .

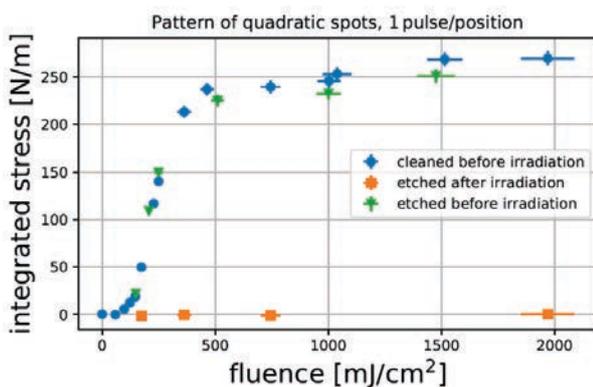


# Kurze Pulse / Nanostrukturen

## Short Pulses / Nanostructures

### Formkorrektur und Formgebung von Glassubstraten mittels laserinduzierter Oberflächenspannungen

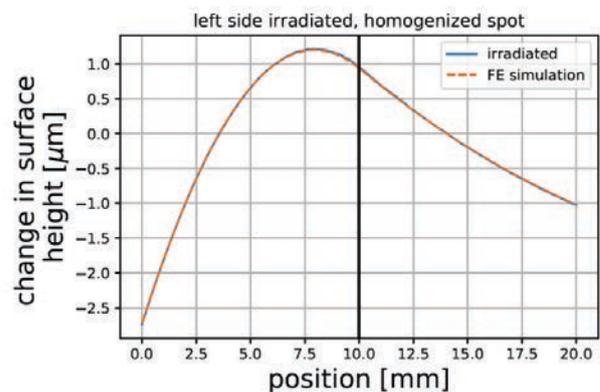
Das Aufbringen dünner Schichten, durch die die optischen Eigenschaften einer Oberfläche verändert werden können, ist ein wesentlicher Bestandteil der modernen Optiktechnologie. Üblicherweise stehen die Schichten nach dem Aufbringen unter einer mechanischen Spannung, die zu einer messbaren elastischen Verformung des Substrats und somit zu einer Verschlechterung der optischen Eigenschaften des Bauteils führen kann. Dieser Effekt tritt besonders bei dünnen Substraten auf, die, u. a. wegen ihres geringeren Gewichts, in der Luft- und Raumfahrt relevant sind. Zudem ist gerade bei dünnen Substraten die präzise Formgebung eine Herausforderung. Des Weiteren können optische Bauteile durch die Gravitation oder die Halterung verformt werden.



▲ Abb. 1: Die laserinduzierte integrierte Spannung aufgetragen gegen die Laserfluenz für Schott D263.  
Fig. 1: The laser-induced integrated stress as a function of the fluence for Schott D263.

### Figure correction and forming of glass substrates via laser-induced surface stresses

Thin film deposition, which can alter the optical properties of surfaces, is a crucial aspect of modern optical technology. In general, thin films exhibit mechanical stress that might cause a significant elastic deformation of the underlying substrate and thereby can have a deleterious effect on the optical properties of the component. This happens especially in the case of thin substrates, which are in part due to the small mass relevant in aerospace applications. Additionally, precise manufacturing of thin substrates is a challenge. Furthermore, optical parts might also be deformed by gravity or mounting.



▲ Abb. 2: Verformungsprofil der Probenoberfläche durch die Bestrahlung der gegenüberliegenden Oberfläche im Bereich < 10 mm.  
Fig. 2: Deformation profile of the sample surface by irradiation of the opposite surface in the range < 10 mm.

# Kurze Pulse / Nanostrukturen

## Short Pulses / Nanostructures

Aus diesen Gründen wurden in den letzten Jahren mehrere Verfahren zur Formkorrektur von optischen Bauteilen erforscht. Wir entwickeln eine Methode, bei der durch Aufschmelzen einer Glasoberfläche durch Bestrahlung mit einem Excimerlaser eine Zugspannung erzeugt wird (Abb. 1). Diese Zugspannung ist oberflächennah lokalisiert, durch Ätzen der Oberfläche verschwindet sie wieder. Durch rückseitige Bestrahlung eines Spiegelsubstrats kann mit dieser Methode eine Verformung der vorderseitigen Funktionsoberfläche kompensiert werden. Durch Anpassung des Bestrahlungsmusters und der Bestrahlungsparameter können auch kompliziertere Verformungen korrigiert werden (Abb. 2). Die Methode wurde bisher für das Dünnglas Schott D263 und Bestrahlung mit einem ArF-Excimerlaser mit einer Wellenlänge von 193 nm und einer Pulsdauer von ca. 20 ns untersucht. Die Verformung einer Probe aufgrund einer inhomogenen Funktionsschicht konnte erfolgreich durch eine Bestrahlung der Rückseite kompensiert werden (Abb. 3).

Due to these reasons, various methods for figure correction of optical parts have recently been explored. We have developed a method based on tensile surface stresses induced by short-time melting of a glass surface via irradiation with pulses from an excimer laser (Fig. 1). These stresses are located near the surface, as they disappear after etching the surface. Via backside irradiation of a mirror substrate, the deformation of the functional front of the substrate can be compensated. Also complicated deformations can be corrected by adjusting of the irradiation pattern and irradiation parameters (Fig. 2). So far, the method has been studied for samples of Schott D263 thin glass and irradiation with an ArF excimer laser with a wavelength of 193 nm and a pulse duration of about 20 ns. We have successfully compensated the deformation generated by an inhomogeneous functional film by irradiating the back of the sample (Fig. 3).

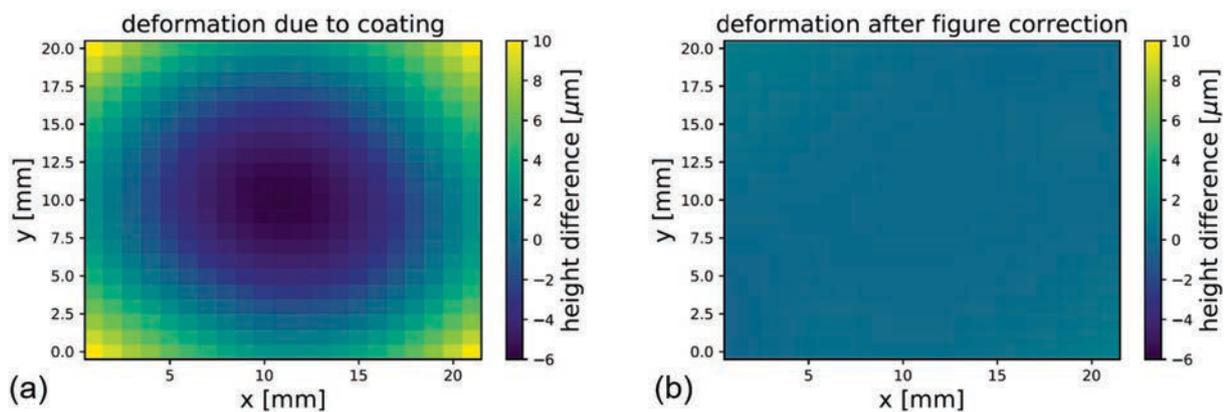


Abb. 3: Verformung der Funktionsoberfläche einer Probe durch Aufbringen einer spannungsbehafteten Schicht (a) und nach der Formkorrektur (b).

Fig. 3: Deformation of the functional surface of a sample after deposition of a stressed film (a) and after figure correction (b).

# Kurze Pulse / Nanostrukturen

## Short Pulses / Nanostructures

### Laserbearbeitung von Glas

Aufgrund der hohen Transparenz des Werkstoffs ist es technologisch anspruchsvoll, mittels Laserbearbeitung kontrastreiche Beschriftungen oder Markierungen auf Glasprodukten zu generieren. Demgegenüber steht ein stetig wachsender Marktbedarf. Ein attraktives Verfahren, das in der Abteilung seit vielen Jahren verfolgt und kontinuierlich weiterentwickelt wird, ist die diffraktive Markierung von Gläsern mit Excimerlasern. Die kurze Wellenlänge dieser Laser im ultravioletten Spektralbereich wird von den meisten Gläsern stark absorbiert, was die abtragende Materialbearbeitung erleichtert, und sie bietet den Vorzug einer hohen Auflösung. Bei der diffraktiven Markierung wird ein Interferenzmuster auf dem Glaswerkstück erzeugt, das sich über Materialabtrag in die Oberfläche überträgt. Zurück bleibt ein regelmäßiges Mikrorelief, das bei Beleuchtung brillante Spektralfarben hervorbringt, ähnlich wie von holographischen Sicherheitsmerkmalen auf Banknoten bekannt.

### Laser processing of glass

Due to the high transparency of the material, it is technologically demanding to use laser processing to generate high-contrast lettering or markings on glass products. In contrast, there is a steadily growing market demand. An attractive process that the department has been pursuing for many years and continuously developing is the diffractive marking of glasses with excimer lasers. The short wavelength of these lasers in the ultraviolet spectral range is strongly absorbed by most glasses, which facilitates the material removal and offers the advantage of high resolution. With diffractive marking, an interference pattern is created on the glass workpiece, which is transferred to the surface by removing material. What remains is a regular microrelief which, when illuminated, produces brilliant spectral colors, similar to what is known from holographic security features on banknotes.



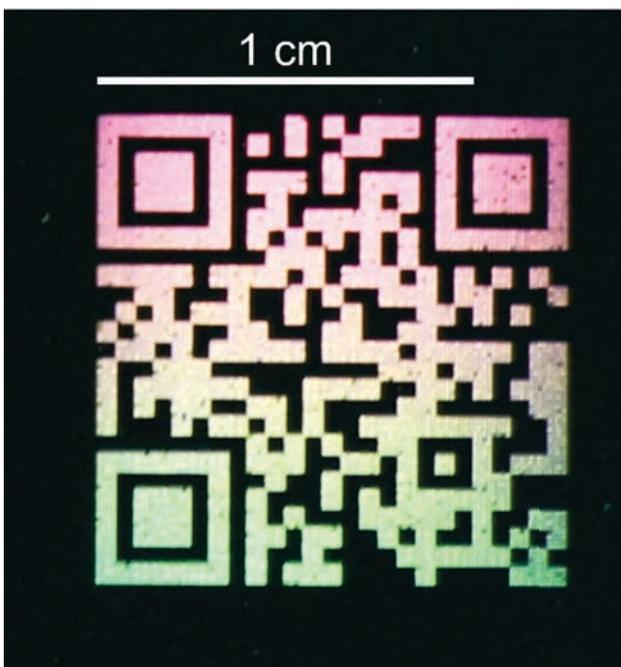
▲  
Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme eines Mikro-Reliefgitters in Glas.  
Scanning electron microscope image of a microrelief grating in glass.

# Kurze Pulse / Nanostrukturen

## Short Pulses / Nanostructures

In einem vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie geförderten Projekt konnte unser Verfahren abermals hinsichtlich Prozessgeschwindigkeit, Effizienz und Eignung für verschiedene Anwendungsprofile verbessert werden. Das Glaswerkstück wird dabei kontinuierlich unter dem Laserstrahl hindurch bewegt, wobei Bewegung und Repetitionsfrequenz des Lasers zueinander synchronisiert werden (BrIT - Breakpoint Induced Triggering). Durch diese Prozessführung können Flächen im Quadratzentimetermaßstab innerhalb weniger Sekunden markiert werden (FLAG-Methode - Fast Large Area Grating). Eine spezielle Abbildungsoptik sorgt für eine verbesserte Homogenität der lasergenerierten Mikroreliefs und ermöglicht zudem eine Anpassung der Geometrie des Laserspots an das gegebene Bearbeitungsziel. Speziell lassen sich extrem elongierte Laserspots von z. B. 10 mm x 0,5 mm erzeugen, mit denen entsprechend große Flächen bearbeitet werden können. Durch Verwendung von Kontaktmasken lassen sich Markierungen mit einer vorgegebenen Außenkontur erzeugen. Schließlich ist das Verfahren auch dafür geeignet, moderat gekrümmte Glasoberflächen zuverlässig zu markieren.

In a project funded by the Federal Ministry for Economic Affairs and Energy, our method was again improved in terms of process speed, efficiency and suitability for various application profiles. The glass workpiece is continuously moved under the laser beam, the movement and repetition frequency of the laser being synchronized with one another (BrIT - Breakpoint Induced Triggering). This process management enables areas to be marked on a square centimeter scale within a few seconds (FLAG method - Fast Large Area Grating). Special imaging optics ensure improved homogeneity of the laser-generated microreliefs and also enable the geometry of the laser spot to be adapted to the given processing goal. In particular, extremely elongated laser spots of, 10 mm x 0.5 mm, for example, can be produced, with which correspondingly large areas can be processed. By using contact masks, markings with a predetermined outer contour can be generated. Finally, the method is also suitable for reliably marking moderately curved glass surfaces.



◀ Diffraktiver QR-Code auf Kalknatronglas, hergestellt mittels Laserablation.  
Diffractive QR code on soda lime glass, produced by laser ablation.

# Berichte aus der Abteilung Departmental Reports



**Dr. Klaus Mann**  
Abteilungsleiter

T +49-(0) 551/5035-41  
F +49-(0) 551/5035-99  
M klaus.mann@ifnano.de

## MITARBEITENDE / STAFF MEMBERS

Dr. Matthias Müller

Dr. Markus Muchow

Dr. Bernd Schäfer

Dr. Jennifer Zimara

Sascha Bickhardt

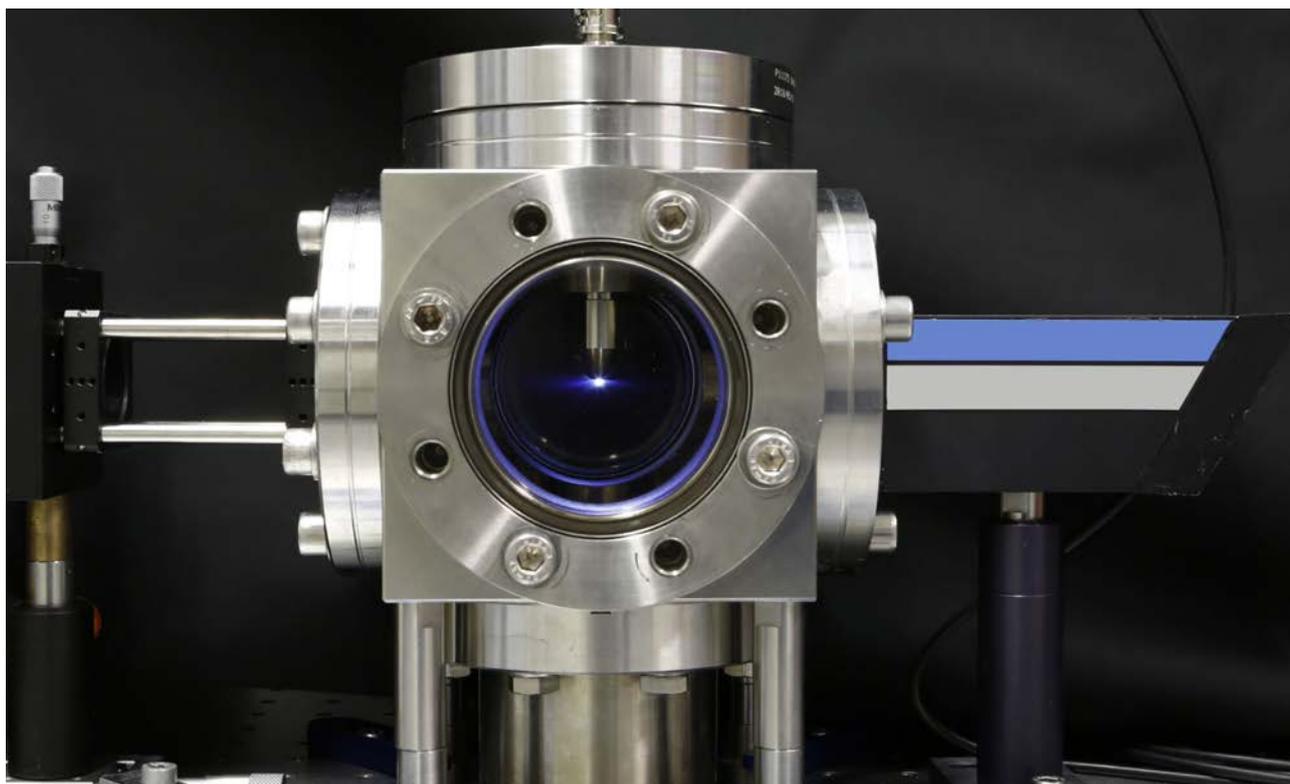
Jens-Oliver Dette

Jonathan Holburg

Simon Lange

Maik Lübbecke

Meike Schellhorn



# Optik / Kurze Wellenlängen

## Optics / Short Wavelengths

Die Abteilung „Optik / Kurze Wellenlängen“ des Instituts für Nanophotonik beschäftigt sich mit der Propagation von Laserstrahlung, d. h. einerseits mit dem Abstrahlverhalten von Lasern, andererseits auch mit der Charakterisierung von Hochleistungs-optiken zur Strahlführung. Der Schwerpunkt liegt auf den für die Halbleiter-Lithographie relevanten tiefen UV-Wellenlängen, alle anderen gebräuchlichen Laser-Wellenlängen sind aber ebenso verfügbar.

Es werden Messapparaturen zur umfassenden Bewertung der Qualität und der Strahlungsstabilität optischer Komponenten betrieben. Damit lassen sich u.a. deren Absorption, thermische Linseneffekte, Zerstörschwellen sowie das Langzeit-Degradationsverhalten präzise ermitteln. Zusätzlich werden auch die Propagations- und Kohärenzeigenschaften von Laserstrahlung vermessen, u.a. mit verschiedenen hochauflösenden Wellenfrontsensoren.

Außerdem wird an der Weiterentwicklung kompakter Quellen für EUV- und weiche Röntgenstrahlung gearbeitet; 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 bei der Wellenlänge 13,5 nm.

The Optics / Short Wavelengths department of the Institut für Nanophotonik is concerned with the characterization of laser sources as well as high-quality optics for beam steering and shaping. The Main focus is put on the deep UV wavelengths relevant for semiconductor microlithography. Other common laser wavelengths are also available.

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

Furthermore, compact EUV / XUV sources for metrological applications with soft X-rays are being developed (optics testing, reflectometry, NEXAFS for chemical analysis, “water window” microscopy). Stability tests of EUV optics and sensors at 13.5 nm are accomplished by focusing the short wavelength radiation with the help of appropriate optical elements.

# 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 nicht-lineare 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.

### Characterization of laser optics

The aim of activities over the last 20 years connected with the characterization of optics 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 non-linear effects, is of great importance, especially for the semiconductor lithography wavelengths 248 and 193 nm. In addition, due to steadily increasing laser powers, the thermally induced wavefront deformation in laser optics has become an issue of increasing relevance.

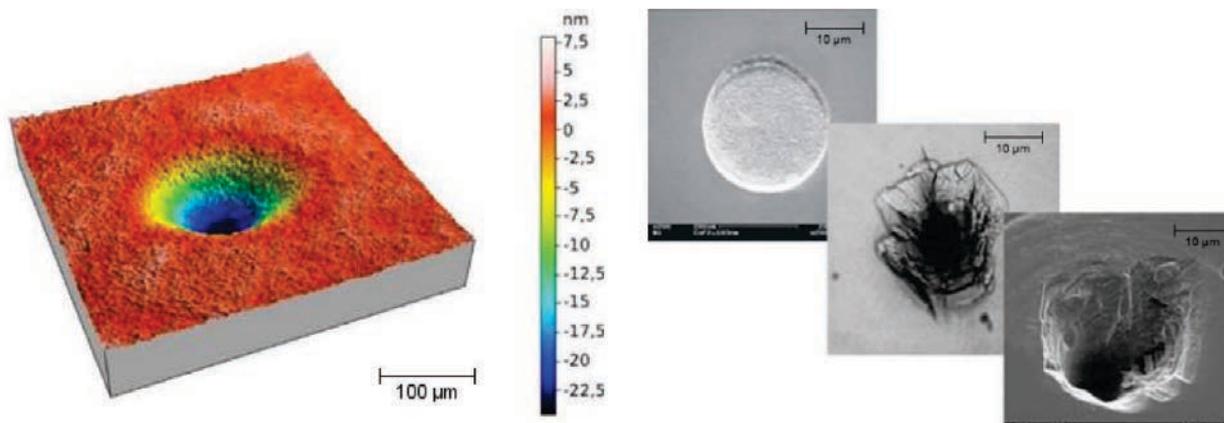


Abb. 1: (Links) Kompaktierung einer Quarz-Probe durch ArF-Excimerlaser-Bestrahlung (108 Pulse, Weißlicht-Interferogramm) und (rechts) morphologische Schädigungen optischer Komponenten bei der LIDT-Bestimmung.

Fig. 1: (Left) compaction of a quartz sample under ArF excimer laser irradiation (108 pulses, white light interferogram); (right) morphological damages of optical components after LIDT testing.

# Optik / Kurze Wellenlängen

## Optics / Short Wavelengths

Als Schlüsselparameter für die Stabilität optischer Materialien ist die Absorption anzusehen: Die im Volumen und vor allem an der Oberfläche bzw. der Beschichtung von Optiken absorbierte Laserstrahlung führt zu einer inhomogenen Temperaturverteilung, die infolge thermischer Ausdehnung sowie Brechungsindexgradienten und inneren Spannungen im Material mit dem Auftreten einer „thermischen Linse“ verbunden ist.

Dieser unerwünschte Effekt lässt sich zur quantitativen Bestimmung der Absorption optischer Materialien nutzen. Hierzu wurde ein auf Wellenfrontmessungen mit einem hochempfindlichen Hartmann-Shack-Sensor basierendes photothermisches Messsystem entwickelt und in den letzten Jahren zur Absorptionsmessung bei zahlreichen relevanten Laser-Wellenlängen im NIR-, Vis- und UV-Bereich eingesetzt (siehe Abb. 2). Der experimentelle Aufbau wurde zuletzt um ein Probenpositioniersystem erweitert, so dass die Absorption nun auch ort aufgelöst erfasst werden kann (siehe Konturdarstellungen).

The key parameter for the stability of optical materials is absorption: the absorbed laser radiation in the bulk and especially on the surface or coating of optics leads to an inhomogeneous temperature distribution which is - due to thermal expansion, refractive index gradients and internal stresses in the material - associated with the occurrence of a “thermal lens.”

This undesirable effect can, however, be employed for a quantitative determination of the absorption of optical materials. For this purpose, a photothermal measuring system based on wavefront measurements with a high-sensitive Hartmann-Shack sensor was developed and applied in recent years for absorption measurements at several relevant laser wavelengths in the NIR, Vis, and UV range (see Fig. 2). Recently, the experimental setup was extended by a sample positioning system which allows the measurement of spatially resolved absorption (see contour plots).

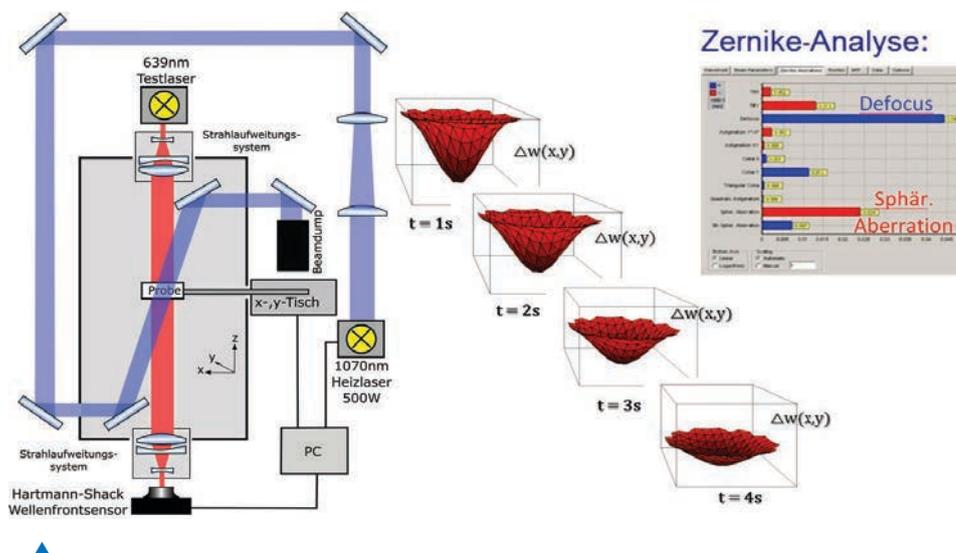


Abb. 2: Aufbau des photothermischen Messsystems zur quantitativen Auswertung des Focus Shift-Effekts und der induzierten Aberrationen.

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

# Optik / Kurze Wellenlängen

## Optics / Short Wavelengths

### Hyperspektralmessung zur Charakterisierung von Schichtuniformitäten

Im BMBF-Projekt „EPIC-Lens“ wird ein Messsystem zur Uniformitätskontrolle optischer Präzisionsbeschichtungen auf der Grundlage hyperspektraler Messtechnik entwickelt. Projektziel ist es, eine In-situ-Messtechnik mit hoher örtlicher sowie spektraler Auflösung zu entwickeln, die bereits während der Beschichtung von Planoptiken zur Qualitätskontrolle eingesetzt werden kann.

Optische Strahlführung, die automatisierte Datenaufnahme und -auswertung, insbesondere die Verarbeitung der hyperspektralen Messdaten, sind essenzielle Bestandteile zur Umsetzung des Messsystems, das bereits erfolgreich im Ex-situ-Laboraufbau getestet wurde. Die Hyperspektralkamera erzeugt aufgrund wellenlängensensitiver Bänder (B) spektral aufgelöste Transmissionsbilder (T) entlang einer Ortskoordinate. Über den Vorschub der Probe wird sequenziell die zweite Ortskoordinate vermessen.

### Characterization of coating uniformities using a hyperspectral measurement technique

Within the BMBF project EPIC-Lens, starting in 2018, the Optics / Short Wavelengths department is developing a new in situ diagnostic system based on a hyperspectral measurement technique in order to detect inhomogeneities in optical coating processes with high spectral and spatial resolution.

The automated data acquisition and data analysis, in particular the post-processing of hyperspectral measurement data, is an essential part of this diagnostics system and could already be demonstrated in ex situ measurements (see Fig. 1). Due to wavelength sensitive bands (B) the hyperspectral camera generates spectrally resolved transmission images (T) along one spatial coordinate. The progressive feed of the sample sequentially yields the second spatial coordinate. In this way, a 3D data cube (x, y, T) is generated.

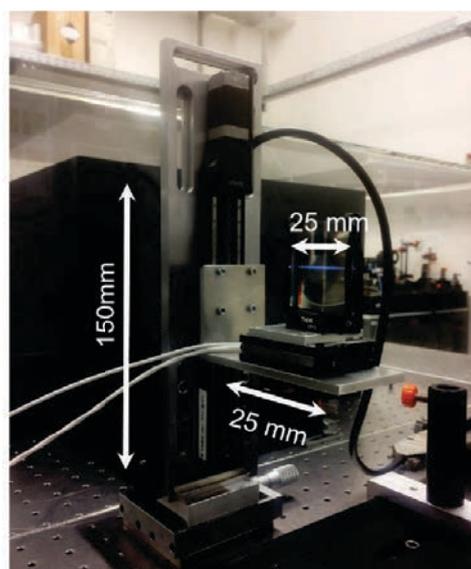
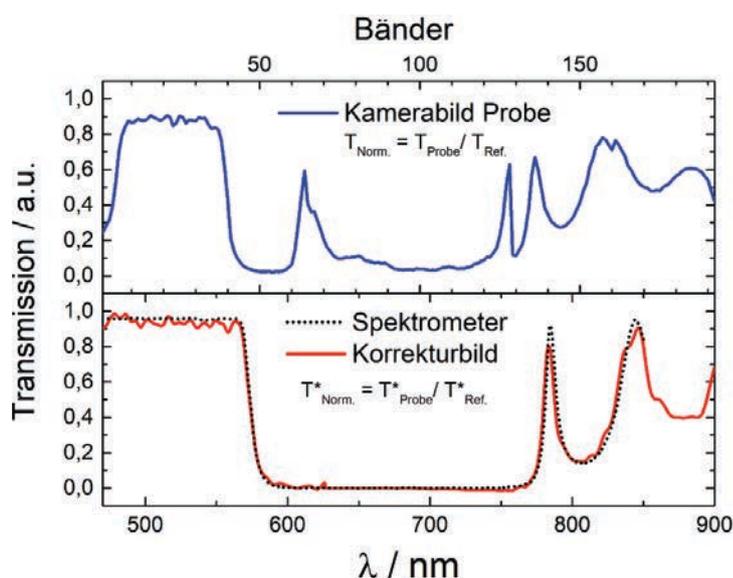


Abb. 1: (Links) Spektrale Transmission aus unkorrigiertem Kamerabild ( $T_{\text{Norm}}$ ) in Abhängigkeit der Bandinformation an einer beliebigen Ortskoordinate (oben) sowie korrigiertes Kamerabild ( $T^*_{\text{Norm}}$ ) im Vergleich zu Spektrometerdaten. (Rechts) Elektrisch ansteuerbare x-y-Translationseinheiten zum Verfahren der Probe.

Fig. 1: (Left) spectral transmission from uncorrected camera image ( $T_{\text{Norm}}$ ) depending on band information in comparison to the spectrally corrected image ( $T^*_{\text{Norm}}$ ) and corresponding spectrometer data. (Right) x-y translation stage for sample position adjustment.

# Optik / Kurze Wellenlängen

## Optics / Short Wavelengths

Auf diese Weise wird ein 3D-Datenwürfel ( $x, y, T$ ) generiert. Die reine Bandinformation kann jedoch nicht unmittelbar mit der spektralen Information gleichgesetzt werden, da die Bänder zum Teil für mehrere Wellenlängen aktiv sind und zunächst über numerische Optimierungsverfahren korrigiert werden müssen (siehe Abb. 1). Je nach Fragestellung können letztlich unterschiedliche Abhängigkeiten mit dem Datenwürfel betrachtet werden. Anhand einer  $x$ - $y$ -Oberflächendarstellung (siehe Abb. 2) kann beispielsweise die örtliche spektrale Homogenität überprüft und der Beschichtungsprozess entsprechend optimiert werden.

However, spectral camera bands may be sensitive to more than one wavelength. Therefore, the band information is not directly comparable to spectral information, requiring additional numerical optimization processes (see Fig. 1). With the data cube corrected at different wavelengths, different sample properties can be addressed.

For example, on an  $x$ - $y$  surface plot, local spectral coating inhomogeneities can be visualized (see Fig. 2), qualifying the actual coating process.

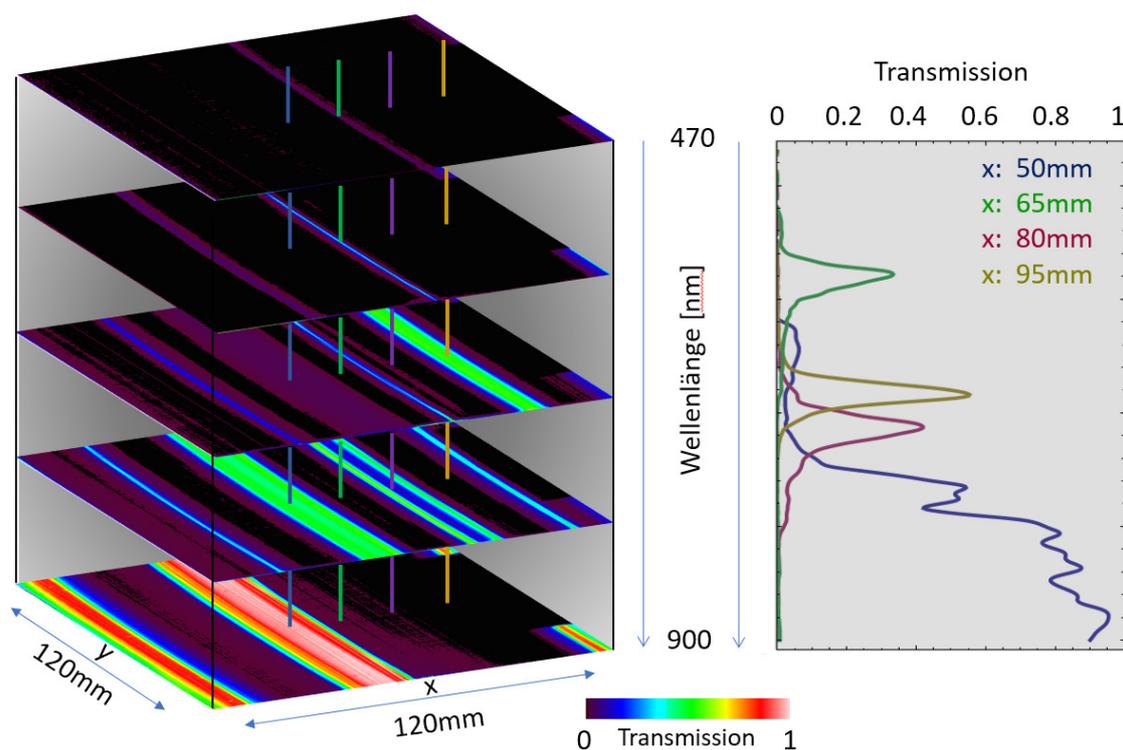


Abb. 2: Transmission eines gemessenen „Regenbogen“-Spektralfilters für fünf verschiedene Wellenlängen. Die örtliche Variation der spektralen Transmission in  $x$ -Richtung ist deutlich zu erkennen. Das rechte Diagramm zeigt den spektralen Transmissionsverlauf an vier verschiedenen  $x$ -Positionen.

Fig. 2: Laterally resolved transmission of a measured “rainbow” spectral filter for five different wavelengths. Strong horizontal variations of spectral transmission are evident. The diagram on the right shows transmission spectra at four different  $x$ -positions.

# Optik / Kurze Wellenlängen

## Optics / Short Wavelengths

### Polarisationsempfindlicher Wellenfrontsensor

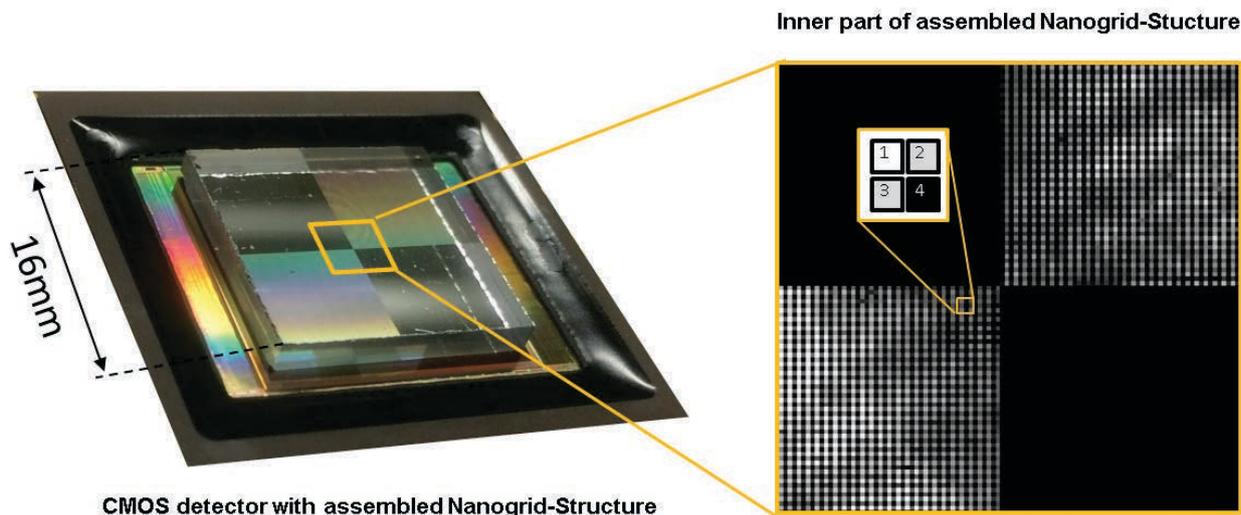
2017 startete zusammen mit den Projektpartnern Primes GmbH, SillOptics GmbH & Co KG, AMO GmbH sowie der Saueressig GmbH & Co KG das BMBF-Photonic-Plus-Verbundvorhaben „Polarisationsempfindlicher Wellenfrontsensor auf Basis von „Nano-Gittern zur Charakterisierung thermischer Aberrationen in Hochleistungs-Laseroptiken“ - NANOPOL. Projektziel ist die Entwicklung eines polarisationssensitiven Wellenfrontsensors, der eine hochauflösende Lichtfeldanalyse und daraus die Bestimmung und Überwachung prozessrelevanter Strahlparameter in Echtzeit gestattet.

Auf Grundlage dieser Daten soll eine Reduzierung thermisch induzierter Aberrationen erfolgen, und zwar in laseroptischen Systemen und für konkrete Laser-Bearbeitungsprozesse in industriellen Produktionsanlagen.

### Polarization-sensitive wavefront sensor

In 2017, IFNANO commenced activities within the framework of the BMBF joint project NANOPOL. The Principal purpose will be the development of a polarization-sensitive wavefront sensor based on the principle of the curvature sensor and utilizing a polarizing nanogrid structure, respectively. Based on a high spatial resolution beam diagnostic, the sensor shall accomplish real time determination and survey of important beam parameters.

The latter shall permit a reduction of thermally induced aberrations in laser material-processing applications for industrial production facilities.



▲  
Abb. 1: (Links) Prototyp des polarisationsempfindlichen Sensors. (Rechts) Die Intensitätsverteilung unter Bestrahlung mit linear polarisiertem Licht bei 520 nm zeigt deutlich die 2 x 2 Einheitszellen mit unterschiedlicher Intensität der 4 Pixel.  
Fig. 1: (Left): prototype of the polarization sensitive sensor, (right): the intensity distribution irradiated with linear polarized light at 520 nm clearly shows the 2 x 2 unit cells with unequal luminance of each pixel.

# Optik / Kurze Wellenlängen

## Optics / Short Wavelengths

Ziel des IFNANO-Teilvorhabens ist dabei der Aufbau des polarisationsempfindlichen Moduls auf Basis eines Wellenfront-Krümmungssensors in Kombination mit polarisierenden Nanogittern zur simultanen Aufnahme von zwei bis zu vier Profilen eines Laserstrahls. Der Sensor soll im Projektverlauf in ein Messsystem der Primes GmbH integriert werden.

Als polarisierendes Element ist ein lithographisch hergestelltes Array von Sub-Wellenlängen-Gitterstrukturen aus Aluminium auf einem Quarzglassubstrat vorgesehen. Die Elementarzelle dieses Nanogitter-Arrays besteht aus vier Gittern mit unterschiedlicher Orientierung, die genau vier Pixel des verwendeten CMOS-Detektors abdecken (siehe Abb. 1). Mit dem neuen Sensor kann die Wellenfrontrekonstruktion wahlweise für jede Polarisationsrichtung separat oder unter Mittelung über die 4 Teilgitter erfolgen. Zudem besteht die Möglichkeit, den Polarisationszustand lokal über die Bestimmung der Stokes-Parameter zu charakterisieren.

Main issue of the IFNANO part within NANOPOL is the setup of the polarization-sensitive sensor module together with the development of corresponding analysis software. In the course of the project progress the IFNANO module shall be integrated into a Primes GmbH measurement system.

The intended polarizing element consists of an array of sub-wavelength structures on a fused silica substrate, which shall be manufactured by AMO with an adapted lithographic process. The unit cell of the array consists of four grids with different orientations covering precisely four pixels of the used CMOS detector. By this means, wavefront reconstruction can be performed for each polarization separately, and furthermore the local state of polarization may be characterized by determination of the Stokes parameters.

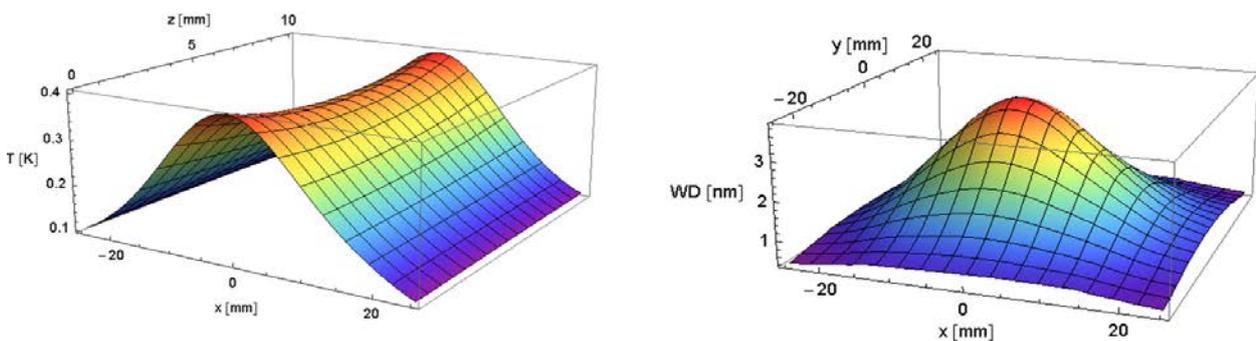


Abb. 2: Thermo-mechanische Simulationen im NANOPOL-Messsystem für Hochleistungslaser. Links: Numerisch berechnete Temperaturverteilung  $T(x,y = 0,z)$  in der ersten Abschwächerplatte des Strahlteilers. Rechtes Bild: Simulierte Wellenfrontdeformation nach Reflexion am Abschwächer. Es ergeben sich Werte von 3,4 nm Peak-Valley und 0,8 nm für die RMS-Wellenfrontdeformation.

Fig. 2: Thermo-mechanical simulations of the NANOPOL-setup for high power CW lasers. Left: numerically calculated temperature distribution  $T(x,y = 0,z)$  within the first attenuator plate of the beam splitter, right: picture simulated wavefront deformation after reflection at the beam splitter. Values for peak-valley irregularity and RMS-wavefront deformation are 3.4 nm and 0.8 nm, respectively.

# Optik / Kurze Wellenlängen

## Optics / Short Wavelengths

### Charakterisierung teilkohärenter Strahlung / Wigner-Verteilung

Als Fouriertransformierte der Kohärenzfunktion beinhaltet die Wigner-Verteilung die volle Beschreibung des Propagationsverhaltens eines Strahls, ebenso alle Informationen über dessen räumliche Kohärenz, die sonst nur mit hohem Aufwand experimentell ermittelt werden können. Allgemein kann sie als Radianz vom Ort  $x$  in Richtung  $u$  interpretiert werden.

In langjähriger Kooperation mit DESY / Hamburg wurde ein tomographisches Verfahren zur Bestimmung der Wigner-Verteilung am Freie-Elektronen-Laser FLASH entwickelt (siehe Abb. 1). Da dieses Verfahren allerdings bisher nur einen Teil der Wigner-Verteilung erfassen konnte, wurde das Verfahren in den letzten Jahren verbessert. Durch einen drehbaren Toroid-Spiegel kann die vollständige, vierdimensionale Wigner-Verteilung (siehe 2D-Projektion) rekonstruiert werden. Testmessungen am IFNANO für bekannte Strahlen unterschiedlicher Komplexität zeigten die Eignung des verbesserten Verfahrens für die Strahlcharakterisierung.

### Characterization of partially coherent radiation by Wigner measurements

As the Fourier transform of the mutual coherence function, the Wigner distribution function (WDF) contains the full propagation characteristics of a beam as well as its spatial coherence information, which normally is only accessible with high experimental effort. Generally, one can interpret the WDF as the radiance from point  $x$  into direction  $u$ .

In a long-standing cooperation with DESY / Hamburg, a tomographic method to determine the WDF at the free-electron-laser FLASH was developed (see Fig. 1). Since previous methods could only probe parts of the WDF, the method was improved using a rotatable toroidal mirror, which allows for the full reconstruction of the four-dimensional WDF (see 2D projections). The method was qualified at IFNANO using well-characterized radiation sources of different complexity.

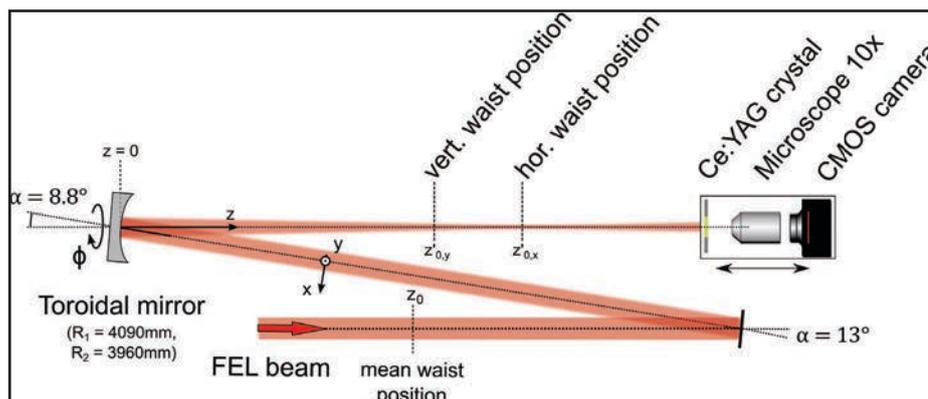


Abb. 1: Skizze der experimentellen Anordnung zur Messung der 4D-Wigner-Verteilung. Der Strahl des Freie-Elektronen-Lasers (FEL) trifft auf einen Toroid-Spiegel. Der Spiegel fokussiert den Strahl auf einen Ce:YAG-Kristall mit einer Kamera, die entlang der Kaustik bewegt werden kann und die Strahlprofile an verschiedenen Positionen der Kaustik sowie für verschiedene Drehwinkel des Toroid-Spiegels aufzeichnet.

Fig. 1: Sketch of the experimental setup for measuring the 4D Wigner distribution function. The FEL beam hits the toroidal mirror and is focused onto a Ce:YAG crystal in front of a microscopic camera, which can be moved along the beam axis, capturing beam profiles for different positions along the caustic as well as for different rotation angles of the mirror.

# Optik / Kurze Wellenlängen

## Optics / Short Wavelengths

Im Laufe der Jahre 2019/20 wurde der Aufbau erneut verbessert. So wurde ein Ce:YAG-Kristall als Szintillator genutzt, wodurch die Qualität der aufgenommenen Kaustik (siehe Strahlprofile) deutlich anstieg und eine höhere Abbildungsaufösung erreicht werden konnte. In einer weiteren Messzeit konnten so neue Daten gewonnen werden, die momentan zur Veröffentlichung vorbereitet werden (siehe Abb. 2).

In 2019/20, the setup was further improved. The use of a Ce:YAG crystal as a scintillator greatly enhanced the quality of the caustic measurement (see beam profiles) and enabled a better image resolution. In additional measurements, we were able to record new data, which are currently being processed for publishing (Fig. 2).

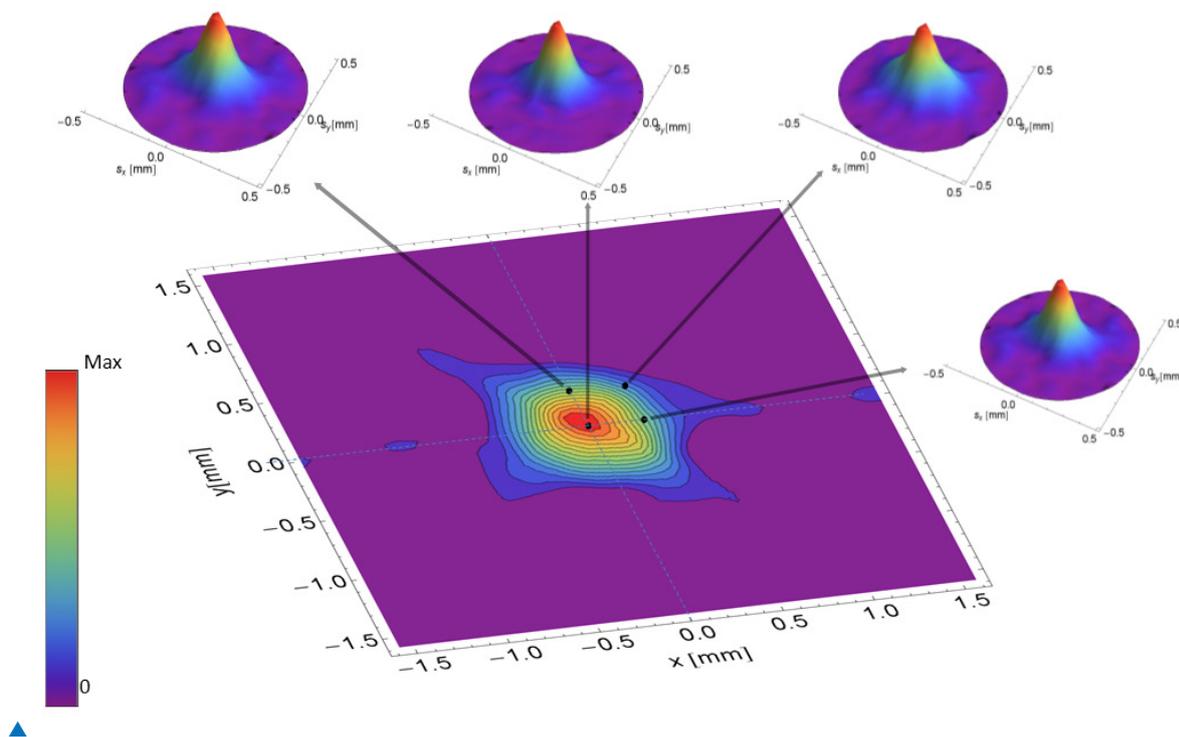


Abb. 2 Intensitätsverteilung am Ort der Strahltaile sowie der Betrag des komplexen Kohärenzgrades für 4 Positionen (schwarze Kreise) innerhalb des Strahlprofils für eine 9-Undulator-Konfiguration von FLASH2.

Fig. 2: Intensity distribution at waist position and absolute value of the complex degree of coherence, evaluated at four selected points, indicated as black circles, within the beam profile for a 9-undulator configuration of FLASH2.

# Optik / Kurze Wellenlängen

## Optics / Short Wavelengths

### Kompakte Laborquellen für weiche Röntgen- und EUV-Strahlung

Weiche Röntgen- und EUV-Strahlung ermöglicht eine Vielzahl anwendungsbezogener Forschungsaktivitäten: So wird Strahlung bei  $\lambda = 13,5 \text{ nm}$  u.a. in der EUV-Halbleiterlithographie zur Fertigung von mikroelektronischen Schaltkreisen genutzt. Gepulste Röntgenstrahlung wird zum Beispiel für innovative Anwendungen benötigt, die von der strukturellen Analytik in der Biologie und den Lebenswissenschaften bis hin zur Untersuchung von Wechselwirkungsmechanismen mit Materie reichen.

Am IFNANO werden auf Basis laserinduzierter Plasmen diverse kompakte Quellen für weiche Röntgen- und EUV-Strahlung im Spektralbereich von  $1 - 20 \text{ nm}$  betrieben. Die Plasmaquellen nutzen einen gepulsten Gasstrahl als Lasertarget, der im Gegensatz zu anderen Targets (z.B. Festkörper, Flüssigkeiten) einen langzeitstabilen und sauberen Betrieb bei äußerst kompakter Bauweise ermöglicht.

### Laboratory-scale soft X-ray and EUV radiation sources

EUV and soft X-ray radiation form the basis for a variety of applied research activities: radiation at  $\lambda = 13.5 \text{ nm}$  is used in EUV semiconductor lithography for the production of microelectronic circuits. Pulsed X-rays are employed for many innovative applications ranging from structural analysis in biology and life sciences to the investigation of fundamental mechanisms of interaction with matter.

The plasma sources operated at IFNANO make use of a pulsed gas jet as the laser target, which allows, in contrast to other targets (solids, liquids), a long-term stable and clean operation in an extremely compact design.

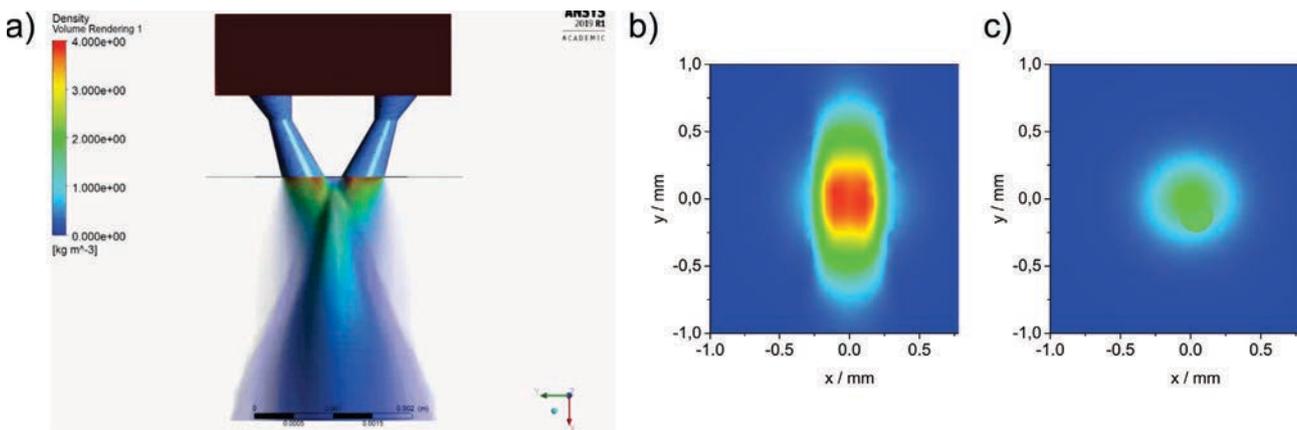


Abb. 1: a) 3D-Simulation der Gasverteilung bei der Doppeldüse. b), c) 2D-Querschnitt der Dichteverteilung 1 mm unter der Düsenöffnung für die Doppeldüse (b) und Einzeldüse (c). Die Dichteverteilung des Gases ist bedeutend höher bei der Doppeldüse.  
Fig. 1: a) 3D-simulation of the gas density distribution with a double nozzle: b), c) 2D-simulation of the gas density 1 mm below the nozzle for the new (b) and old (c) nozzle. The plasma intensity of the new nozzle is significantly higher.

# Optik / Kurze Wellenlängen

## Optics / Short Wavelengths

Die Brillanz der Quelle wurde im letzten Jahr durch eine optimierte Düsengeometrie (siehe Skizze zum Düsendesign) um einen Faktor 3 verbessert, indem zwei konische Düsenöffnungen in einem Winkel von  $45^\circ$  zueinander zur Formung eines Gasstrahls höherer Dichte verwendet wurden (siehe Abb. 1). Zusätzlich wurde der Winkel des Lasereinfalls von  $90^\circ$  auf  $20^\circ$  optimiert.

Darauf aufbauend wurde ein Labormesssystem für EUV-Strahlung entwickelt, das u.a. für Ablationsexperimente (siehe Fokusprofil und Ablation PMMA), aber auch für Metrologie z.B. zur Qualifizierung von EUV-Sensoren geeignet ist. Zudem wurde unter Nutzung des optimierten Düsendesigns ein Xenonspektrum hinter einem Zirkonfilter aufgenommen (siehe Abb. 2). Die Intensität der 13,5 nm-Linie konnte um einen Faktor 2 erhöht werden.

Due to an optimized nozzle design (see sketch of nozzle design) the brilliance of the source could be increased by a factor of three within the last year by using two conical nozzle openings which are tilted to each other by  $45^\circ$  to form a gas jet with higher density (see Fig. 1). Additionally, the angle of incidence for the laser beam was optimized from  $20^\circ$  to  $90^\circ$ .

On this basis, a laboratory-scale EUV system was developed, which is suitable for ablation experiments (see focal spot size and ablation imprint PMMA), but also for metrology applications, for example for the qualification of EUV sensors. Furthermore, using the optimized nozzle design, a Xenon spectrum was observed behind a zirconium filter (see Fig. 2). The intensity of the 13.5 nm line was increased by a factor of two.

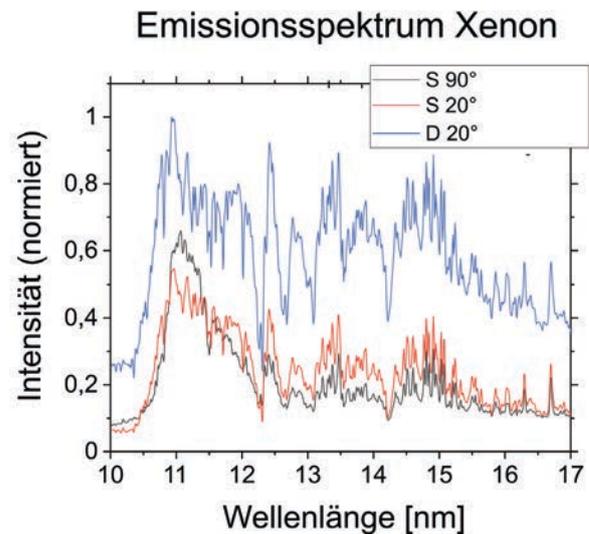
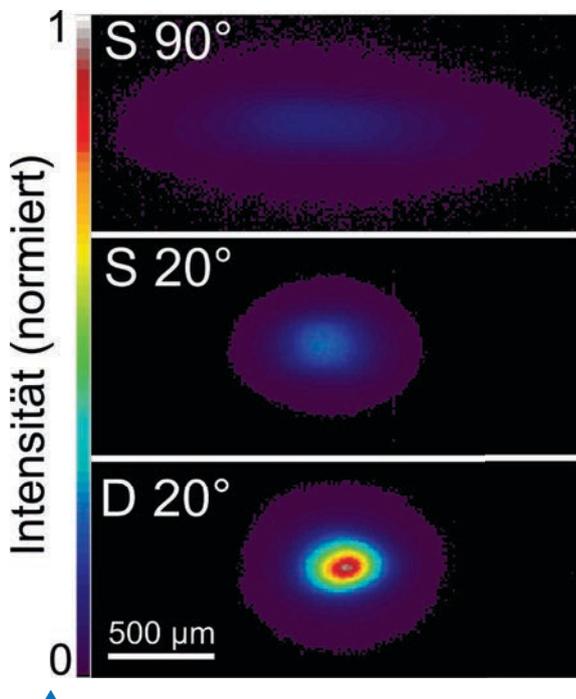


Abb. 2: links: Aufnahme des Plasmas mit einer Pinholekamera. Im Vergleich der Einzeldüse (S) zur Doppeldüse (D) erhöht sich die Plasmapintensität signifikant. Rechts: Normierte Xenon-Emissionsspektren im EUV-Bereich. Die Intensität des gesamten Spektrums bei der Doppeldüse ist deutlich stärker.

Fig. 2: Left: capture of the plasma with a pinhole camera. The change from the old nozzle (S) to the new nozzle (D) increased the intensity of the plasma significantly; right: normalized xenon emission spectra in the EUV spectral range. The intensity of the spectrum for the new nozzle is significantly higher.

# Optik / Kurze Wellenlängen

## Optics / Short Wavelengths

### Röntgenabsorptionsspektroskopie (NEXAFS)

Auf Basis der kompakten Röntgenquelle wurde ein Labormesssystem zur Absorptionsspektroskopie für den Wellenlängenbereich von  $\lambda = 1 - 5 \text{ nm}$  entwickelt (siehe Abb. 1). Als Quelle wird ein in diesem Bereich breitbandig emittierendes laserinduziertes Krypton-Plasma genutzt. Mit dem nachfolgenden Spektrometer lässt sich an dünnen Transmissionsproben die Lage der Röntgenabsorptionskanten und damit der Bindungszustand vieler wichtiger Elemente (u.a. C, N, O, Ca, Ti, Mn, Fe, Cu) genau vermessen (siehe Abb. 2). Deren Feinstruktur (NEXAFS = Near Edge X-ray Absorption Fine Structure) gestattet Aussagen über die Molekülorbitale, den Oxidationszustand und die Koordination des absorbierenden Elements, kann also zur chemischen Analytik eingesetzt werden.

### X-ray absorption spectroscopy (NEXAFS)

A soft X-ray spectrometer for analysis of the near-edge X-ray absorption fine structure (NEXAFS) of thin samples is being developed (see Fig. 1), employing the laboratory-scale laser plasma source described above. Utilizing krypton or xenon as the target gas, it emits in the spectral range between  $\lambda = 1 - 5 \text{ nm}$  covering the absorption edges of important elements, such as C, N, O, Ca, Ti, Mn, Fe, and Cu. The fine structure of the absorption edges yields information on molecular orbitals, oxidation states, and the coordination of absorbing elements, and can therefore be applied for chemical analysis. Single-pulse NEXAFS spectra (see Fig. 2) are obtained from broadband plasma radiation transmitted through a thin sample, divided by a reference spectrum without the sample.

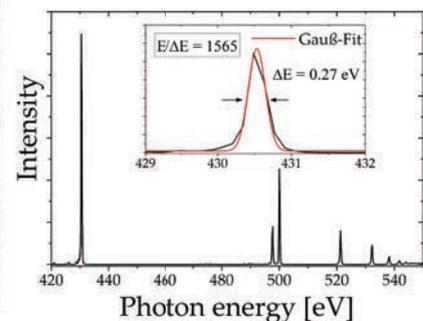
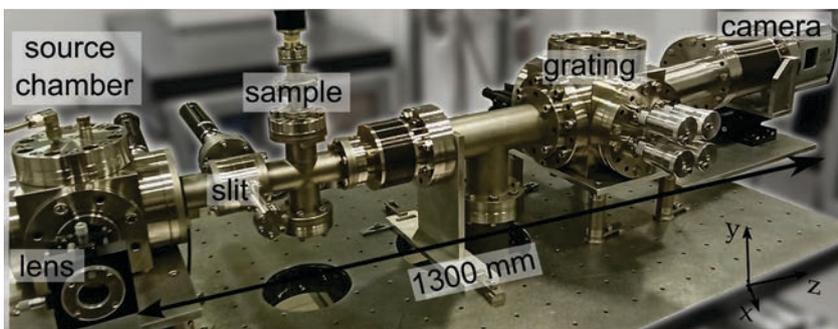


Abb. 1: (Links) Foto des kompakten NEXAFS-Spektrometers und (rechts) Emissionsspektrum von Stickstoff im EUV-Spektralbereich inklusive der berechneten Auflösung an der 2,88 nm-Linie.

Fig. 1: (Left) Photograph of the laboratory-scale NEXAFS spectrometer and (right) spectral resolution of the laboratory system determined by the emission line of nitrogen at  $\lambda = 2.88 \text{ nm}$  for (top) previous and (bottom) new reflection grating.

# 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 ZIM-Projektes ELaRA im letzten Jahr konnte die Frequenz der Gasdüse und des Lasers durch besseres Abpumpen des Gases in Quell- und Gitterkammer bei der Messung von Emissionsspektren von bisher 10 Hz auf 25 Hz gesteigert werden.

The samples can be held in vacuum or in a Helium purged chamber specially developed for the compact NEXAFS spectrometer under atmospheric pressure. Within the ZIM project ELaRA during the last year, the repetition rate of the gas valve as well as the laser could be increased from 10 Hz to 25 Hz. This was achieved by a more sophisticated use of vacuum pumps both in the source chamber as well as in the grating chamber.

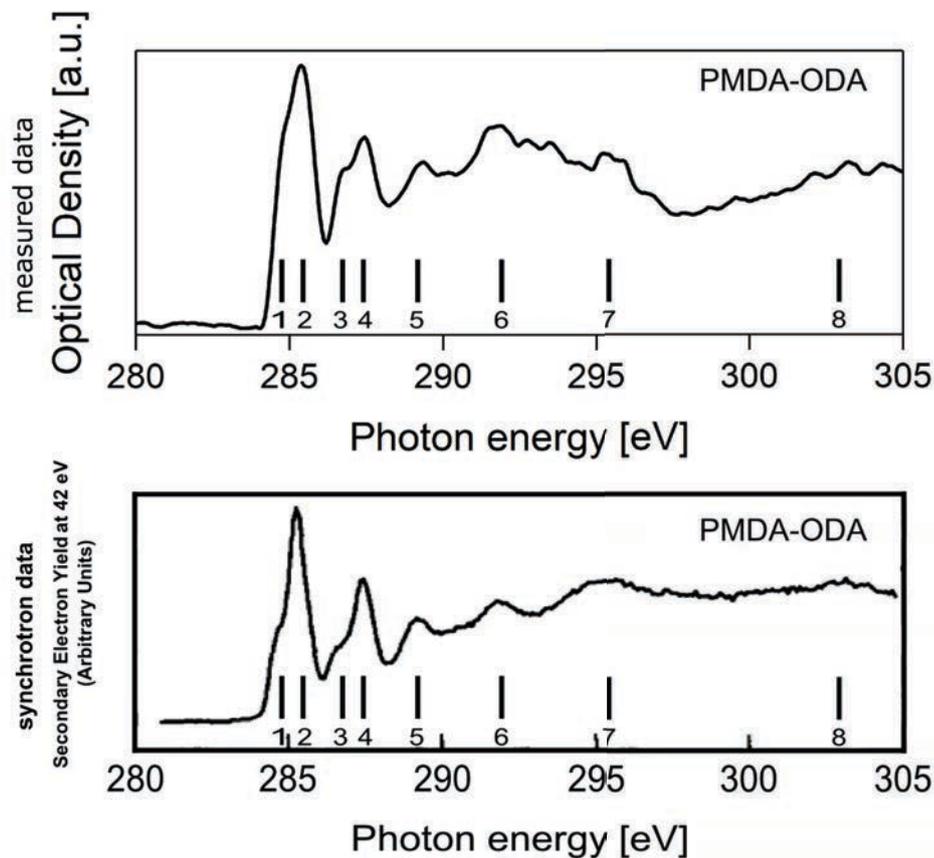


Abb. 2: NEXAFS-Spektrum einer PMDA-ODA-Polyimid-Probe (oben) an der Kohlenstoffkante im Vergleich zu Synchrotrondaten (unten) von Jordan-Sweet et. al., J. Chem. Phys. 89(4), 2482-2489 (1988). Es ist eine sehr gute Übereinstimmung festzustellen. Fig. 2: (Left) Oxygen K-edge and (right) iron L3,2-edge NEXAFS spectra of goethite utilizing the previous and new reflection grating in comparison to synchrotron data taken by Brandt et al., Chemical Geology 329, 42-52 (2012). The measured data is in very good agreement with the synchrotron data.

# Berichte aus der Abteilung Departmental Reports



**Dr. Hainer Wackerbarth**  
Abteilungsleiter

T +49-(0) 551/5035-58  
F +49-(0) 551/5035-99  
M [hainer.wackerbarth@ifnano.de](mailto:hainer.wackerbarth@ifnano.de)

## MITARBEITENDE / STAFF MEMBERS

Dr. Georgios Ctistis

Tim Kutz

Yuwen Peng

Dr. Christoph Lenth

Jan Lukas Langer

Stefan Scholz

Simon Göllner

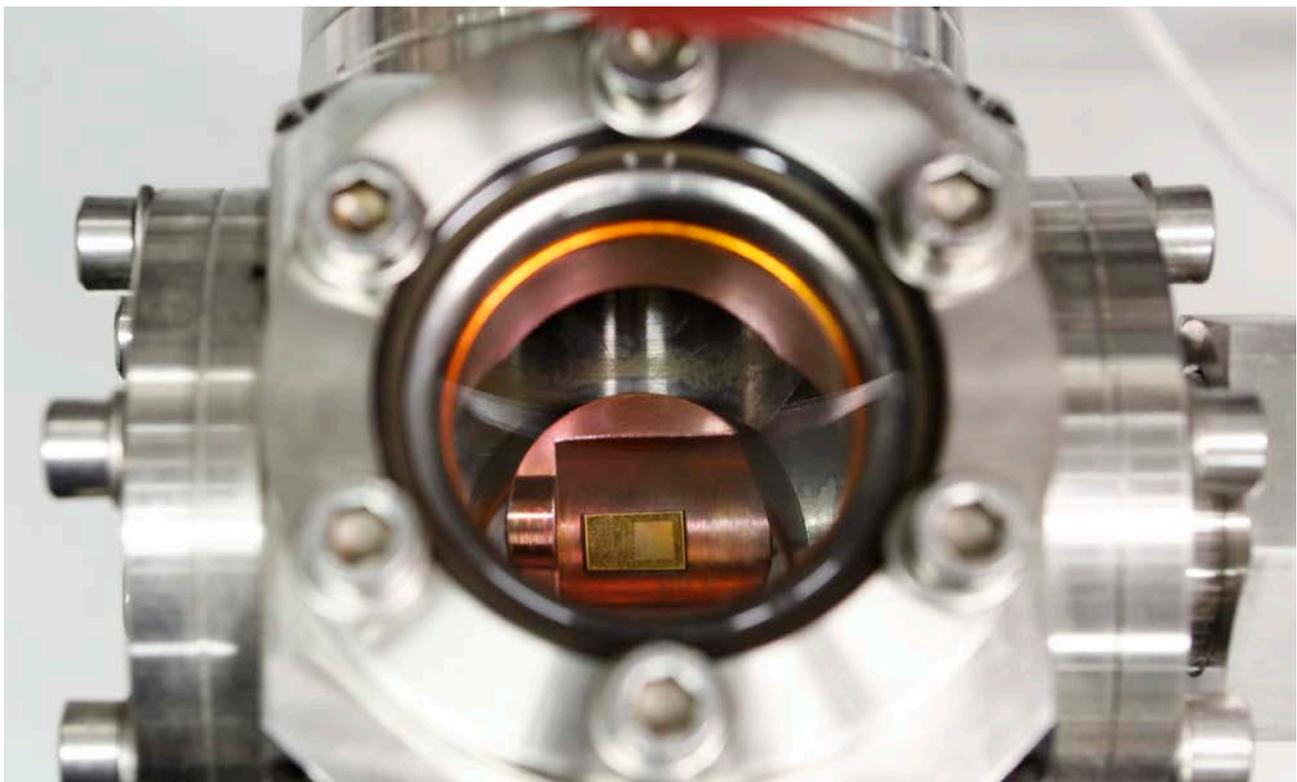
Fabian Müller

Björn Wedemeyer

Anas Hussin

Christian Niklas

Florian Wieduwilt



# Photonische Sensorik

## Photonic Sensor Technologies

Die Abteilung erforscht und entwickelt neuartige sensorische Messverfahren – überwiegend basierend auf Raman-Streuung sowie Ionenmobilitätsspektrometrie, häufig in Kombination mit Probenvorbereitungsverfahren und chemometrischen Methoden.

Die Stärken dieser Sensorverfahren liegen in der zerstörungsfreien, berührungslosen sowie schnellen Messung und Analyse von Substanzen, Strukturen sowie komplexen Matrices und biologischen Systemen.

Durch neue Kombinationen von optischer Spektroskopie mit der Mikrofluidik, der Nanotechnologie oder der Chemometrie ergibt sich ein sehr hohes Potenzial für innovative Anwendungen. Dazu gehören insbesondere Umweltanalytik, Vor-Ort-Analytik, Bioanalytik und Prozessanalyse.

Im Bereich der Bioanalytik wird ein Point-of-Care-Test auf der Basis der oberflächenverstärkten Raman-Spektroskopie entwickelt. Mit Hilfe dieses Tests sollen Spuren von Biomarker in Körperflüssigkeiten erkannt werden.

Neben der Erfassung der Daten durch die photonische Messtechnik bildet die Erforschung der automatisierten Datenauswertung bei komplexeren Informationen einen weiteren Schwerpunkt. Darüber hinaus wird sich im Bereich der Gasanalyse mit der Sensorfusion befasst. Als Beispiel sind hier die Überwachung der Raumluft und Lithium-Ionen-Akkus zu nennen. Letzteres hat den Zweck, Havarien, verursacht durch defekte Lithium-Ionen-Akkus, zu vermeiden.

The department explores and develops novel sensory measurement procedures mainly based on Raman scattering as well as ion mobility spectrometry, often combined with sample pretreatment methods and chemometric analysis.

The strengths of these methods are that they lead to non-destructive, contact-free, and fast measurement of substances, structures, complex matrices, and biological systems.

A great potential for innovative applications arises from the combination of optical spectroscopy with microfluidics, nanotechnology or chemometry. This includes environmental analysis, on-site analysis, bioanalysis, and process control.

The group develops a point-of-care-test based on surface enhanced Raman-spectroscopy in the field of bioanalysis. Traces of biomarkers in body fluids should be detected with these tests.

Besides recording of data by photonic sensors, the exploration of automated data evaluation on complex information is a major topic. Moreover, sensor fusion is another research objective in the field of gas analysis. Examples include monitoring of indoor air quality and lithium-ion batteries. The latter has the purpose of avoiding accidents caused by defective lithium-ion batteries.

# Photonische Sensorik

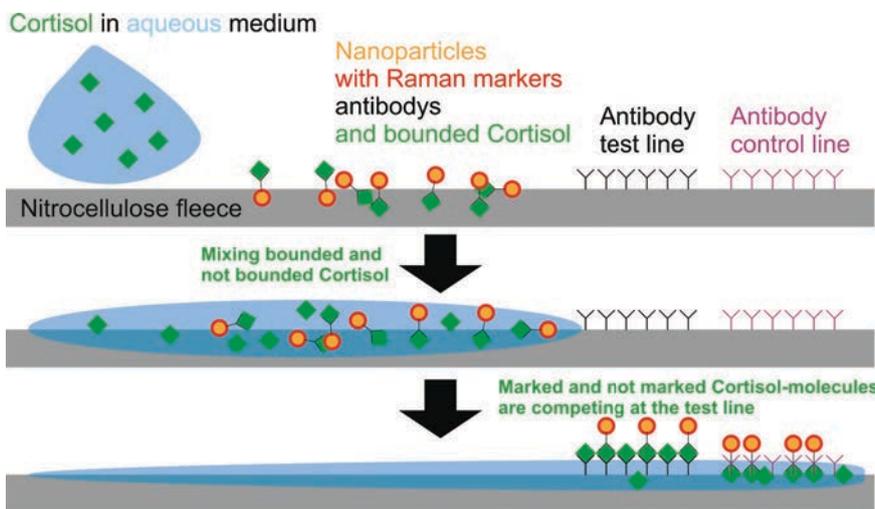
## Photonic Sensor Technologies

**Entwicklung einer leistungsfähigen Ausleseeinheit einschließlich chemometrischer Verfahren von Lateral-Flow-Tests mit Hilfe der oberflächenverstärkten Raman-Spektroskopie**

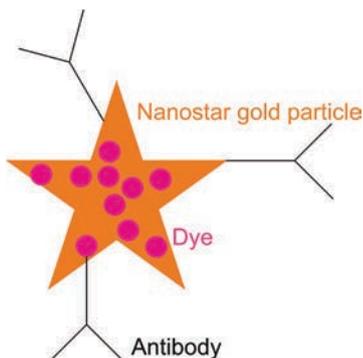
**Development of a powerful read-out device including a chemometric procedure for lateral flow tests by means of surface enhanced Raman scattering**

Cortisol ist als sogenanntes Stresshormon im Bereich der Human- und Veterinärmedizin bekannt. Daher spielt der Cortisol-Nachweis eine entscheidende Rolle, denn die Konzentration an Cortisol im Tierblutserum steht im direkten Zusammenhang mit dem Wohlergehen des Tieres. Traditionelle Labormethoden der Humanmedizin sind den Tierhaltern oft zu teuer und dauern auch zu lange, so dass Lateral-Flow-Tests (LFTs) eine willkommene Alternative darstellen. Die Herstellung solcher Tests ist eine große Herausforderung, wenn niedrige Konzentrationen quantifiziert werden sollen. Um dies zu erreichen, ist unter anderem die Güte der für die LFTs verwendeten Marker entscheidend.

Cortisol is known as a so-called stress hormone in human and veterinary medicine. Therefore, the cortisol detection plays a decisive role, because the concentration of cortisol in the animal blood serum is directly related to the animal's welfare. Traditional laboratory methods of human medicine are often too expensive and too time consuming for the animal keepers, so that lateral flow tests (LFTs) pose a welcome alternative. The production of such tests is a major challenge if low concentrations are to be quantified. To achieve this, the quality of the markers used for the LFTs is crucial. We do research on special readout methods for Raman markers.

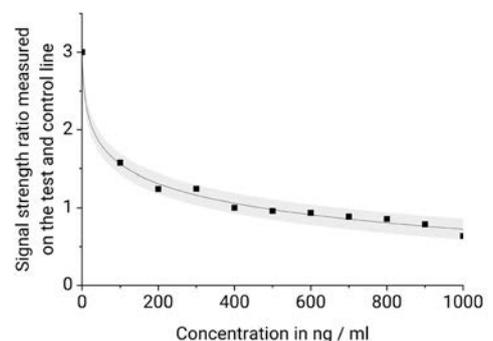


◀ Schematische Darstellung des Funktionsprinzips eines kompetitiven Lateral-Flow-Tests. Schematic representation of the functional principle of a competitive lateral-flow test.



▶ Kalibrationsfunktion. Calibration curve.

◀ Schematische Darstellung der Nanopartikel. Schematics of the nanoparticle.

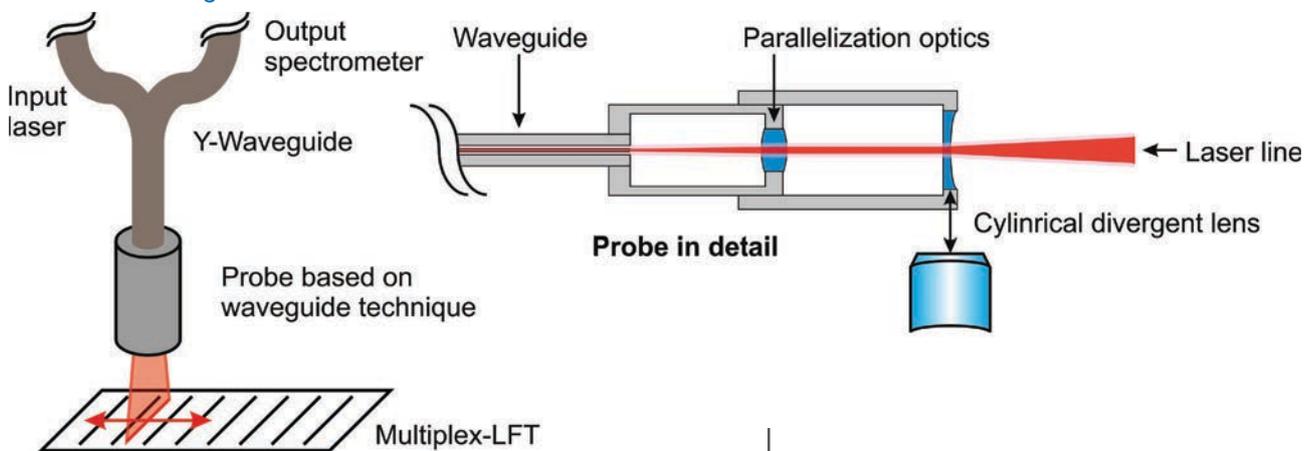


# Photonische Sensorik

## Photonic Sensor Technologies

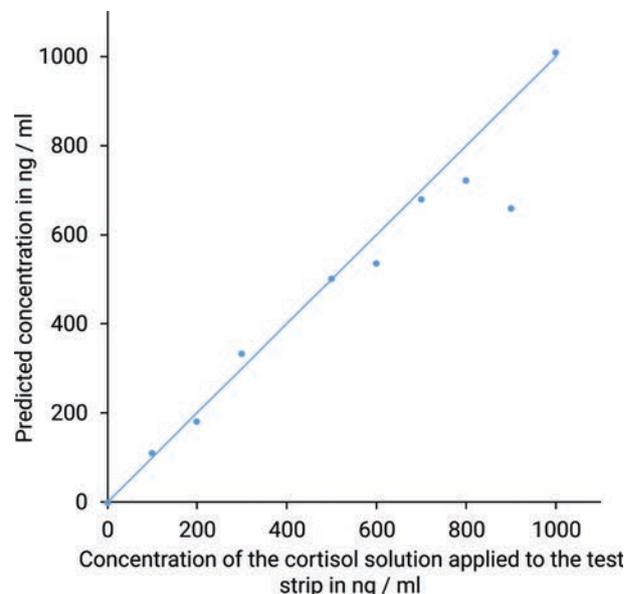
So forschen wir an speziellen Ausleseverfahren für Raman-Marker. Bei diesen Raman-Markern handelt es sich um sogenannte Gold-Nanosterne, an die spezielle Raman-aktive organische Moleküle gebunden sind. Durch die Strukturierung wird die Anregung von Oberflächenplasmonen möglich, wodurch Feldüberhöhungseffekte ausgelöst werden, die zu einer enormen Steigerung der Signale der Marker führen. Die erhaltenen Raman-Banden sind schmal und lassen sich besonders gut vom Signalhintergrund unterscheiden. Der „proof of concept“ der neuen Marker- und Auslesetechnologie zur quantitativen Cortisol-Bestimmung konnte gezeigt werden. Ein spezieller Aufbau des Detektionssystems mit Linienfokus konnte die Lesegeschwindigkeit entscheidend steigern, so dass das Ergebnis in 8 Minuten vorliegt.

These Raman markers are so-called gold nanostars, to which special Raman-active organic molecules are attached. The nanostructure enables the excitations of surface plasmons, which raises excessive local electromagnetic fields, increasing enormously the signals of the marker. The Raman bands obtained are narrow and can be distinguished eminently well from the signal background. The proof of concept of the new marker and read-out technology for the quantitative determination of cortisol could be shown. A special construction of the detection system with line focus could significantly increase the reading speed, so that the result is available in 8 minutes.



Konstruktion des Auslesesystems.  
Reader construction.

Vorhersagewert in Abhängigkeit vom Messwert.  
Predicted value as a function of measured value.



# Photonische Sensorik

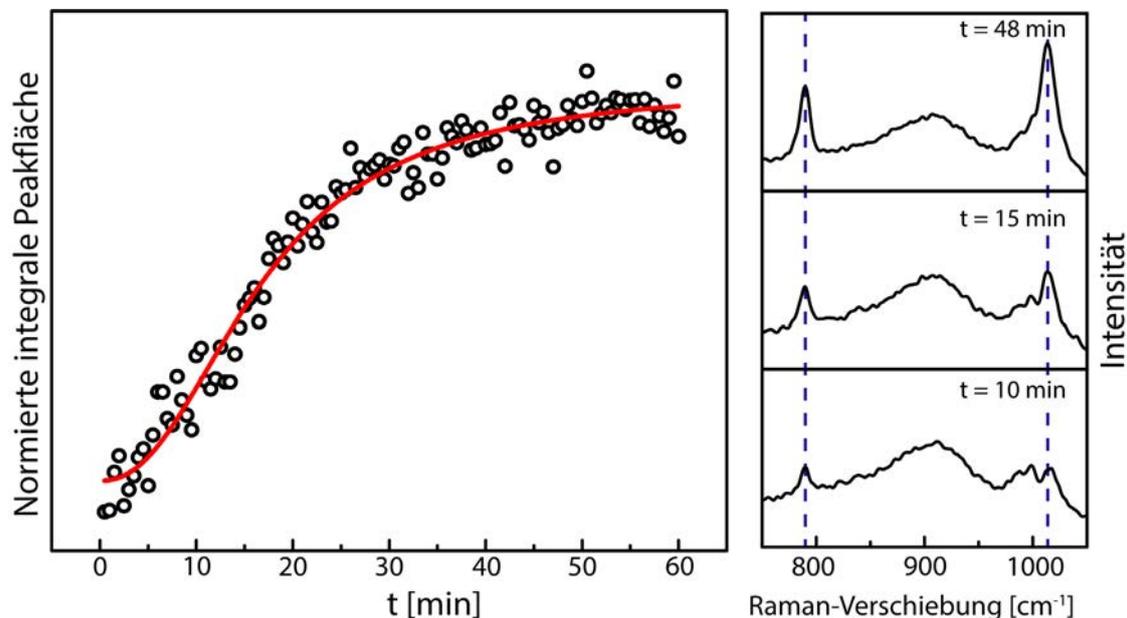
## Photonic Sensor Technologies

### Vor-Ort-Analytik zum Nachweis von Benzotriazol im Abwasser

Benzotriazol (BTA) ist eine weitverbreitete Industriechemikalie. Sie wird als Korrosionsschutzmittel, in Kühlflüssigkeiten, Frostschutzmitteln, Enteisungsmitteln sowie in Entkalkungstabletten eingesetzt. Der Verbrauch allein in Europa liegt bei über 1000 Tonnen pro Jahr. Es ist schwer abbaubar und wird daher in Kläranlagen nur zu einem kleinen Anteil eliminiert. Somit gelangt es in großen Mengen in Flüsse und Seen. Dabei wird BTA als umweltschädlich und gesundheitsschädlich eingestuft. Der Nachweis und die Konzentrationsbestimmung von Benzotriazol erfolgt gewöhnlich durch eine Kombination von chromatographischen Trennverfahren und der Massenspektroskopie (HPLC/MS/MS-Kopplung).

### On-site analysis for the detection of benzotriazole in wastewater

Benzotriazole (BTA) is a widely used industrial chemical. It is used as a corrosion inhibitor, in coolants, antifreeze, de-icing agents, and in descaling tablets. Consumption in Europe alone is over 1000 tons per year. However, it is difficult to degrade and therefore only a small proportion can be eliminated in wastewater treatment plants. It therefore ends up in rivers and lakes in large quantities and pollutes the environment. BTA is classified as harmful to the environment and health by the authorities. The detection and concentration determination of benzotriazole is usually achieved by a combination of chromatographic separation techniques and mass spectroscopy (HPLC/MS/MS coupling).



Zeitaufgelöstes Adsorptionsverhalten von BTA auf einem SERS-Substrat in wässriger Lösung. Zunahme der Intensität charakteristischer BTA-Banden im Raman-Spektrum mit der Adsorptionszeit.  
Time-resolved adsorption of BTA on a SERS substrate in an aqueous solution. Increase of the intensity of a characteristic BTA peaks in the Raman spectrum with increasing adsorption time.

# Photonische Sensorik

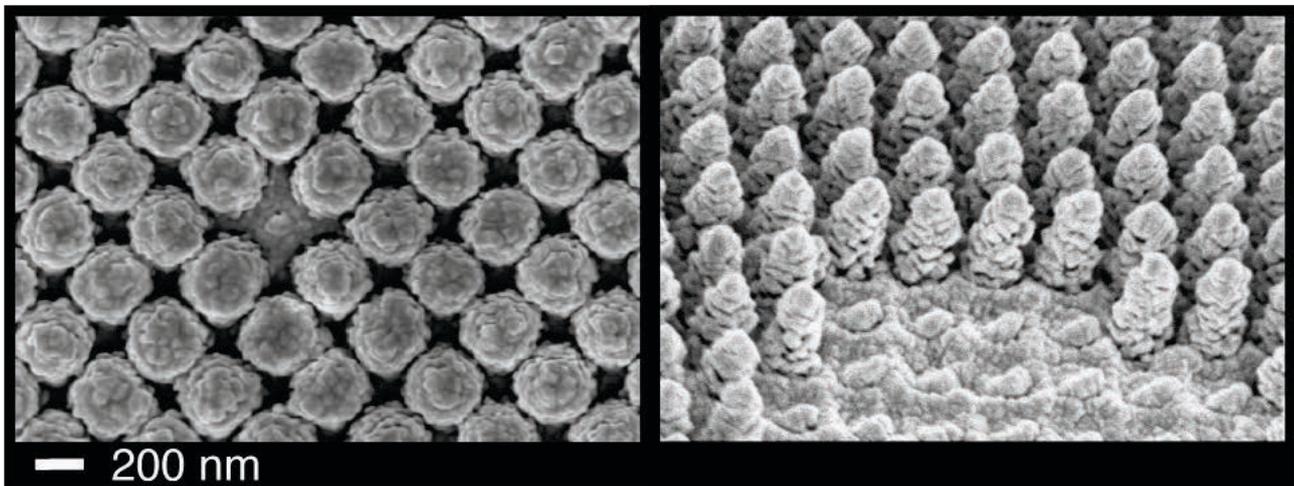
## Photonic Sensor Technologies

Diese Art der Trennung und Identifizierung ist jedoch kosten- und zeitintensiv. Daher wird an einem preiswerten Vor-Ort-Analyseverfahren geforscht, welches auf der oberflächenverstärkten Raman-Streuung (SERS) beruht.

Nach der Erzeugung von Nanostrukturen unseres Projektpartners AMO GmbH und der anschließenden Beschichtung mit Gold am IFNANO zu plasmonischen Substraten und dem gewonnenen Verständnis um die stattfindenden Wechselwirkungen wurde ein Verfahren entwickelt, welches die zuverlässige Detektion von BTA-Konzentrationen im Spurenbereich innerhalb eines Zeitfensters von 15 Minuten ermöglicht. Es wurde an realen Proben einer Kläranlage in Norddeutschland evaluiert und gezeigt, dass das Verfahren unter Realbedingungen funktioniert. So konnten Konzentrationen unterhalb von 20 ng/ml bestimmt werden.

However, this type of separation and identification is both cost and time intensive. Thus, a cost-effective on-site analysis method based on surface-enhanced Raman scattering (SERS) is researched.

After the generation of nanostructures from our project partner AMO GmbH and the following deposition of gold to a plasmonic substrate and the gained understanding around the interactions taking place, a method was developed which allows the reliable detection of BTA even in smallest traces within a time window of 15 minutes. It was evaluated on real samples from a wastewater treatment plant in northern Germany and demonstrated that the method works under real conditions, where concentrations below 20 ng/ml were measured.



▲  
Rasterelektronenmikroskopieaufnahme von nanostrukturiertem SERS-Substrat.  
Scanning electron microscopy image of a nanostructured SERS substrate.

# Photonische Sensorik

## Photonic Sensor Technologies

### Resonatorverstärkte Raman-Spektroskopie für die Prozessanalytik

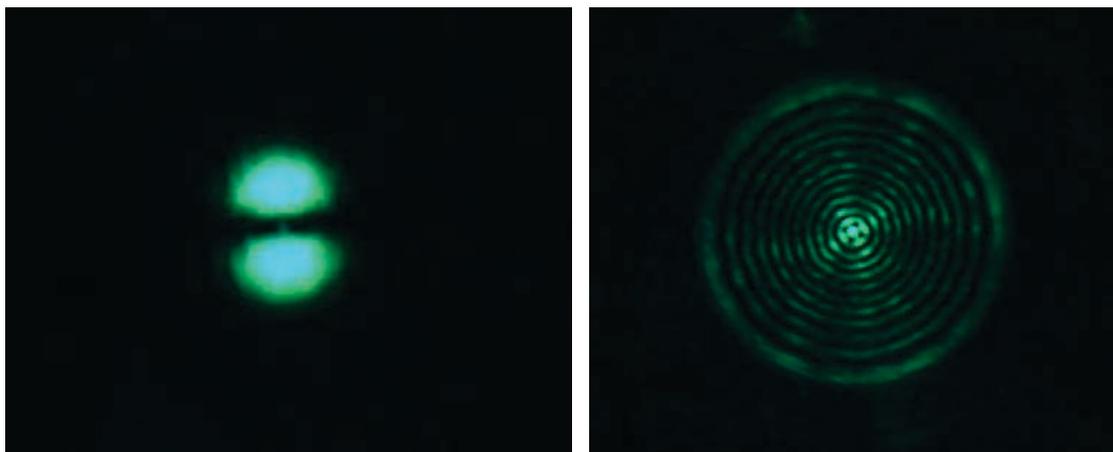
Immer häufiger ist es von Bedeutung, komplexe Gasmischungen im industriellen Umfeld zu analysieren. Einerseits geht es dabei um die Sicherheit, andererseits gibt die Gaszusammensetzung im Herstellungsprozess Auskunft über die Qualität der Zwischen- und Endprodukte. Als Labormethode ist die Kombination aus Gaschromatographie und Massenspektrometrie Standard für die Gasanalyse. Allerdings sind diese kaum für die Prozessanalytik geeignet, da sie aufwändig, zeit- und damit kostenintensiv sind.

Photonische Technologien sind onlinefähig, robust, weniger aufwändig und nichtinvasiv. Sie sind somit prädestiniert für die Prozessanalyse. Insbesondere bei der Raman-Spektroskopie handelt es sich um ein hochselektives Detektionsverfahren, das alle Moleküle anhand ihrer Schwingungssignatur eindeutig erkennen kann. Damit können auch die sonst optisch schwer detektierbaren homonuklearen Gase Sauerstoff und Wasserstoff gemessen werden.

### Cavity-enhanced Raman spectroscopy for process analytics

It is more and more important to analyse complex gas mixtures in an industrial environment. On the one hand this is safety related, on the other hand, the gas composition in the manufacturing process provides information on the quality of the intermediate and resulting products. As a laboratory method, the combination of gas chromatography and mass spectrometry is the standard for gas analysis. However, mass spectrometry is hardly suitable for process analysis, since it is complex, time-consuming, and therefore cost-intensive.

Photonic technologies on the other hand are on-line capable, robust, less complex, and non-invasive. They are therefore predestined for process analysis. Raman spectroscopy in particular is a highly selective detection method that can identify all molecules based on their vibrational signature. This means that even homonuclear gases such as oxygen and hydrogen, which are otherwise difficult to detect optically, can also be measured.



Moden innerhalb eines instabilen Resonators. Die Bilder sind an dem Auskoppelspiegel des Resonators aufgenommen worden.

Modes within an unstable cavity. The pictures are taken at the exit mirror of the cavity.

# Photonische Sensorik

## Photonic Sensor Technologies

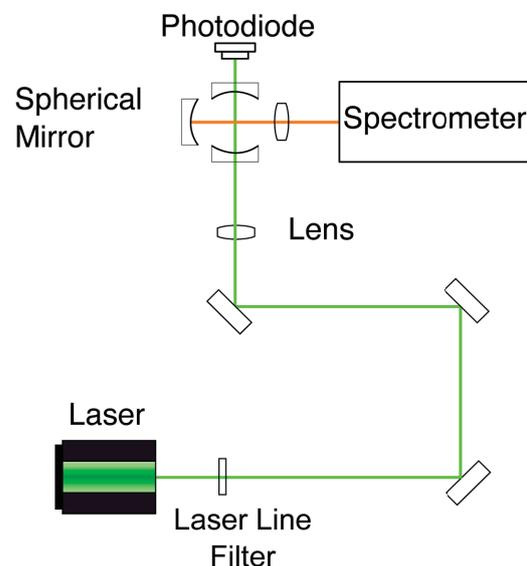
Da jedoch der Raman-Streuquerschnitt der Moleküle zu gering und das Signal dadurch zu schwach ist, sind Verstärkungsmethoden nötig, um auch geringe Konzentrationen in kurzer Zeit messen zu können. Hier gibt es unterschiedliche Ansätze, die bereits in der Abteilung genutzt werden, wie z.B. die oberflächenverstärkte Raman-Streuung (engl. SERS). Dazu müssen die Analyten jedoch nah an einer plasmonischen Oberfläche sein, womit sich dieses Verfahren nicht eignet, um freie Gasmoleküle im Volumen zu studieren. Hier bietet sich die so genannte resonatorverstärkte Raman-Spektroskopie (engl. CERS) an. Bei dieser wird das Detektionsvolumen in einen externen optischen Resonator gestellt, in welchem analog zu einem Laser-Resonator die Laserleistung verstärkt wird, um so ein stärkeres Raman-Signal zu erzeugen. Dieser Ansatz erlaubt die simultane Detektion einer Vielzahl von Molekülen in einem on-line Prozess. State-of-the-Art-Methoden der Datenanalyse ermöglichen die quantitative Bestimmung jeder einzelnen molekularen Spezies.

Ein anderes Ziel ist, dieses System als modulares Laborsystem aufzubauen. Bei herkömmlichen Gaschromatographen wird, wie beschrieben, als spezifische Detektoreinheit ein Massenspektrometer genutzt. Anstelle des Massenspektrometers wird hier das resonatorverstärkte Raman-Modul als Detektor für die Identifikation und Quantifizierung der Moleküle verwendet, um eine leistungsfähige Prozessanalytik aufzubauen, die eine kontinuierliche online Detektion ermöglicht.

Aufbau für resonatorverstärkte Raman-Spektroskopie. In diesem Fall wird eine 90°-Geometrie angewendet, um das im Resonator entstandene Raman-Streulicht effizienter in das Spektrometer zu leiten.  
 Setup for cavity-enhanced Raman spectroscopy. Here, a 90° geometry is used to efficiently couple the Raman scattered light into the spectrometer.

As the Raman cross-section of the molecules are rather small and therefore the resulting signal is weak, enhancement methods are needed to detect low concentrations within short measurement times. Here, multiple methods are available, some of which are already utilised in this research group, such as surface-enhanced Raman scattering (SERS). For this method, the analyte has to be near a plasmonic surface, rendering SERS unsuitable for the analysis of gas molecules in bulk. Instead, the so-called cavity-enhanced Raman spectroscopy (CERS) is a suitable method for this application. Here, an external optical cavity is used, analogous to a laser cavity, to enhance the laser power resulting in a stronger Raman signal. This approach allows the simultaneous detection of a multitude of molecules in an on-line process. State-of-the-art data analysis methods enable to disentangle the amount of every molecular species in a bulk of gas.

Another aim is to build a modular laboratory setup. Conventional gas chromatography utilizes mass spectrometers as their specific detector. Instead of the mass spectrometer, the CERS module will be used as detector for the identification and quantification of the molecules, to build a powerful detection setup suitable of continuous on-line detection.



# Photonische Sensorik

## Photonic Sensor Technologies

### Faser-integriertes Raman-Spektrometer zur Gasanalyse

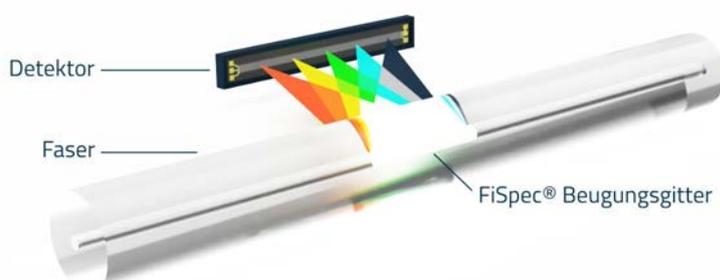
Die Nachfrage nach preisgünstiger Sensorik steigt stetig und wird zurzeit durch die Digitalisierung und damit einhergehend Industrie 4.0 und auch Medizin 4.0 noch weiter angetrieben. Um die vielfältigen Bedürfnisse aus verschiedenen Industrien zu befriedigen, braucht es eine Technik, die gleichzeitig sowohl Prozesse überwachen als auch Produkte analysieren kann. Für die chemische Analyse bietet sich die Raman-Spektroskopie an. Bereits vorhandene Raman-Geräte für die Prozesstechnik haben sich hier vor allem im oberen Preissegment angesiedelt. Für die inline Messung sind Raman-Geräte jedoch noch unrentabel und nicht genügend sensitiv.

Damit Raman-Sensoren konkurrenzfähig zu den momentan etablierten Halbleitersensoren werden, wie sie z.B. zur Gasanalyse eingesetzt werden, bedarf es der Verstärkung des Raman-Effekts selbst und einer Weiterentwicklung der bisher vorhandenen Raman-Spektrometer durch technische Verbesserungen und kostengünstigere Herstellung. Hier setzt das gerade begonnene Vorhaben mit dem Projektpartner FiSens GmbH an.

### Fibre-Bragg Raman spectrometer for gas analysis

The demand for inexpensive sensor technology has steadily increased and is currently being further increased by digitalization and the associated Industry 4.0 and Medicine 4.0. In order to satisfy the diverse needs from different industries, a technology is needed that can monitor the processes as well as analyze the products at the same time. Raman spectroscopy is ideal for this task. Existing Raman devices for process technology have mainly settled in the upper price segment. For in-line measurements, the existing devices are either too expensive or not sufficiently sensitive.

In order for Raman sensors to be competitive with the currently established semiconductor sensors, e.g. for gas analysis, the Raman effect itself needs to be amplified and the existing Raman spectrometers must be further developed through technical improvements and low priced production. This is where our newly started project with our partner FiSens GmbH sets in.



◀ Schematische Darstellung der Funktionsweise eines Faser-Bragg-Spektrometers. Schematic representation of the functionality of a fibre Bragg spectrometer.

# Photonische Sensorik

## Photonic Sensor Technologies

Aktuelle Spektrometer profitieren vor allem preis-technisch von der Massenproduktion von Detektoren und Lasern. In diesem Projekt wird ein anderer Ansatz zur weiteren Preisminderung eines Raman-Spektrometers gewählt. Statt der normalerweise gebräuchlichen optischen Gitter plus Spalt und Spiegel als Monochromator sollen erstmalig spezielle Faser-Bragg-Gitter die Funktion des dispersiven Elementes übernehmen und zusätzlich den Kerbfilter ersetzen. Somit lassen sich preisgünstigere Raman-Spektrometer realisieren.

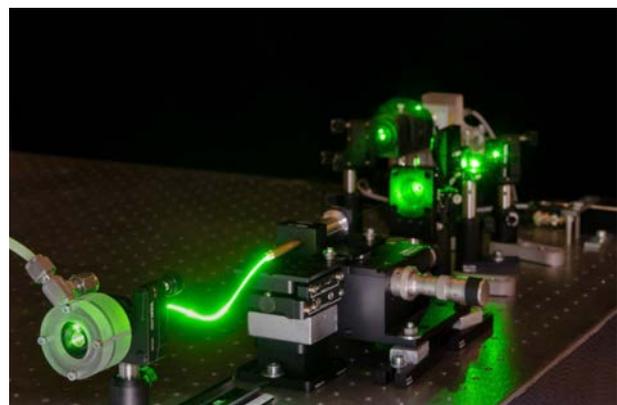
Neben dieser finanziellen Verbesserung von Raman-Spektrometern soll in dem Projekt zudem eine Verbesserung des Raman-Signals an sich stattfinden für die Messung an Gasen. Hierfür werden sogenannte photonische Kristallfasern für die faserverstärkte Raman-Spektroskopie genutzt. Wo handelsübliche Indexfasern die Totalreflexion zum Transport von Licht und Informationen nutzen und dadurch auf einen Indexgradienten angewiesen sind, können photonische Kristallfasern mit einem Hohlkern sowohl das zu messende Gas als auch das Licht leiten. Letzteres durch Ausnutzung der so genannten photonischen Bandlücke. Licht mit einer Frequenz innerhalb dieser Bandlücke wird, analog zum Halbleiterpendant, nicht aus dem Hohlkern austreten können, so dass eine effiziente Lichtleitung entlang des Hohlkerns und somit im Gas möglich ist. Dies führt zu einer Verstärkung des Raman-Signals.

Aufbau zur Messung von Gasen in photonischen Kristallfasern. ▶

Setup for the gas analysis using hollow-core photonic crystal fibres.

Current spectrometers benefit from the mass production of detectors as well as lasers. In this project another path to reduce the cost of a Raman spectrometer is chosen. Instead of the normally used optical gratings plus slit and mirrors as a monochromator, special fiber Bragg gratings are to take over the function of the dispersive elements for the first time and thus replace both monochromator and notch filter. With this approach, budget-priced Raman spectrometers are feasible.

In addition to this financial improvement of Raman spectrometers, we aim in this project to enhance the Raman signal itself for gas measurements. For this purpose, so-called photonic crystal fibers are used for fiber-enhanced Raman spectroscopy. Where standard index fibers use total reflection to transport light and information and are therefore dependent on an index gradient, photonic crystal fibers with a hollow core can transport the gas analyte as well as guide the light. The latter is done by exploiting the so-called photonic band gap. Analogous to its semiconductor counterpart, light of a frequency inside this band gap cannot escape out of the hollow core, so that light guiding along the hollow core and inside the analyte gas is possible. This results in an increased interaction length of the light with the gas, leading to an amplification of the Raman signal.



# Photonische Sensorik

## Photonic Sensor Technologies

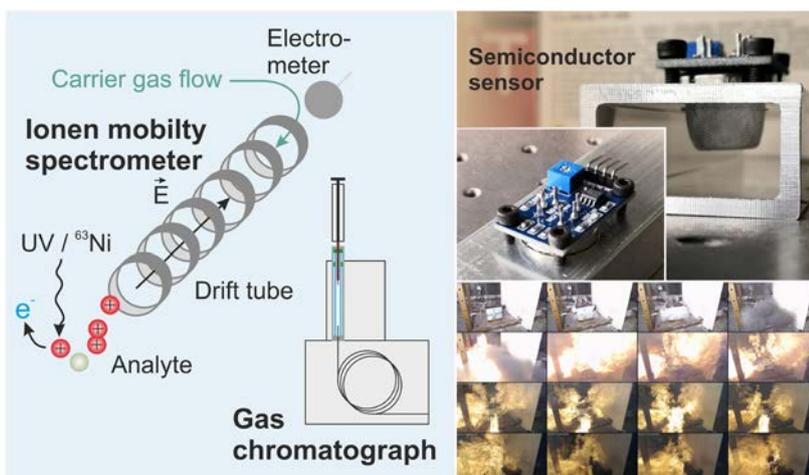
### Brandfrühwarnsystem für Lithium-Ionen-Akkumulatoren

Bestandteil des Maßnahmenpakets der Bundesregierung für die Energiewende ist der Ausbau der Elektromobilität mit dem Ziel, dass bis 2030 sieben bis zehn Millionen Elektrofahrzeuge in Deutschland zugelassen sein sollen. Hierfür werden Lithium-Ionen-Akkus benötigt. Wie alle neuen Techniken bringt auch diese Gefahren mit sich. So kann es bei verschiedenen Lithium-Ionen-Akkus mit flüssigen oder polymeren Elektrolyten zum thermischen Durchgehen kommen, die oft mit Selbstentzündung oder Explosion endet. Auslöser sind oft Unfälle, wobei der Zeitpunkt zwischen Havarie und Unfall mehrere Tage betragen kann. Aber auch beim Laden sind solche Vorfälle bekannt. Die Früherkennung der Akkuhavarie mit dem Ziel der Schadensbegrenzung ist Gegenstand des hier vorgestellten Projektes.

Von den in den Lithium-Ionen-Akkus ablaufenden komplexen Prozessen ist bekannt, dass bei dem thermischen Durchgehen chemische Reaktionen involviert sind, die flüchtige organische Verbindungen freisetzen.

### Early fire warning system for lithium-ion batteries

One aspect of the federal government's package of measures for the energy transition is the expansion of electromobility - with the goal of seven to ten million licensed electric vehicles by 2030. For this, lithium-ion batteries are required. As with all new techniques, this also entails dangers. Different lithium-ion batteries with liquid or polymer electrolytes can cause thermal runaway, which often ends in self-ignition or explosion. Such events are often triggered by traffic accidents, although the time between the accident and the runaway of the battery can last up to several days. Such incidents are also known during the charging procedure. The early detection of the battery runaway with the aim of limiting damage is the subject of the project presented here.



Sensortechnologien zur Brandgasdetektion.  
Sensor technologies for fire gas detection.

Sicherheitsbehälter zur Messung bei einer Havarie.  
Safety container for measurement during an accident.



# Photonische Sensorik

## Photonic Sensor Technologies

Diese sollen zur Detektion einer bevorstehenden Havarie genutzt werden. Viele der ausgasenden Stoffe sind giftig oder neigen an der Luft zur Bildung explosionsfähiger Gemische.

Es ist ein Explosionsschutzbehälter konstruiert worden, in dem die Havarie mechanisch, thermisch oder durch Überladen ausgelöst werden kann. Dieser ist mit Sensorik versehen, die den zeitlichen Ablauf der Havarie sowie die Gaszusammensetzung detektieren kann. Als Sensorik werden für den zeitlichen Verlauf Ionenmobilitätsspektrometer und Halbleitersensoren verwendet. Die Zusammensetzung wird mittels Festphasenmikroextraktion (SPME) mit anschließender Gaschromatographie (GC)-Trennung bestimmt, wobei Massenspektrometer und Vor-Ort-Ionenmobilitätsdetektoren verwendet werden. Hierfür ist ein Probennehmer konstruiert worden. Mit diesem kann sowohl die Beprobungsdauer als auch der Beprobungszeitpunkt exakt vorgegeben werden. Bei der SPME wird eine mit Adsorptionsmittel beschichtete Faser von einer Kanüle geschützt in den Probenraum bzw. den GC-Injektor verbracht.

It is known from the complex processes taking place in lithiumion batteries that chemical reactions are involved in the thermal runaway, which release volatile organic compounds. These are to be used to detect the impending runaway. Many of the outgassing substances are toxic or tend to form explosive mixtures in the air.

An explosion protection container was constructed, in which the runaway in the container can be triggered mechanically, thermally or by overloading. It is equipped with sensors that can detect the chronological sequence of the runaway and the gas composition. Ion mobility spectrometers and semiconductor sensors are used to monitor the time dependence. The composition is detected by means of solid phase micro extraction with subsequent gas chromatography (GC) separation, using mass spectrometry and on-site ion mobility detectors. With specially designed automatic sampler, both sampling duration and sampling time can be precisely specified. When performing SPME, a fiber coated with adsorbent is brought into the sample space or the GC injector, protected by a cannula.

Substanz	Konzentration
Dimethylcarbonat	37,0 %
Ethylencarbonat	34,2 %
Benzol	7,7 %
Nonen	5,2 %
Fluorwasserstoff	796 ppm
Chlorwasserstoff	24 ppm

▲ Schadenszusammensetzung nach künstlich ausgelöster Havarie einer Pouch-Zelle.  
Pollutant gas composition after artificially triggered runaway in a pouch-cell.



▲ SPME-Probennehmer.  
SPME auto sampler.

# Photonische Sensorik

## Photonic Sensor Technologies

### Sensorgestützter Assistent zur Verbesserung der Luftqualität in Wohnräumen: von der Laboranalytik zur Vor-Ort-Sensorik

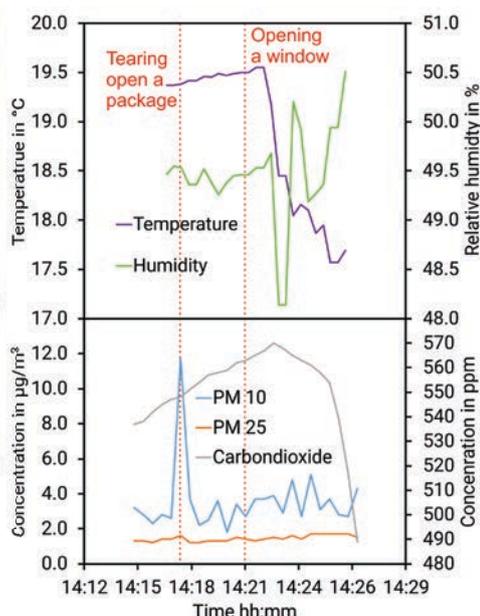
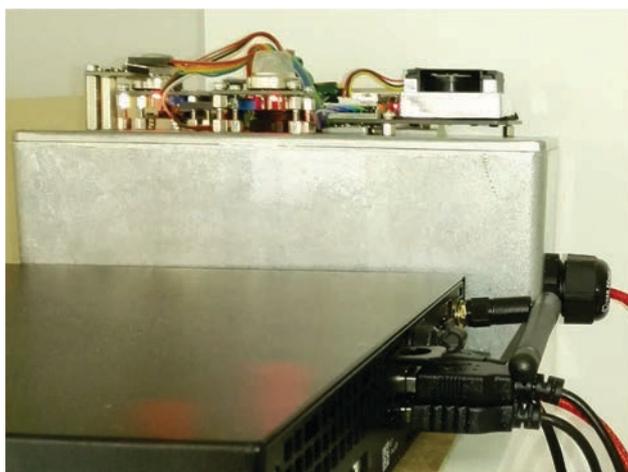
Das Geschäftsfeld Smart Home ist ein Wachstumsmarkt, dessen Möglichkeiten bei Weitem noch nicht ausgeschöpft sind. Unter Smart Home versteht man technische Verfahren und Systeme, deren Ziel eine Erhöhung der Sicherheit und Energienutzung sowie der Wohn- und Lebensqualität auf der Basis vernetzter und fernsteuerbarer Geräte und Installationen ist. Da sich eine schlechte Qualität der Raumluft direkt auf die Gesundheit der Bewohner auswirken kann, trägt sie entscheidend zur Wohnqualität bei.

Das Projekt beschäftigt sich mit der Fragestellung, inwieweit sich die für die Prüfung der Raumluftqualität notwendige aufwändige Labor-Analytik in eine Sensorik überführen lässt, die robust, einfach und bezahlbar ist. Hierfür wird eine auf künstlicher Intelligenz (KI) basierende Steuerung für Systeme zur Hausbelüftung erstellt.

### Sensor-assisted improvement of air quality in living spaces: from laboratory analysis to on-site sensors

The Smart Home business area is a growing market. The possibilities in this market are far from being exhausted. Smart home is understood to mean technical processes and systems, which aim on the increase of security and energy use as well as the quality of life and living based on networked and remotely controllable devices and installations. Since poor indoor air quality can have a direct impact on the health of the tenants, it contributes significantly to the quality of living.

The project deals with the question of how far the complex laboratory analysis required for testing the indoor air quality can be converted into a sensor system that is robust, simple and affordable. An artificial intelligence (AI) based control system for home ventilation systems is therefore be in creation.



▲  
Sensor-Plattform und Sensor-Daten.  
Sensor-platform and sensor-data.

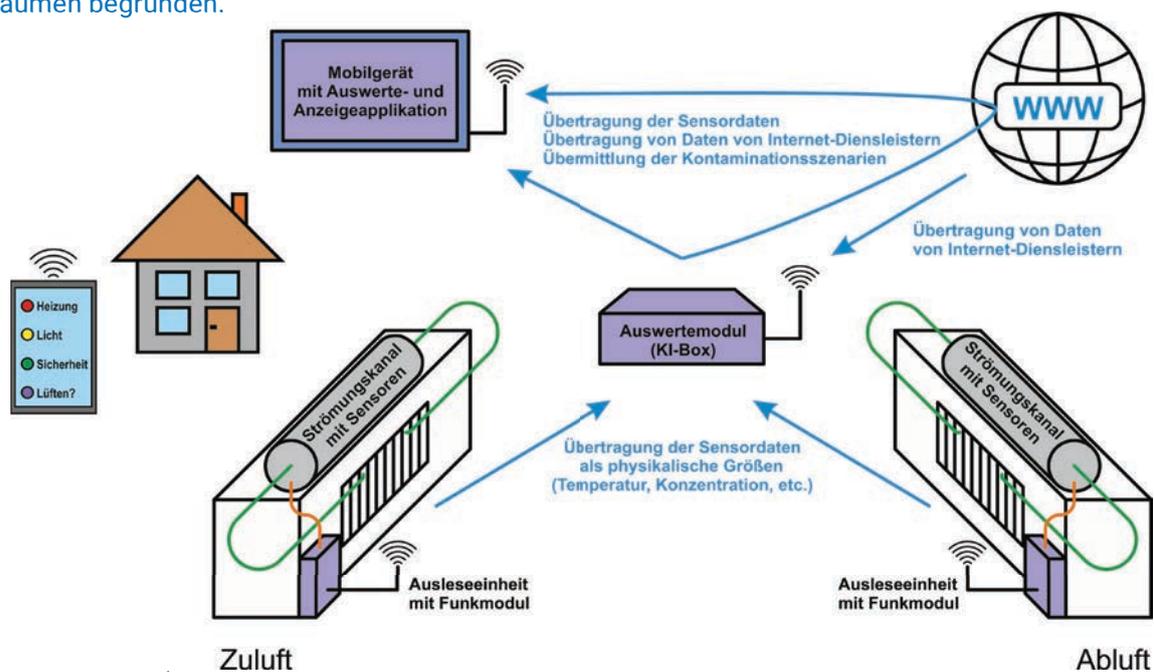
# Photonische Sensorik

## Photonic Sensor Technologies

Diese basiert auf einer neu erstellten Sensor-Plattform, die neben den üblichen Sensoren für CO<sub>2</sub>, Luftfeuchtigkeit und Temperatur auch solche für verschiedene Arten flüchtiger organischer Verbindungen (kurz VOC genannt, für volatile organic compounds), Stickoxide, CO und Feinstaub bereitstellt. Hierdurch und durch zusätzliche Daten von Wetterdiensten oder anderen Diensten, die lokale Feinstaubbelastung, Pollenflug- oder Ozon-Konzentrationen bereitstellen, wird die Datenbasis für eine effektive Beurteilung der Raumluftqualität geschaffen. Die hohe Datenbasis erfordert eine fortschrittliche Auswertung bis hin zu Methoden des überwachten Lernens und bietet die Chance, die Qualität der Raumluft zielgerichtet zu verbessern. Zum Beispiel wird das Aufreißen einer Verpackung – Feinstaub steigt - oder das Öffnen der Fenster – CO<sub>2</sub>-Konzentration nimmt ab – anhand der Daten abgebildet werden. Dadurch können geeignete Gegenmaßnahmen effizient veranlasst werden. Das neue Verfahren wird somit eine neue Evolutionsstufe bei der Bewertung und Verbesserung der Raumluftqualität in Wohnräumen begründen.

Not only representative parameters of indoor air quality such as carbon dioxide concentration, temperature or air humidity are recorded, but these data are combined and expanded to include other important parameters such as the amount of particulate matter and volatile organic compounds (VOC). This and additional data from weather services or other services that provide local fine dust pollution, pollen count or ozone concentrations create the database for an effective assessment of indoor air quality.

The large database requires an advanced evaluation up to methods of supervised learning and offers the opportunity to improve the quality of the indoor air in a targeted manner. For example, the opening of a package – rise of ambient particulate matter – or the opening of a window – decrease of CO<sub>2</sub> – is reported by the change in the sensor data. This allows counteractions to be tackled much more effectively. The new method will thus create a new evolutionary stage in the assessment and improvement of indoor air quality in living spaces.



▲ Schematischer Aufbau des Raumluftassistenzsystems.  
Schematic setup of the room air assistance system.

# Projekte

## Projects

### Projekt CERS-Pro:

Resonatorverstärkte Raman-Spektroskopie für die Prozessanalytik, WIPANO des BMWi „Öffentliche Forschung – Weiterentwicklung von Erfindungen“

### Projekt COST:

„Towards understanding and modelling intense electronic excitation“, COST Action CA17126, gefördert von der EU

### Projekt DIMAPRO:

Diffraktive Markierung von Hartmetall und Hartbeschichtung für Design und Produktschutz, gefördert vom BMWi (WIPANO - Wissens- und Technologietransfer durch Patente und Normen)

### Projekt DruckSens:

Eingebettete Wellenleiter in Silikon zur Herstellung eines faseroptischen Drucksensors, gefördert vom BMWi (WIPANO - Wissens- und Technologietransfer durch Patente und Normen)

### Projekt ELaRA:

„Entwicklung eines kompakten Laborsystems für die Röntgen-Absorptionsspektroskopie“, gefördert vom BMWi (ZIM)

### Projekt EPIC-Lens:

„Uniformitätskontrolle optischer Präzisionsbeschichtungen auf 2D- und 3D-Komponenten“, gefördert vom BMBF

### Projekt FIHSIW:

„Fertigungsintegrierte High-Speed RGB-Interferometrie und Wellenfrontsensorik“, gefördert vom BMBF im Rahmen des Programms „Photonik plus“

### Projekt LaDiVo:

Laserunterstützter Digitaldruck keramischer Farben auf vorgespanntem Glas, gefördert vom BMWi (ZIM)

### Projekt Laser-Implant:

Laserimplantation plasmonisch wirksamer Nanopartikel in Glas, gefördert vom BMWi (ZIM)

### Projekt Mark4Live:

Neue Generation von Markierungstechnologie für die Lebendzell-Nanoskopie, gefördert vom BMWi (ZIM)

### Projekt MUSIK:

Laser-direktgeschriebene multidirektionale, maschinenlesbare, holographische Sicherheitskennzeichnungen, gefördert vom BMWi (ZIM)

### Projekt NANOPOL:

„Polarisationsempfindlicher Wellenfrontsensor auf Basis von Nanogittern zur Charakterisierung thermischer Aberration in Hochleistungs-Laseroptiken“, gefördert vom BMBF

### Projekt NanoVidere:

Schnelle monochromatische Reflexionsnanoskopie mittels Absorptionsmodulation, gefördert von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG)

### Projekt NesSi - SÜLa:

Brandfrühwarn- und Schutzsystem für das Überwachen von Lithiumakkumulatoren, gefördert vom BMWi im Rahmen des Programms ZIM

# Projekte

## Projects

### Projekt NesSi:

InGesWoh: Sensorik und Gütekriterium für die Raumluftqualität, gefördert vom BMWi im Rahmen des Programms ZIM

### Projekt NEXAFS:

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

### Projekt Oase:

Optoakustisches Sensorsystem für die Überwachung von Infusionen, WIPANO des BMWi „Öffentliche Forschung – Weiterentwicklung von Erfindungen“

### Projekt PicoLas:

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

### Projekt ProWave:

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

### Projekt PPA-FiRa:

Entwicklung einer Gasküvette auf Basis photonischer Kristallfasern zur Raman-Messung an Gasen, gefördert vom BMWi im Rahmen des Programms ZIM

### Projekt PPA-LFT-Reader:

Entwicklung einer hochsensitiven Auswerteeinheit und chemometrischen Verfahren für das Lesen von Lateral-Flow-Tests unter Nutzung des "surface enhanced resonance Raman Scattering"-Effekts (SERRS), gefördert vom BMWi im Rahmen des Programms ZIM

### Projekt RaCoLas:

Randscharfe Coatings durch Laserstrukturierung, gefördert mit Mitteln des Europäischen Fonds für regionale Entwicklung (EFRE/Niedersachsen)

### Projekt Rubin-SniPoCC:

Südniedersachsen Point of Care Cluster, Erfassung des Entwicklungsbedarfs und Konzeption von Projektideen für innovative Schnelltests, im Rahmen der Fördermaßnahme: Innovation & Strukturwandel des BMBF

### Projekt sharpSTED-Mikroskopie:

Weiterentwicklung der STED-Mikroskopie mit struktur- und helligkeitsunabhängiger Aberrationskorrektur in realen Proben, gefördert vom BMWi (WIPANO - Wissens- und Technologietransfer durch Patente und Normen)

### Projekt SiKoPla:

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

### Projekt Smart STED-Mikroskopie:

Superresolution microscopy with smart and sample-specific scanning patterns, gefördert im Rahmen des Exzellenzclusters 2067 Multiscale Bioimaging: Von molekularen Maschinen zu Netzwerken erregbarer Zellen

### Projekt SpannForm:

Kontinuierliche Freiformoberflächen durch laserinduzierte Modifikation schichtspannungsinduzierter Verformung, gefördert vom BMWi (WIPANO - Wissens- und Technologietransfer durch Patente und Normen)

# Projekte Projects

**Projekt Spectacular:**

Spektrale Verbreiterung von Hochleistungspulsen in gestreckten Hohlfasern, gefördert vom BMWi (WIPANO - Wissens- und Technologietransfer durch Patente und Normen)

**Projekt Sub-100nm:**

Erzeugung deterministischer Nanostrukturen durch ultrakurze UV-Pulse unter vordefinierten Grenzflächenbedingungen: Theorie und Experiment, gefördert von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG)

**Projekt Tools4Life:**

Werkzeuge und Methoden für die (bio)pharmazeutische Industrie, Diagnostik und Forschungsbranche (Tools4Life) - Teilvorhaben A, gefördert vom BMBF (Zukunftscluster-Initiative)

**Projekt TomoSTED-Mikroskopie:**

Hochauflösende Fluoreszenzmikroskopie bei reduzierter Lichtdosis und unverminderter Bildqualität, gefördert vom BMWi (WIPANO - Wissens- und Technologietransfer durch Patente und Normen)

**Projekt WeKokUBs:**

„Wellenfront- und Kohärenzkontrolle an Undulatorbasierten Strahlquellen zur Optimierung bildgebender Verfahren“, gefördert vom BMBF

**Projekt Z-shifter:**

Z-shifter zur diffraktiven Beschriftung gekrümmter Werkstoffflächen, gefördert vom BMWi (ZIM)



# Publikationen

## Publications

**P. Gollor, M. Schake, S. Tereschenko, K. Roetmann, K. Mann, B. Schäfer, G. Uhlrich, M. Haberland, P. Lehmann:**

Kombination eines neuartigen Doppelpuls-RGB-Interferometers mit einem Hartmann-Shack-Wellenfrontsensor zur dynamischen flächenhaften Topographieerfassung

tm - Technisches Messen, Band 87, Heft 9, S. 523–534 (2020) <https://doi.org/10.1515/teme-2020-0018>

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

Laser interference ablation by ultrashort UV laser pulses via diffractive beam management  
Advanced Optical Technologies 9, 41 (2020)

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

Quarzphasenmasken für Mikroskopie und Lasermaterialbearbeitung  
Photonik 1.2020, p. 49

**A. Blumenstein, E. S. Zijlstra, D.S. Ivanov, S. T. Weber, T. Zier, F. Kleinwort, B. Rethfeld, J. Ihlemann, P. Simon, M. E. Garcia:**

Transient optics of gold during laser irradiation: from first principles to experiment  
Physical Review B 101, 165140 (2020)

**C.M. Beckmann, J. Ihlemann:**

Figure correction of borosilicate glass substrates by nanosecond UV excimer laser irradiation  
Optics Express 28, 18681 (2020)

**L. Avakyan, V. Durimanov, D. Nemesh, V. Srabionyan, J. Ihlemann, L. Bugaev:**

Theoretical approach for calculation of dielectric functions of plasmonic nanoparticles of noble metals, magnesium and their alloys  
Optical Materials 109, 110264 (2020)

**T. Takaya, G. Miyaji, I. Takahashi, L. J. Richter, J. Ihlemann:**

Fabrication of periodic nanostructures on silicon suboxide films with plasmonic near-field ablation induced by low-fluence femtosecond laser pulses  
Nanomaterials 10, 1495 (2020)

**A. Blumenstein, M. E. Garcia, B. Rethfeld, P. Simon, J. Ihlemann, D. S. Ivanov:**

Formation of periodic nanoridge patterns by ultrashort single pulse UV laser irradiation of gold  
Nanomaterials 10, 1998 (2020)

**M. Ouillé, A. Vernier, F. Böhle, M. Bocoum, A. Jullien, M. Lozano, J.-P. Rousseau, Z. Cheng, D. Gustas, A. Blumenstein, P. Simon, S. Haessler, J. Faure, T. Nagy, R. Lopez-Martens:**

Relativistic-intensity near-single-cycle light waveforms at kHz repetition rate  
Light Sci Appl 9, 47 (2020) <https://doi.org/10.1038/s41377-020-0280-5>

**K.O. Böker, F. Kleinwort, J.-H. Klein-Wiele, P. Simon, K. Jäckle, S. Taheri, W. Lehmann, A.F. Schilling:**

Laser Ablated Periodic Nanostructures on Titanium and Steel Implants Influence Adhesion and Osteogenic Differentiation of Mesenchymal Stem Cells  
Materials 2020 13, 3526; doi:10.3390/ma13163526

**T. Nagy, P. Simon, L. Veisz:**

High-energy few-cycle pulses: post-compression techniques

Advances in Physics: X, 6:1, 1845795, DOI: 10.1080/23746149.2020.1845795 (2020)

# Publikationen / Buchbeiträge

## Publications / Book contributions

**F. Wieduwilt, C. Lenth, G. Ctistis, U. Plachetka, M. Möller, H. Wackerbarth:**

Evaluation of an on-site surface enhanced Raman scattering sensor for benzotriazole.  
Sci. Rep. 10, 8260, (2020).

**C. Niklas, S. Göllner, F. Müller, H. Wackerbarth, G. Ctistis:**

Raman spectroscopy of atmospheric gases using hollow core photonic crystal fibres,  
Proc. SPIE 11354, Optical Sensing and Detection VI,1135400, (2020).

**C. Lenth, F. Wieduwilt, G. Ctistis, H. Wackerbarth:-**  
SERS-Spektroskopie in der Abwasseranalytik -  
Analyse von Abwasserproben auf Diclofenac und  
Benzotriazol,  
GIT Labor-Fachzeitschrift, S. 29-21, (18.05.2020).

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

Statistical Molecule Counting in Super-Resolution Fluorescence Microscopy: Towards Quantitative Nanoscopy,  
Statistical Sciences 35 (1), 92 - 111 (2020)

**B. Vinçon, C. Geisler, A. Egner:**

Pixel hopping enables fast STED nanoscopy at low light dose,  
Optics Express 28 (4), 4516 – 4528 (2020)

**J.-R. Krüger, J. Keller-Findeisen, C. Geisler, A. Egner:**

Tomographic STED microscopy,  
Biomedical Optics Express 11(6), 3139 – 3163 (2020)

**A. Egner, C. Geisler, R. Siegmund:**

STED nanoscopy, In: Nanoscale Photonic Imaging, T. Salditt et al. (eds.),  
Topics in Applied Physics 134, Springer International Publishing (2020)

## Patente

## Patents

**H. Mittelstädt, C. Geisler, A. Egner:**

Verfahren zum Lokalisieren wenigstens eines Emitters mittels eines Lokalisationsmikroskops  
DE 10 2015 004 104, 03.09.2020



# Konferenzbeiträge

## Conference contributions

### **K. Mann, J. Holburg, M. Müller:**

Table-top EUV / Soft X-ray Source for Metrological Applications, SPIE Advanced Lithography, San Jose, USA (02.2020)

### **K. Mann:**

Characterization of absorptance and thermally induced wavefront deformations in DUV lithography optics, Fa. KLA, Milpitas / USA (02.2020)

### **S. Hädrich, N. Walther, M. Kienel, P. Simon, T. Nagy, A. Blumenstein, E. Shestaev, R. Klas, J. Buldt, L.-H. Stark, S. Breilkopf, P. Jójárt, Z. Várallyay, K. Osvay, T. Eidam, J. Limpert:**

500W, 5mJ, 6fs, CEP-stable few-cycle pulses. An update on the ELI-ALPS HR2 beamline, Fiber Lasers XVII: Technology and Systems, San Francisco, USA, (Invited Talk, Paper 11260-7) (02.2020)

### **M. Ruiz-Lopez, B. Keitel, K. Mann, E. Plönjes, B. Schäfer et al:**

Analysis of FLASH beamlines caustic supported by wavefront simulations, DESY User Meeting 2019, Hamburg (02.2020)

### **T. Nagy, S. Hädrich, P. Simon, A. Blumenstein, N. Walther, R. Klas, J. Buldt, H. Stark, S. Breilkopf, P. Jójárt, I. Seres, Z. Várallyay, T. Eidam, J. Limpert:**

Pulse compression to 3-cycle duration beyond 300 W average power Conference on Lasers and Electro-Optics, CLEO 2020, invited paper SM2H.1 (05.2020)

### **H. Wackerbarth, C. Lenth, F. Wieduwilt, B. Wedemeyer, G. Ctistis:**

Raman-basierte Verfahren zur Analyse von Mikroplastiken, Diclofenac und 1H-Benzotriazol in Wasser, S.122-127, Wasser 2020, Potsdam (05.2020)

### **C. M. Beckmann, J. Ihlemann:**

Figure correction of borosilicate glass substrates by nanosecond UV-laser irradiation 21st International Symposium on Laser Precision Microfabrication (LPM) Virtual (06.2020)

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

Interference ablation by ultrashort laser pulses via diffractive beam management 21st International Symposium on Laser Precision (06.2020)

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

Interference ablation by ultrashort laser pulses via diffractive beam management 21st International Symposium on Laser Precision Microfabrication (LPM) Invited talk, Virtual (06.2020)

### **J. Ihlemann, J. Meinertz, M. Heinz, T. Fricke-Begemann, M. Dubiel:**

UV laser micro processing of doped glass 21st International Symposium on Laser Precision Microfabrication (LPM) Virtual (06.2020)

### **S. Hädrich, N. Walther, E. Shestaev, T. Nagy, P. Simon, A. Blumenstein, R. Klas, J. Buldt, H. Stark, S. Breilkopf, P. Jójárt, I. Seres, Z. Várallyay, Á. Börzsönyi, T. Eidam, J. Limpert:**

High Pulse Energy CEP-stable Few-cycle Pulses at High Average Power: Status of the ELI-ALPS HR2 System, High-brightness Sources and Light-driven Interactions Congress, HILAS, OSA Virtual Event, paper HTh3B.2 (11.2020)

# Abschlussarbeiten

## Final Thesis

**Anas Hussin**

Entwicklung eines linienbasierten Ausleseverfahrens für einen Lateral Flow Test mittels oberflächenverstärkter Raman-Spektroskopie, **Bachelorarbeit**, Georg-August-Universität Göttingen (03.2020)

**Max Buczek**

Low temperature oxidation of thin silicon suboxide films

**Masterarbeit**, Universität Göttingen (3.2020)

**Simon Göllner**

Polarimetrische Analyse von Oberflächenstress in Sicherheitsgläsern,

**Masterarbeit**, HAWK - Hochschule für angewandte Wissenschaft und Kunst, Fakultät Naturwissenschaften und Technik, Göttingen (11.2020)

**Till Schröder**

Hochaufgelöste Laser-Direktstrukturierung zur Erzeugung computergenerierter Hologramme (CGH)

**Masterarbeit**, HAWK, Hochschule für angewandte Wissenschaft und Kunst, Fakultät Naturwissenschaften und Technik, Göttingen (11.2020)

**Björn Wedemeyer**

Quantitative Bestimmung von Spuren von Medikamenten in wässrigen Proben,

**Masterarbeit**, Georg-August-Universität Göttingen (05.2020)

**Britta Vinçon**

Adaptive scanning for STED microscopy, **Dissertation**, Georg-August-Universität Göttingen (01.2020)

# Ausgewählte Kooperationspartner Selected Cooperation Partners

## INTERNATIONAL



## NATIONAL



## LOKAL



# WISSENSCHAFT LÖSUNGEN



ZUSE-GEMEINSCHAFT  
FORSCHUNG, DIE ANKOMMT.

## STÄRKE DURCH INDUSTRIEFORSCHUNG: GEBÜNDELT IN DER ZUSE-GEMEINSCHAFT

Mit der Corona-Pandemie hat sich für Gesellschaft und Wirtschaft besonders prägnant gezeigt: Wissenschaft und Forschung sollen für die Menschen da sein, zum Schutz ihrer Gesundheit, zur Entwicklung innovativer Produkte und für eine lebenswerte Umwelt.

Diese Werte und Ziele verkörpert die Zuse-Gemeinschaft als branchenübergreifender Forschungsverbund, dem unser Institut als eines von aktuell 76 Mitgliedern angehört. Als gemeinnützige, praxisnahe Partner von Unternehmen übersetzen sie die Erkenntnisse der Wissenschaft in anwendbare Technologien. Der außeruniversitäre Forschungsverbund ist technologieoffen. Diese Offenheit übt Anziehungskraft aus, wie der stetige Zuwachs aus verschiedenen Regionen Deutschlands zeigt.

Unter den 2020 an Instituten der Zuse-Gemeinschaft erzielten wissenschaftlichen Fortschritten rangieren Lösungen zum Schutz vor Covid-19, unter anderem aus Medizintechnik und Materialforschung. Diese Lösungen speisen sich aus breit angelegter Expertise und werden auch nach Überwindung der Pandemie für Wissenschaft und Industrie gebraucht.

Zu den Lehren, die wir als Gesellschaft aus der Corona-Pandemie ziehen, gehört der Fokus auf den noch weiter wachsenden Stellenwert der Digitalisierung – für Verbraucher ebenso wie für Dienstleistungen und Industrie. Im Austausch mit Forschungspartnern galt es 2020, neue Wege zu finden, Wissen zu teilen. Erfolgreichen Wissenstransfer zwischen Wirtschaft und Wissenschaft lebt die Zuse-Gemeinschaft vor. Ihre Institute sind zugleich Transmissionsriemen für den Technologietransfer in die Industrie.

Mit ihrem Namensgeber ist die Zuse-Gemeinschaft dem Mega-Trend der Digitalisierung in besonderer Weise verpflichtet. 2021 jährt sich zum 80. Mal die Erfindung der Z3 von Konrad Zuse, des ersten funktionsfähigen Digitalrechners. Das Jubiläum bietet Gelegenheit, das Augenmerk auf Deutschlands Rolle in der Digitalisierung zu richten – und auf den Beitrag angewandter Forschung in der Zuse-Gemeinschaft für die Digitalisierung in der deutschen Industrie.

Damit solch angewandte Forschung in der bundespolitischen Arena mehr Gewicht bekommt, plädiert die Zuse-Gemeinschaft für mehr Fairness in der Forschungsförderung. Denn immer noch hat die anwendungsnahe Forschung mit politisch bedingten Nachteilen zu kämpfen. Durch die Aufnahme der Industrieforschung ins Corona-Konjunkturpaket konnte die Zuse-Gemeinschaft 2020 einen wichtigen Erfolg verbuchen. Auf ihm lässt sich aufbauen.

Nicht nur vor der im September 2021 bevorstehenden Bundestagswahl wird die Zuse-Gemeinschaft die Belange der anwendungsnahen Forschung weiter in den Fokus nehmen. Mit der Geschäftsstelle und ihrem neuen Geschäftsführer Dr. Klaus Jansen in Berlin, mit ihrem Präsidium und ihren Gremien sowie durch die überzeugende Forschungsarbeit ihrer Mitglieder und deren Außenwirkung in den Bundesländern sind dafür die Weichen gestellt.

So sehr die Pandemie derzeit noch weite Teile von Wirtschaft und Wissenschaft prägt: Zur Verbesserung der forschungspolitischen Lage für die gemeinnützigen, industrienah forschenden Institute bietet das neue Jahr viel Potenzial, das es zu nutzen gilt.

Weitere Informationen finden Sie unter:  
[www.zuse-gemeinschaft.de](http://www.zuse-gemeinschaft.de) · [twitter.com/Zuse\\_Forschung](https://twitter.com/Zuse_Forschung)



*Dr. Klaus Jansen,  
Geschäftsführer der  
Zuse-Gemeinschaft  
(Foto: Privat)*

# Pressemitteilungen Press release

Mittwoch, 4. November 2020

REGIONALE WIRTSCHAFT

7

## Das Göttinger Laser-Laboratorium wird zu „Ifnano“

Abkürzung steht für Institut für Nanophotonik Göttingen

Von Tobias Christ

**Göttingen.** Institut für Nanophotonik Göttingen („Ifnano“) – so lautet der neue Name des Laser-Laboratoriums Göttingen. „Der neue Name trägt unserer Entwicklung in den vergangenen zehn Jahren Rechnung“, erklärt Institutsdirektor Prof. Dr. Alexander Egner. Er leitet die außeruniversitäre Forschungseinrichtung seit 2010 und hat sie zum Ansprechpartner des Mittelstands für Fragestellungen auf vielen Gebieten der optischen Technologien (Photonik) weiterentwickelt.

„Wir forschen heute intensiv zu den Themen Spektroskopie, Sensorik, Nanostrukturierung und vor allem zur Mikroskopie jenseits der Beugungsgrenze (Nanoskopie)“, führt Egner aus. Laser kommen dabei zwar als Lichtquellen zum Einsatz, werden aber nicht mehr selbst weiterentwickelt. Das war in den Anfangsjahren des 1987 gegründeten Instituts anders. Damals stand die anwendungsorientierte Grundlagenforschung auf dem Gebiet der Excimer- und Farbstofflaser im Zentrum der Aktivitäten.

### Innovationen aus Göttingen

Vor etwa zwei Jahren hatte das Laser-Laboratorium für Aufsehen gesorgt, als es ein innovatives Verfahren entwickelte, um Markenprodukte gegen Piraterie zu schützen. Würden die schmerzenden schwer nachzunehmenden Markierungen bislang auf die Produkte geklebt, ließen sich die je nach Blickwinkel bunt schillernden Nanostrukturen nun direkt auf dem Kunststoffteilen anbringen. Dazu wurde auf den Werkzeugen, die die Teile herstellen, ein Relief erzeugt, das die Struktur direkt beim Gießen auf das Kunststoffteil prägt. Zum einen falle dadurch der Prozess des Auflebens weg, was Zeit und Geld spare, zum anderen werde die Fälschungssicherheit erhöht, wenn die Markierung direkt integriert sei.

Aufgebracht wird das Relief mit sogenannten UltrakurzpulsLasern: Deren Impulse bilzen nur für Pico- oder Femtosekunden auf. Zum Vergleich: Ein Lichtstrahl bewegt sich innerhalb von 1,3 Sekunden vom Mond zur Erde. Innerhalb einer Picosekunde legt das Licht die Entfernung von der Dicke einer Kreditkarte zurück. Eine Femtosekunde ist 1000-mal kürzer. „Unsere Partner der vergangenen Jahre wissen, wofür wir heute stehen“, sagt Egner. Bei Außenstehenden wecke der alte Institutname dagegen falsche Assoziationen.



Das Göttinger Laser-Laboratorium heißt nun „Ifnano“.

FOTO: MIRKO PLHA

**Müller**  
mehr für mich

**20% auf SPIELWAREN, GAMES!**  
sowie Zeichentrick- und Animationsfilme von Disney® vom 1. - 8. November

Produktbeispiele

\*20% des Verkaufspreises werden direkt an der Kasse abgezogen. Der Rabatt wird im OnlineShop bereits im Warenkorb berücksichtigt. Nicht kombinierbar mit anderen Aktionen (z. B. Coupons, Vorkauf, Rabattkarten). Ausgenommen sind folgende Artikel: Bücher, Hörbücher, Spiele, Zeitschriften, Desktops, PCs, Elektroartikel, Geschenkkarten, CD/DVDs, Kunst, Personal Care, Süßwaren, Spielzeugautos, VR-Brillen von z. B. Oculus, Sony und Microsoft, Spielkartensätze, Merchandising-Artikel, Plaid und andere preisbegünstigte Artikel. Für Angebote der Einzel- und Mehrfach-Kaufberechtigung. <sup>1</sup> Für Konsolen & DVD- und Blu-ray

### Das Institut

Der Trägerverein Institut für Nanophotonik Göttingen wurde 1987 als Laser-Laboratorium Göttingen in der Rechtsform eines eingetragenen Vereins gegründet, der seit dieser Zeit das Institut (Ifnano) als gemeinnützigen Zweckbetrieb führt und vom Land

Niedersachsen institutionell gefördert wird. Der Satzungszweck „Förderung der Optischen Technologien“ wird durch angewandte Grundlagenforschung und dem Wissenstransfer zwischen Forschungseinrichtungen und der Wirtschaft mittels For-

schungsaufträgen, Beratungen, wissenschaftlicher Expertisen, Schulungen und durch Serviceleistungen erfolgreich verwirklicht und durch eine große Anzahl von Veröffentlichungen dokumentiert, heißt es auf der Homepage des Instituts. Die Abteilungen Op-

tische Nanoskopie, Kurze Pulse/Nanostrukturen, Optik/Kurze Wellenlängen und Photonische Sensorik des Ifnano hätten mit ihren Forschungsprojekten und Entwicklungen auf unterschiedlichen Feldern der angewandten Physik weltweite Anerkennung erlangt.

Umwelt- und Gefahrstoffanalytik Verwendung.

Der Bereich der photonischen Sensorik ist ebenfalls gefragt: „Aufgrund des gewachsenen Umweltbewusstseins der Gesellschaft werden neue gesetzliche Vorschriften bezüglich Verwendung und Emission von Schadstoffen und der Vorgabe neuer Grenzwerte erlassen. Diese sind ein Antrieb, neue Verfahren für die Vor-Ort-Analytik zu erforschen“, heißt es auf der Ifnano-Website.

Im Bereich der Gasanalytik würden beispielsweise die Konzentration an CO<sub>2</sub> in Abgasen sowie flüchtige organische Verbindungen bei industriellen Herstellungsprozessen untersucht. Die Belastung von Wasser mit Mikroplastiken und Arzneimittelrückständen sowie Böden mit polyaromatischen Kohlenwasserstoffen seien weitere Themen.

„Unser Institut setzt sich dafür ein, dass die weltweite Vorrätekontrolle des Wissenschaftsstandorts Göttingen auf dem Gebiet der Methodenentwicklung für Forschung und Anwendungen im Bereich (Bio-)Pharmazie und Diagnostik in eine Stärkung des Innovations- und Wirtschaftsstandorts Niedersachsen und Deutschland mündet“, betont Egner.

Info: Sie erreichen den Autor per E-Mail an t.christ\_freier\_mitarbeiter@gottinger-tagelblatt.de.

## Ahlers und Reiss ergänzen das Team

Sycor erweitert Geschäftsführung

**Göttingen.** Der Göttinger IT-Dienstleister Sycor erweitert die Geschäftsführung ab November um Thomas Ahlers und Stephan Reiss. Beide hätten in ihren bisherigen Rollen bei der Sycor nachhaltige Erfolge vorzuweisen, teilt das Unternehmen in einer Pressemitteilung mit. Mit dieser Weichenstellung möchte Eigentümer Prof. Hans Georg Näder den Wachstumskurs der Sycor unterstützen, heißt es weiter.

„Mit einer aktiven Rolle in der Konsolidierung des IT-Marktes, einem führenden IT-Dienstleistungs- und Service-Portfolio sowie einem motivierten, qualifizierten Team setzt die neue Geschäftsführung der Sycor auf Wachstumskurs“, so das Unternehmen. Mit ihren IT- und Branchenkenntnissen und der mehrjährigen Führungserfahrung würden Ahlers und Reiss die bisherige Geschäftsführung perfekt ergänzen. Ahlers verantwortet die Strategie und die SAP- und Microsoft-Beratung. Reiss trägt die Verantwortung für den Vertrieb und das Marketing sowie das Datacenter und die Cloud Services.

In der Geschäftsführung verantwortet Philip Hilgers den Bereich Finanzen und die Verwaltung. Ronald Geiger führt den Bereich Human Resources und die Transformation und Mergers & Acquisitions. Rüdiger Krümes steuert die Zusammenarbeit mit der Näder Holding und der Otobock SE. „Die beiden Geschäftsführer Thomas Ahlers und Stephan Reiss werden die Weiterentwicklung des Unternehmens durch ihr Engagement beschleunigen und die Marktposition von Sycor als Digitalisierungs- und Innovationspartner für den Mittelstand weiter stärken“, wird Näder zitiert. „Mit der neuen Aufstellung haben wir die Geschäftsführung verjüngt und die Weichen in Richtung Zukunft gestellt.“

Ahlers und Reiss freuen sich über das entgegengebrachte Vertrauen. „Unser Anspruch ist es“, so Ahlers, „unsere Kunden auf ihrem Weg zur Digitalisierung partnerschaftlich zu begleiten, heutige und zukünftige Anforderungen an Geschäftsprozesse und IT zu verstehen und zu ihrem Geschäftserfolg abzusichern.“

Info: Sie erreichen den Autor per E-Mail an t.christ\_freier\_mitarbeiter@gottinger-tagelblatt.de.

## Lokhalle: Einblick in IT-Berufe

**Göttingen.** Die Berufsorientierungsmaßnahme „Know IT“ soll am Mittwoch, 4. November, in der Lokhalle ausgerollt werden. Der IT InnovationsCluster Göttingen/Südniedersachsen und die gpmD Gesellschaft für Projektierungs- und Dienstleistungsmanagement mitH könnten eine Durchführung unter Pandemiebedingungen sicherstellen, heißt es in einer Mitteilung. Die Veranstaltung könne aber nur von angemeldeten Schülern besucht werden.

In Abstimmung mit dem Ordnungs- und Gesundheitsamt der Stadt Göttingen sowie dem Fördermittlgeber, der Agentur für Arbeit, sei ein angepasstes Veranstaltungskonzept in der Lokhalle entwickelt worden. „Wir können nur eine ausgewählte Anzahl von maximal 50 Schülerinnen und Schülern vor Ort begrüßen, dafür ist aber ergänzend eine Online-Teilnahme direkt aus den Klassenräumen möglich“, sagt Netzwerkmanager Andreas Redeker.

Der besondere Charakter der Know IT soll trotz der Anpassungen erhalten bleiben. Sechs Auszubildende haben Vorträge über IT-Themen vorbereitet. Sie wollen den Schülern einen authentischen Einblick in die Berufsbilder der IT-Berufe geben.

## Schnelle Hilfe nach Teil-Lockdown

Was können Betriebe und Soloselbstständige unternehmen, um über den November zu kommen?

Von Ulrich Meinhard

**Göttingen.** Mit dem seit 2. November in Niedersachsen und bundesweit geltenden Teil-Lockdown ist das öffentliche Leben erneut deutlich heruntergefahren worden. Leidtragende sind neben den Konsumenten gastronomischer, kultureller und sonstiger Leistungen vor allem die Betriebe selbst, die schließen müssen. Kurz nach Beginn der Coronapandemie sind von Bund und Ländern sowie von einigen Landkreisen (auch Göttingen) Förder- und Netzprogramme für Unternehmen aufgelegt worden. Was konkret können Geschäftsführungen von kleinen und mittelständischen Betrieben sowie Soloselbstständige jetzt unternehmen, um über die Runden, um über den November zu kommen?

„Dazu bieten die Wirtschaftsförderungen von Stadt und Landkreis Göttingen individuelle Beratungen an“, versichert Florian Geldmacher von der GWG. Sowohl die GWG (Gesellschaft für Wirtschaftsförderung) und Stadtentwicklung Göttingen mitH als auch die WRG (Wirtschaftsförderung Region Göttingen GmbH) machen aktuell darauf aufmerksam, dass für die von den zeitli-

chen Schließungen betroffenen Unternehmen, Selbstständigen, Vereinen und Einrichtungen der Bund eine außerordentliche Wirtschaftshilfe gewährt, um sie für finanzielle Ausfälle zu entschädigen.

### Prozentsätze für größere Unternehmen

Der Erstattungsbeitrag betrage 75 Prozent des entsprechenden Umsatzes des Vorjahresmonats für Unternehmen bis 50 Mitarbeiter. Die Prozentsätze für größere Unternehmen würden nach „Maßgabe der Obergrenzen der einschlägigen beihilferechtlichen Vorgaben ermittelt“. Bei jungen Unternehmen, die nach November 2019 gegründet wurden, gelten die Umsätze von Oktober 2020 als Maßstab. „Soloselbstständige haben das Wahlrecht, als Bezugsrahmen für den Umsatz auch den durchschnittlichen Vorjahresumsatz 2019 zugrunde zu legen“, erklärt Geldmacher.

Erführt weiter aus: „Anderweitige Hilfen für den Zeitraum wie beispielsweise Kurzarbeitergeld oder Überbrückungshilfe werden vom Erstattungsbeitrag abgezogen.“ Der Bund will weiterhin Hilfsmaßnahmen für Unternehmen ver-



Angekettete Stühle und Tische stehen vor einem Cafe, das aufgrund der Maßnahmen zur Eindämmung der Pandemie geschlossen ist.

FOTO: IMAGO

längern und die Konditionen für die hauptsächlich betroffenen Wirtschaftsbereiche verbessern (Überbrückungshilfe III). Dies betreffe zum Beispiel den Bereich der Kultur- und Veranstaltungswirtschaft und die Soloselbstständigen. Die beiden Wirtschaftsförderungen weisen auf eine Mitteilung der IHK Hannover zur Überbrückungshilfe II hin. Seit dem 21.

Oktober können Anträge auf Überbrückungshilfe für den Zeitraum von September bis Dezember 2020 gestellt werden. Sie knüpft an die Überbrückungshilfe I an, die für den Zeitraum Juni bis August 2020 gewährt werden konnte.

Mit dem Niedersachsen-Schnellkredit unterstützt die NBank freiberuflich Tätige sowie Unternehmen

mit bis zu zehn Beschäftigten, die im Zusammenhang mit der aktuellen Corona-Pandemie in vorübergehender Finanzierungsnotlage geraten sind. Zinsgünstige Darlehen gibt es von 10000 bis 200000 Euro.

### Investitionsförderung für das Gaststättengewerbe

Die vom Land Niedersachsen angekündigte „Niedrigschwellige Investitionsförderung“ für das Gaststättengewerbe richtet sich an Unternehmen, die trotz wirtschaftlicher Umsatzeinbrüche durch die Corona-Pandemie planen, Qualitätsverbesserungen in ihrem Betrieb umzusetzen.

Weitere Informationen sind auf den Webseiten der GWG ([www.gwg-online.de](http://www.gwg-online.de)) und der WRG ([www.wrg-gottingen.de](http://www.wrg-gottingen.de)) zu finden, sie werden tagessaktuell gehalten, versichern die Gesellschaften. Und noch etwas: Die aktuellen Voraussetzungen und Angaben für das Kurzarbeitergeld gelten befristet bis 31. Dezember dieses Jahres.

Info: Den Autor erreichen Sie per E-Mail an u.meinhard@gottinger-tagelblatt.de.

# Pressemitteilungen Press release

## 7 AUS DER REGION

Donnerstag, 5. November 2020

### 53-Jähriger bedroht Rettungskräfte

Mann in Kassel festgenommen

**Kassel** – Ein 53-jähriger Mann wurde am Dienstagabend gegen 19.15 Uhr von Spezialeinsatzkräften der Polizei im Faustmühlenweg in Kassel festgenommen, nachdem er die Besatzung eines Rettungswagens bedroht hatte. Nach Angaben der Polizei war der Mann zuvor nach einem Einsatz in Lohfelden (Landkreis Kassel) durch die Besatzung des Rettungswagens in seine Wohnung in den Kasseler Stadtteil Forstfeld gebracht worden. Dort äußerte der 53-Jährige, dass er bewaffnet sei und drohte den Rettungskräften mit dem Einsatz einer Schusswaffe, die er in seinem Rucksack aufbewahren würde. Gleichzeitig habe er in den Ruck-

sack gegriffen und die Rettungskräfte aufgefordert, seine Wohnung zu verlassen. Die Rettungskräfte konnten sich unverletzt aus der Wohnung zurückziehen und verständigten umgehend die Polizei. Aufgrund der geäußerten Drohung kam es zum Einsatz von Spezialeinsatzkräften, die den Mann in der Folge in seiner Wohnung festnehmen konnten. Der 53-Jährige befand sich allein in seiner Wohnung und wurde in polizeilichen Gewahrsam gebracht. Die Durchsuchung seiner Wohnung führte nicht zum Auffinden einer Schusswaffe. Es bestand zu keinem Zeitpunkt eine Gefahr für Dritte, so die Polizei.



Reste der ehemaligen innerdeutsche Grenze bei Besenhausen.

FOTOS: CHRISTIAN MÜHLHAUSEN

## Angetrunken über die Grenze Rudolf Semmelrogge flüchtete 1976 in den Westen

VON CHRISTIAN MÜHLHAUSEN

Der 28. November 1976 – dieses Datum steht für den 67-jährigen Rudolf Semmelrogge für eine einschneidende Veränderung in seinem Leben. Ohne Plan, dafür leicht angetrunken, mit viel Zufall und auch dem nötigen Quäntchen Glück schafft er an diesem Tag gemeinsam mit einem Freund, was so vielen Menschen in der DDR verwehrt blieb: die Flucht in den Westen. Und das auch noch unbeschadet, fast im Spaziergang – obwohl die Grenze zu dieser Zeit gesichert war wie nie zuvor, mit Selbstschussanlagen, Elektrozaun und Minenfeldern. Die Geschichte ist so unglaublich, dass man sie tatsächlich kaum glauben mag. Kürzlich erzählte Semmelrogge sie als Teilnehmer bei einer Wanderung an der einstigen innerdeutschen Grenze bei Besenhausen (Gemeinde Friedland). Wir haben zugehört.

Dämmerung am Sonntag nach dem Fußball, im Goldenen Löwen in Kirchgangern, DDR, nur 20 Kilometer südlich von Göttingen, Schnaps, Bier, Zigaretten, an den Tisch wird geknabelt. Dennoch ist die Stimmung gedreht. „BSG Motor Kirchgangern gegen Bodenrode-Westhausen, wir hatten 2:1 verloren“, erinnert sich Semmelrogge, der als Verteidiger für Kirchgangern spielte und beim zweiten Gegentreffer keine ganz glückliche Figur machte.

Zu später Stunde springt einer der jungen Männer, Harald, unter dem Einfluss ethischer Biere auf und ruft: „Ich habe jetzt ab.“ Bei ihm hatte sich Frust aufgestaut, tags zuvor hatte er sich beim Tanz im Nachbarort „Hohengandern mit einem Mann gepöblt, eine Anzeige beim Abschnittsbevollmächtigten war die Folge. Harald läuft aus der Kneipe, die Dorfstraße hoch in Richtung Besenhausen, gen Westen. Zwei seiner Trinkkumpen folgen ihm, stoppen ihn schließlich am Tor des Grenzzaunes, bringen ihn nach Hause. Auch Semmelrogge läuft in dieser Nacht mit zwei Freunden raus, um zu schauen, was da vor sich geht. Während Harald von seinen Kumpeln nach Hause gebracht wird, zudem weit und breit kein Grenzer zu sehen ist, sagt Semmelrogge: „Und jetzt haben wir ab.“ Bis heute weiß



Flüchtete einst in den Westen: Rudolf Semmelrogge erinnert sich noch gut an die einschneidende Veränderung.

er nicht, was ihn zu diesem Entschluss, zu diesem folgenreichen Schritt brachte. „Wäre ich nüchtern gewesen, hätte ich mich das sicher nicht getraut.“ Freund Wolfgang entschließt sich, mitzukommen, der Dritte entscheidet sich fürs Bleiben.

Semmelrogge, 23, kennt die Grenze, er hatte seinen Wehrdienst bereits abgeleistet, ist als Lkw-Fahrer beim Kraftverkehr Heiligenstadt angestellt. Der Entschluss zur Flucht kommt spontan: Nie zuvor hegte er einen Gedanken daran, obwohl der Westen zum Greifen nah ist. „Ich bin so groß geworden, man hat sich daran gewöhnt, für uns war die Grenze normal.“ Der Drang nach Freiheit, nach Reisen und der Sehnsucht nach der Welt, die das Westfernsehen auch in ostdeutsche Stuben brachte – all das ist für Semmelrogge kein Thema. Er hatte sich arrangiert mit dem System.

Wie die Grenze aufgebaut war, weiß Semmelrogge als Kraftfahrer, oftmals fährt er Material in diesen Bereich. Die in diesem Abschnitt fließende Leine wurde drei Jahre zuvor kanalisiert bis zur Grenze nach Westen. „Am Leinedamm werden die sicher keine Minen verlegt hat been, deshalb habe ich mich

da sicher gefühlt.“ Doch wie überwindet man die Grenzsicherungen, wie den 3,60 Meter hohen Grenzbaum? „Das war wie eine Eingebung, dass wir unter die Brücke gegangen sind“, erinnert sich Semmelrogge.

Dort sind zur Sicherung nur Metallstäbe angebracht, die aber sind nur einseitig befestigt und lassen sich zur Seite biegen. Trockenen Fußes kommen er und sein Kumpel Wolfgang durch, schleichen sich, geduckt und halb kriechend, am Beobachtungsposten vorbei. In seiner Stasi-Akte wird Semmelrogge später lesen, dass einer der beiden Grenzer in dieser Nacht etwas gehört hatte, es aber für eine Katze hielt. Glück haben die beiden Angetrunkenen auch am letzten, mit Selbstschussanlagen gesicherten Zaun vor der Grenze – wieder lassen sich die Stäbe unterhalb der nächsten Leinebrücke auseinander biegen. Nach etwa einer Stunde, gegen Mitternacht, sind die beiden im Westen. Richtig fassen können es zu diesem Zeitpunkt beide noch nicht.

Zu nächtlicher Stunde die Klopfen sie am nur 300 Meter von der Grenze entfernt im Westen liegenden Gut Besenhausen. Dort empfängt man herzlich die „Brüder aus dem Osten“ und – als wären die beiden Flüchtlinge nicht

noch restalkoholisiert genug – öffnet sogar eine Flasche Sekt, informiert zudem den Zoll in Bremke. Von dort aus geht es zum Bundesgrenzschutz nach Duderstadt, die Bild-Zeitung berichtet über die geglückelte Republikflucht der Beiden.

Später geht es zur Erstaufnahme nach Helmstedt und Gießen, dann zu Befragungen durch die deutschen und US-amerikanischen Geheimdienste nach Hannover und München – als ehemaliger Soldat ist Semmelrogge ein wertvoller Informant. Staunend und etwas fremdelnd unternimmt er abends seine ersten Schritte im Westen durch Hannover: „Sowas wie das Steintorviertel kannte ich aus dem Osten nicht.“

Ein halbes Jahr später bezieht Semmelrogge seine erste Wohnung in Göttingen, sitzt dort allein – und weint. Erst jetzt realisiert er so richtig, was passiert ist: „Ich hatte Heimweh, ich hab geheult.“ Bereut habe er seinen Schritt nie, aber traurig war er, „auch weil ich wusste, ich komme da nicht mehr hin.“ Was mochte wohl aus seiner Mutter und seinen Geschwister geworden sein?

In Göttingen landet Semmelrogge, weil seine Familie hier lebt. Schnell fasst er Fuß als Berufskraftfahrer bei der Expedition Zufall, lernt in Göttingen seine Frau kennen, heiratet 1984 – im gleichen Jahr wie seine Schwester in Heiligenstadt. Dort hin fährt er im November 1984, zum ersten Mal nach acht Jahren geht es wieder in die alte Heimat, natürlich mit Kaffee und Strumpfhosen im Gepäck. Die Anwesenheitskarte bewahrt ihn als früheren Republikflüchtling vor Schwierigkeiten mit den DDR-Behörden. Ein unguutes Gefühl bleibt, sagt Semmelrogge: „Ich hatte bei den Amerikanern ausgesagt und ich wusste, dass die Stasi das wusste.“ Das bestätigt ihm später ein Blick in seine Stasi-Akte. Die Hochzeit feiert man ausgelassen – die Einheimischen und er als Wessi. Vorbehalte und Anfeindungen gibt es keine. „Das war wie früher unter Freunden.“

Dann die Wende. „Als die Grenze bei Hohengandern am Sonntag, 12. November 1989 aufmachte, war in Kirchgangern Kirmes. Da sind wir hin. Das war ein schönes Gefühl“, erinnert er sich.



Unfall auf der Autobahn 38: Dabei wurden am Dienstag zwei Personen verletzt.

FOTO: GREGOR MÜHLHAUSEN

### Autobahn 38: Unfall wegen Unachtsamkeit

Zwei Menschen wurden verletzt

**Leinefelde** – Zwischen den Anschlussstellen Breitenworbis und Leinefelde-Worbis kam es am Dienstag gegen 18.15 Uhr zu einem Unfall auf der Autobahn 38 aufgrund von Unachtsamkeit. Dabei erlitten zwei Personen Verletzungen. Eines der Autos war auf der Einfädele Spur unterwegs, die von der Reststraße Eichsfeld auf die Hauptfahrbahn in Richtung Göttingen führt. Der Fahrer ordnete sich zwischen zwei Lastwagen auf der rechten Hauptfahrbahn ein.

Danach wechselte er auf die linke Fahrspur, ohne den nachfolgenden Verkehr zu beachten. Ein Fahrer, der auf der linken Spur mit seinem Auto unterwegs war, konnte eine Kollision nicht mehr verhindern. Die beiden Insassen des ersten Autos wurden leicht verletzt. Beide Unfallfahrzeuge mussten abgeschleppt werden.

Der Sachschaden beläuft sich auf etwa 15 000 Euro. Es kam für knappe eine Stunde zu Behinderungen.

### Nanophotonik statt Laser-Laboratorium

Institut ändert seinen Namen

**Göttingen** – Institut für Nanophotonik Göttingen heißt das Laser-Laboratorium Göttingen ab sofort.

„Wir haben uns in den vergangenen zehn Jahren zu einem Ansprechpartner des Mittelstands für Fragestellungen der Photonik, der optischen Technologien, weiterentwickelt“, erklärt Prof. Dr. Alexander Egner, der Direktor der außeruniversitären Forschungseinrichtung. Das Institut mit seinen knapp 50 Mitarbeitern befasst sich insbesondere mit Strukturen im Bereich von einem bis 100 Nanometern.

Die Einrichtung, die Egner seit 2010 leitet, forscht im Bereich der Spektroskopie, mit der sich unter anderem Inhaltsstoffe von Proben ermitteln lassen, der Sensorik und der Nanostrukturierung von

Oberflächen. Ein besonderer Schwerpunkt ist die Mikroskopie jenseits der Beugungsgrenze des Lichts (Nanoskopie).

„Unsere Partner der vergangenen Jahre wissen, wo für wir heute stehen“, sagt Direktor Egner. Bei Außenstehenden wecke der alte Institutsname falsche Assoziationen. Der neue Name passe auch besser zu zwei neuen Netzwerken, an deren Aufbau das Institut beteiligt sei. Das ToolsLife-Cluster soll das Verständnis der molekularen Mechanismen von Krankheiten und die Auswertung potenzieller Wirkstoffe zu ihrer Bekämpfung verbessern. Das Südniedersachsen Point of Care Cluster habe zum Ziel, die Region zum Innovationsführer bei Schnelltests zu machen.