



### LASER-LABORATORIUM GÖTTINGEN E.V.

Licht als Werkzeug zu nutzen ist eine der wichtigsten technologischen Herausforderungen der Zukunft. Laser repräsentieren die anspruchsvollsten und vielfältigsten Lichtquellen. Daher stehen Laserforschung und Laseranwendung im Mittelpunkt der Agenda der optischen Technologien des 21. Jahrhunderts.





**Laser-Laboratorium 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@llg-ev.de](mailto:info@llg-ev.de)  
[www.llg-ev.de](http://www.llg-ev.de)

## **Impressum**

Herausgeber  
Laser-Laboratorium Göttingen e.V. (LLG)

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.

© 2018. Alle Rechte vorbehalten.

Bildquellen:  
Laser-Laboratorium Göttingen e.V.  
Photonik Inkubator GmbH  
Advanced Microfluidic Systems GmbH

# Inhaltsverzeichnis

## Contents

### Inhalt

### Contents

<b>Vorwort</b>	<b>4</b>	<b>Preface</b>	<b>4</b>
<b>Leitbild</b>	<b>8</b>	<b>Mission Statement</b>	<b>8</b>
<b>Das Institut im Profil</b>	<b>9</b>	<b>The LLG Profile</b>	<b>9</b>
<b>Institutsstruktur</b>	<b>10</b>	<b>Institute Structure</b>	<b>10</b>
<b>Das Institut in Zahlen</b>	<b>12</b>	<b>Statistics of the Institute</b>	<b>12</b>
<b>Die Abteilungen</b>	<b>15</b>	<b>The Departments</b>	<b>15</b>
<b>Optische Nanoskopie</b>	<b>17</b>	<b>Optical Nanoscopy</b>	<b>17</b>
<b>Kurze Pulse / Nanostrukturen</b>	<b>35</b>	<b>Short Pulses / Nanostructures</b>	<b>35</b>
<b>Optik / Kurze Wellenlängen</b>	<b>55</b>	<b>Optics / Short Wavelengths</b>	<b>55</b>
<b>Photonische Sensorik</b>	<b>69</b>	<b>Photonic Sensor Technologies</b>	<b>69</b>
<b>Projekte</b>	<b>78</b>	<b>Projects</b>	<b>78</b>
<b>Patente</b>	<b>89</b>	<b>Patents</b>	<b>89</b>
<b>Publikationen</b>	<b>90</b>	<b>Publications</b>	<b>90</b>
<b>Konferenzbeiträge</b>	<b>92</b>	<b>Conference Contributions</b>	<b>92</b>
<b>Abschlussarbeiten</b>	<b>96</b>	<b>Final Thesis</b>	<b>96</b>
<b>Ausgewählte Kooperationspartner</b>	<b>97</b>	<b>Selected Cooperation Partners</b>	<b>97</b>
<b>ZUSE-Gemeinschaft</b>	<b>98</b>	<b>ZUSE-Gemeinschaft</b>	<b>98</b>
<b>Messen und Veranstaltungen</b>	<b>100</b>	<b>Exhibitions and Events</b>	<b>100</b>
<b>Neuigkeiten</b>	<b>110</b>	<b>News</b>	<b>110</b>
<b>Pressemitteilungen</b>	<b>112</b>	<b>Press releases</b>	<b>112</b>

# Vorwort

## Preface

### **Liebe Leserinnen und Leser,**

gemeinnützige Forschung dient dem Wohl der Allgemeinheit und ist für die Sicherung der Zukunft des Wissens- und Wirtschaftsstandorts Niedersachsen bzw. Deutschland unverzichtbar. Zwangsläufig kann sie nur zu einem Teil mit Industriemitteln finanziert werden. Der Großteil der Finanzierung erfolgt über eine öffentliche Förderung von Bund und Land – letztendlich also aus Steuermitteln. In regelmäßigen Abständen wird das LLG deshalb von der Wissenschaftlichen Kommission Niedersachsen (WKN) evaluiert. Die Ergebnisse der letzten Evaluation im Rahmen einer umfassenden Strukturanalyse der durch das Land Niedersachsen finanzierten außeruniversitären Forschungseinrichtungen sind nunmehr veröffentlicht. Das Land Niedersachsen, heißt es im Abschlussbericht, besitze mit dem LLG, das mit Bestnoten abgeschnitten habe, ein „hervorragendes Institut“ mit „großer nationaler und internationaler Ausstrahlung“. Das Institut spiele als Kooperationspartner und Dienstleister der Industrie, insbesondere der kleinen und mittelgroßen Unternehmen (KMU), eine „wichtige Rolle“. Es bearbeite Projekte von den Grundlagen bis zur Marktreife, betreibe eine „aktive Ausgründungspolitik“, versorge die Wirtschaft mit „hervorragend ausgebildeten Nachwuchskräften“ und präge mit anderen Einrichtungen den (Forschungs-) Campus Göttingen. Insgesamt betreibe das LLG Forschung und Entwicklung „mit hoher gesellschaftspolitischer Relevanz“ und erfülle „in beispielhafter Weise die Funktion einer Schnittstelle zwischen Wissenschaft und Wirtschaft“. Wir danken der WKN sowie den Mitgliedern der Fach- und Strukturkommission für die umfassende und kritische Überprüfung und die zukunftsweisende Bewertung. Diese Analyse ist neben Kennzahlen, Veröffentlichungen in wissenschaftlichen Fachzeitschriften und dem hier vorliegenden Tätigkeitsbericht ein bedeutender Eckpfeiler unserer Qualitätssicherung.

Die positive Entwicklung des Jahres 2018 für das LLG zeigt sich auch in der Aufnahme des vom LLG initiierten Netzwerks für sensorgestützte Sicherheitssysteme (NESSI) in die zweite Förderphase des Zentralen Innovationsprogramms Mittelstand (ZIM). Das Netzwerk, das derzeit aus 13 Partnern besteht, leistet durch die Entwicklung sensorgestützter Produkte und Dienstleistungen wichtige Beiträge zur zivilen Sicherheit. Das LLG bringt seine Expertise in den Bereichen spektroskopische Erfassung von Umwelt- und Gefahrenstoffen sowie diffraktive Beschriftungen ein und forscht an dem bereits bewilligten Projekt „GLASIDEE – Glasmarkierung mit Laser als Sicherheits-, Identifikations- und Design-Element“ mit dem Ziel, eine industrietaugliche laserbasierte Beschriftungstechnologie sowie die zugehörige Auslesestrategie zu entwickeln. Ergebnis soll sein, mit einer einzigartigen diffraktiven Markierung etwa pharmazeutische Gläser, Glas in der Automobilindustrie oder Uhrengläser gegen Produktfälschungen zu schützen.

Mit Spannung haben unsere Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter den Start der Aeolus-Satellitenmission verfolgt, da das LLG an der Entwicklung von Aladin (Atmospheric Laser Doppler Instrument), dem wichtigsten Messinstrument dieser Mission der Europäischen Weltraumorganisation, mitgearbeitet hat. In umfangreichen Messreihen wurde sichergestellt, dass die hierbei eingesetzten Optiken den harschen Bedingungen im Weltraum standhalten werden. Aeolus ist die erste



Apl. Prof. Dr. Alexander  
Egner  
Institutsdirektor

# Vorwort

## Preface

### Dear Readers,

Nonprofit research serves the common good and is indispensable for ensuring the future of Lower Saxony and Germany as a knowledge and business hub. Inevitably, it can only be financed in part by industrial funds. The majority of financing takes the form of public funding provided by the federal government and state – in other words, it ultimately comes from taxes. As a result, LLG is evaluated by the Scientific Commission of Lower Saxony (WKN) at regular intervals. The results of the latest evaluation, conducted in conjunction with comprehensive analysis of structures at non-university research institutes financed by the State of Lower Saxony, have been published. According to the final report, the State of Lower Saxony has at its disposal an “extraordinary institute” with “large national and international appeal” in the form of LLG, which was a top performer. It goes on to say that the institute plays a “key role” as a partner and service provider to the industry and, in particular, small and medium-sized enterprises (SMEs). It carries out projects from the initial idea to market maturity, maintains an “active spin-off policy,” supplies the industry with “very well-trained young professionals,” and along with other institutions helps to shape the Göttingen (Research) Campus. LLG carries out research and development “with high sociopolitical relevance” and “fulfills the function of an interface between science and business in an exemplary way.” We would like to thank WKN and the members of the Expert and Structure Commission for the comprehensive and crucial assessment and forward-looking evaluation. Along with performance indicators, publications in scientific journals, and this activity report, this analysis is an important cornerstone of our quality assurance.

LLG’s positive development in 2018 is also reflected in the fact that the network for sensor-supported security systems (NesSi), initiated by LLG, has been incorporated into the second funding phase of the Central Innovation Programme for small and medium-sized enterprises. The network, which currently comprises 13 partners, plays a key role in civil security by developing sensor-supported products and services. LLG contributes its expertise in the areas of spectroscopic detection of environmental and hazardous substances as well as diffractive markings. It also is carrying out research on the already approved project, “GLASIDEE – Glass Marking with Laser as Security, Identification, and Design Element,” with the aim of developing industry-suitable, laser-based marking technology and the corresponding reading strategy. The result should be a unique diffractive marking that protects the glass used in pharmaceuticals, the automotive industry, clocks and watches, and other areas from counterfeit products.

Our employees followed the start of the Aeolus satellite mission with excitement, as LLG helped to develop the Atmospheric Laser Doppler Instrument (Aladin), the most important measuring instrument in this European Space Agency mission. Extensive measurements were carried out to ensure that the optical elements used will withstand the harsh conditions in space. Aeolus is the first satellite mission to

# Vorwort

## Preface

Satellitenmission, die weltweit Profile des Erdwindes erfasst, wodurch die Genauigkeit von Wetter- und Klimavorhersagen sowie das Verständnis von für Klimaschwankungen relevanten Prozessen verbessert werden kann.

Zum ersten Mal war das LLG im April 2018 auf der Analytica in München, der internationalen Leitmesse für Labortechnik, Analytik und Biotechnologie, vertreten. Wir präsentierten hierbei unsere Expertise auf dem Gebiet des nanoskaligen Analysierens und Abbildens mit Licht. Dazu gehörte unter anderem ein Analysegerät, das Gaschromatographie und Ionenmobilitätsspektrometrie kombiniert und somit Analyte aus der Gasphase schnell und in sehr niedrigen Mengen bestimmen kann. Wir zeigten zudem, wie sich mittels des STED-Prinzips mikroskopische Aufnahmen mit einer Auflösung von nur wenigen zehn Nanometern erstellen lassen. Die Detailschärfe der Bilder ist damit bis zu zehnmal höher als bei der herkömmlichen Fluoreszenzmikroskopie.

Das LLG unterzeichnete 2018 die Charta der Vielfalt, eine Initiative zur Förderung von Vielfalt in Unternehmen und Institutionen. Wir dokumentieren mit diesem Schritt, dass wir jeglicher Benachteiligung aus Gründen der Nationalität, der ethnischen Herkunft, des Geschlechts, der Religion oder Weltanschauung, einer Behinderung, des Alters oder der sexuellen Orientierung entschieden entgegengetreten. In der Unterschiedlichkeit unserer Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter sehen wir einen Garanten für unsere erfolgreiche Forschung und Entwicklung.

Sehr gut entwickelt hat sich der beim LLG angesiedelte Photonik-Inkubator, den die Evaluation der Wissenschaftskommission Niedersachsen als „Schnittstelle zwischen Wissenschaft und Wirtschaft“ würdigte. Drei Ausgründungen hat es bereits gegeben: FiSens GmbH, DBD Plasma GmbH und OptoGenTech GmbH. Drei Projekte werden in der bis Mitte 2019 laufenden Förderperiode noch betreut. Bei zwei von ihnen ist eine Unternehmensgründung absehbar. Zudem erfolgte mit der Advanced Microfluidic Systems GmbH eine Ausgründung aus dem LLG, an der auch Partner aus Forschung und Industrie beteiligt sind. Das Unternehmen, das seinen Sitz im Technologiezentrum des Instituts hat, arbeitet auf dem Gebiet der Optomikrofluidik.

Das LLG, dessen Betriebshaushalt ein Volumen von 5,5 Millionen Euro hat, konnte sein Ergebnis auf dem Niveau von 2017 halten – dem seinerzeit besten Ergebnis seit Bestehen des Instituts. Dazu trug nicht zuletzt eine weitere Steigerung der direkten Auftrageinnahmen bei. Das sehr gute Abschneiden verdanken wir dem Engagement und dem Ideenreichtum unserer Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter. Ihnen gilt mein herzlicher Dank.

Ihnen als Leserinnen und Lesern wünschen wir eine anregende Lektüre und laden Sie herzlich zur Zusammenarbeit mit uns ein.



# Vorwort

## Preface

identify wind profiles around the world, which in turn can improve the precision of weather and climate forecasts and the understanding of processes relevant for climatic fluctuations.

In April 2018, LLG was represented for the first time at the Analytica in Munich, the leading international trade fair for laboratory technology, analysis, and biotechnology. We presented our expertise in the area of nanoscale analysis and imaging with light. This included an analyzer that combines gas chromatography and ion mobility spectrometry and can therefore quickly detect analytes from the gas phase present in very low quantities. We also demonstrated how to capture microscopy images with a resolution of just ten nanometers using the STED principle. The image detail is therefore up to ten times better than that of conventional fluorescence microscopy.

LLG signed the Diversity Charter in 2018, an initiative designed to promote diversity at companies and institutions. With this step, we documented the fact that we resolutely oppose all forms of discrimination based on nationality, ethnicity, gender, religion or ideology, disability, age or sexual orientation. We view the diversity of our employees as a guarantee for our research and development success.

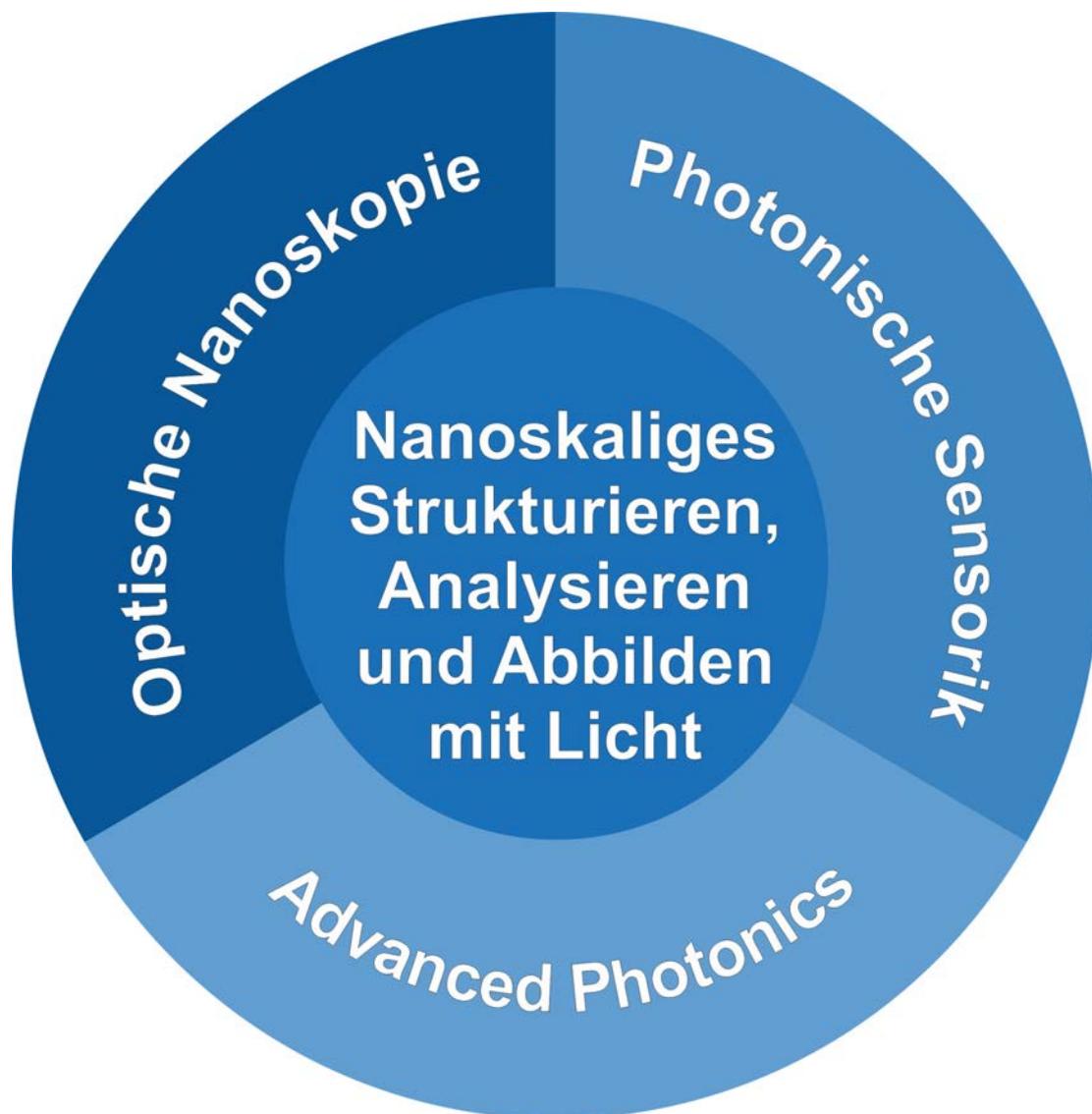
The photonic incubator established at LLG developed very well and was acknowledged as the “interface between science and business” in the evaluation carried out by the Scientific Commission of Lower Saxony. There have already been three spin-offs: FiSens GmbH, DBD Plasma GmbH, and OptoGenTech GmbH. Three projects are still being overseen in the current funding period which will end in mid-2019. Two of them are likely to result in a spin-off. A new LLG spin-off was also established in the form of Advanced Microfluidic Systems GmbH, with some of the shares going to partners in research and industry. The company, which is based in the institute’s technology center, operates in the area of opto-microfluidics.

With an operating budget of €5.5 million, LLG managed to maintain its earnings at the 2017 level, which at that time were the best earnings in institute history, not least of all due to another increase in direct order acceptance. The exceptional performance is the result of our employees’ dedication and wealth of ideas and I would like to express my heartfelt thanks to all of them.

We hope that you, the readers, will find inspiration, and would like to take this opportunity to invite you to work with us.

*Alexander Egner*

Leitbild LLG  
Mission Statement



# Leitbild LLG

## Mission Statement

### **Exzellenz durch Zusammenarbeit**

Unsere Mission sind 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 Laser-Laboratorium 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 für Fragestellungen aus dem Bereich der angewandten Optik. 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 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter. Deren Fähigkeiten und deren Begeisterung, ein offener Austausch und ein ausgezeichnetes Arbeitsumfeld schaffen die Grundlage für kreative Lösungen von wissenschaftlichen und technologischen Fragestellungen.

### **Excellence through cooperation**

Our mission is application-oriented basic research in the field of optical technologies and the transfer of technology from science to the market with strong regional attachment. We use light as a tool and are experts in nano-scale structuring, analyzing and imaging with light. We are among the world's leading institutions in this respect.

The Laser Laboratorium Göttingen conducts interdisciplinary top research in cooperation with regional, national and international partners from industry and research, thus developing competitive products and solutions and innovations for the benefit of society and for strengthening the economy. In particular, we see ourselves as the first point of contact for SMEs (small and medium sized enterprises) for issues in the field of applied optics. We work together with our customers confidentially, quick and effectively. The regional economy profits from us through knowledge transfer and excellent trained graduates. We initiate and support dialogue and exchange of experience in all topics regarding optical technologies.

We offer industry-related scientific education at the highest level. Our success is based on the knowledge and commitment of our employees. Their abilities and their enthusiasm, open exchange of ideas and excellent work environment create the basis for creative solutions to scientific and technological issues.

# Institutsstruktur

## Institution Structure



Laser-Laboratorium Göttingen e. V.

### 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



Birgit Sterr  
Verwaltungsleiterin

### 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

# Institutsstruktur

## Institution Structure

### Kuratorium / Board of Trustees



**Prof. Dr. Peter Loosen, Vorsitzender**

Fraunhofer Institut für Lasertechnik,  
Aachen



**Prof. Dr. Philippe Bastiaens**

Max-Planck-Institut für molekulare Physiologie,  
Dortmund



**Dr. Dietmar Gnass**

Polytec GmbH,  
Waldbronn



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

Universität Linz,  
Österreich



**Prof. Dr. Andrea Koch**

HAWK Hochschule für angewandte Wissenschaft  
und Kunst, Hildesheim/Holzminden/Göttingen



**Prof. Dr. Eva-Maria Neher**

Georg-August-Universität,  
XLAB-Göttinger Experimentallabor für junge  
Leute e.V., Göttingen



**Prof. Dr. Tim Salditt**

Georg-August-Universität, Institut für  
Röntgenphysik, Göttingen

# Das Institut in Zahlen

## Statistics of the Institute

### Wirtschaftliche Entwicklung

Das Laser-Laboratorium Göttingen ist seit 1987 als Institut für anwendungsorientierte Grundlagenforschung im Bereich der optischen Technologien wichtiger Partner für Hochschulen und Unternehmen.

Es erhält einen wichtigen Anteil zur Grundfinanzierung in Form institutioneller Förderung vom Land Niedersachsen. Darüber hinaus erwirtschaftet es als weltweit anerkannte Forschungseinrichtung für angewandte Grundlagenforschung im Bereich der Optischen Technologien seit Jahren einen kontinuierlich hohen Dritt-mittelanteil aus Auftragsforschung in Zusammenarbeit mit der Industrie sowie aus Projekten des Bundes und der DFG.

Die wirtschaftliche Entwicklung konnte im Jahr 2018 auf erfreulich hohem Niveau gehalten und im Bereich der Industrieaufträge nochmals gesteigert werden.

### Personalentwicklung

Das Laser Laboratorium Göttingen beschäftigte am Ende des Jahres 2018 insgesamt 51 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter, davon der überwiegende Teil in zeitlich befristeten Ausbildungs- und Arbeitsverhältnissen.

Aufgrund der engen Vernetzung mit kleinen und mittelständischen Unternehmen bis hin zu Großkonzernen bieten sich allen Institutsangestellten als hochqualifizierte Fachkräfte hervorragende Chancen am Arbeitsmarkt. So sind bisher 99 Prozent im Anschluss an ihre Mitarbeit am LLG sofort in verantwortungsvolle neue Anstellungen gewechselt. Hiervon konnten in rund 50 % der Fälle Betriebe und Forschungseinrichtungen in Niedersachsen profitieren.

### Ausbildung

Erneut wurden wieder drei Promotionen im LLG 2018 in Kooperation mit der Universität Göttingen mit sehr guten Ergebnissen abgeschlossen. In der Ausbildung von Bachelor- und Masterstudenten arbeitet das LLG neben der Georg-August-Universität Göttingen eng mit der HAWK Hildesheim/Holzminden/Göttingen zusammen. Darüber hinaus werden regelmäßig Praktikanten Einblicke in die moderne Laserforschung gewährt.

### Infrastruktur

Für den Erhalt des innovativen und effizienten Forschungsbetriebs bedarf es vielfältiger Unterstützung. So stehen den Wissenschaftlern neben hochwertig ausgestatteten Werkstätten für die Bereiche Mechanik, Elektronik und Optik gut geschultes technisches Personal sowie eine zuverlässige Verwaltung unter der Leitung von Birgit Sterr, zugleich stellvertretende Geschäftsführerin des LLG, zur Seite.

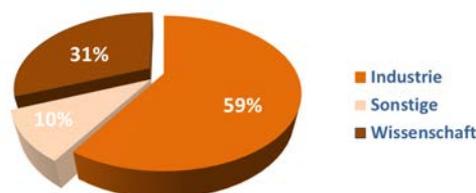


**Birgit Sterr**  
Verwaltungsleiterin

+49(0)551/5035-32  
+49(0)551/5035-99  
birgit.sterr@llg-ev.de

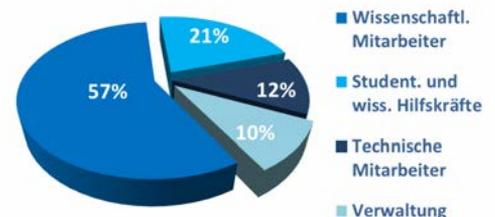
### Mitarbeiter Staff members

Dirk Born  
Tatjana Kasten  
Uwe Lampe  
Olaf Mädiger  
Andreas Spata  
Jutta Steckel  
Anette Zwingmann



Anschlussbeschäftigungen Stand  
31.12.2018

▲ Anschlussbeschäftigungen unserer Mitarbeiter (Wissenstransfer).  
*Employment sector of our former members (knowledge transfer).*



Personalstruktur Kopfzahlen 2018

▲ Personalstruktur in Beschäftigtenkategorien.  
*Personnel structure in occupational categories.*

# Das Institut in Zahlen

## Statistics of the Institute

### Economic development

As an institute for application-oriented fundamental research in the field of optic technologies, Laser-Laboratorium Göttingen has been an important partner for universities and companies since 1987.

The Laser-Laboratorium receives an essential portion of its basic financing in the form of an institutional grant from the German State of Lower Saxony. In addition, as a globally recognised research institute for applied fundamental research in the field of optic technologies, LLG has for years generated a consistently high level of third-party funds through research on behalf of industrial customers as well as from projects for the German Federal Government and the German research organisation DFG.

### Staff development

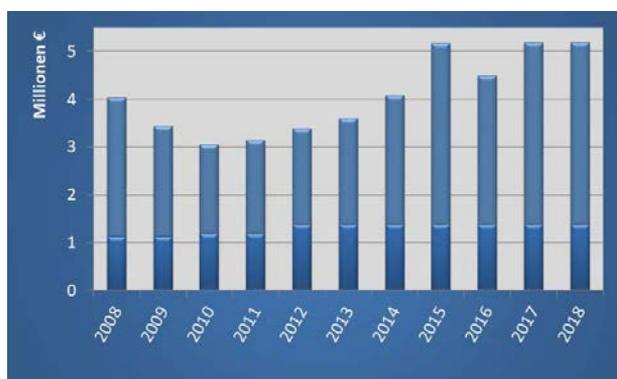
At the end of 2018, Laser Laboratorium Göttingen employed a total of 50 staff members, of which the majority were in temporary training and employment. As highly qualified technical staff, all employees of the institute have excellent opportunities in the labour market due to the close-knit network of small and medium-sized enterprises as well as large companies. To date, 99 per cent of LLG employees have immediately gone on to new positions of responsibility following their work with the LLG. Of those, some 50 per cent were positions with businesses and research institutes in Lower Saxony.

### Training

In 2018, three doctoral candidates concluded their fellowship at the LLG in cooperation with Georg August Universität Göttingen with very good results. For the training of bachelor and master students, the LLG works closely with – in addition to Georg August Universität Göttingen – the University of Applied Sciences and Arts Hildesheim/Holzminden/Goettingen. Additionally, the LLG regularly offers apprentices a first look at the field of modern laser research.

### Infrastructure

Much support is required to maintain innovative and efficient research operations. As such, in addition to laboratories equipped with high-quality equipment in the fields of mechanics, electronics and optics, our scientists have at their disposal well-trained technical staff as well as reliable administration under the leadership of Birgit Sterr, who is also the Deputy Chairwoman of the LLG.



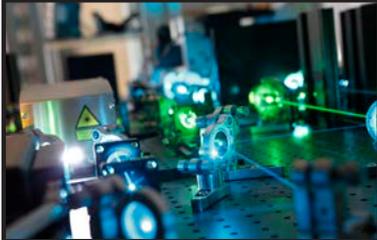
▲ Betriebshaushalt: Grundfinanzierung durch das Land Niedersachsen. Eigene Einnahmen durch Projekte und Industrieaufträge.

Operating budget: basic funding by the State of Lower Saxony. Own income through projects and industrial contracts.

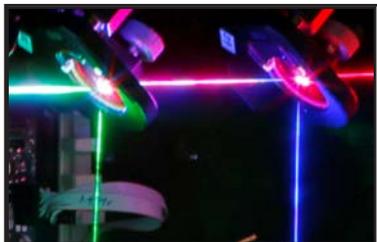


# Die Abteilungen

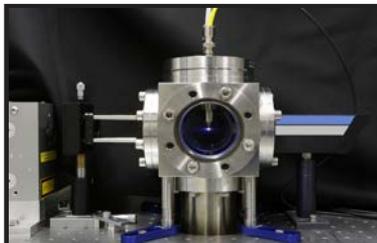
# The Departments



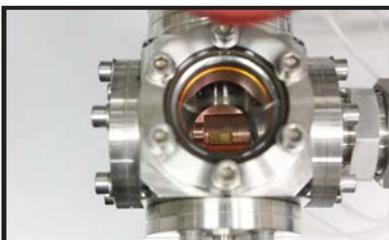
**Optische Nanoskopie**  
**Optical Nanoscopy**



**Kurze Pulse / Nanostrukturen**  
**Short Pulses / Nanostructures**

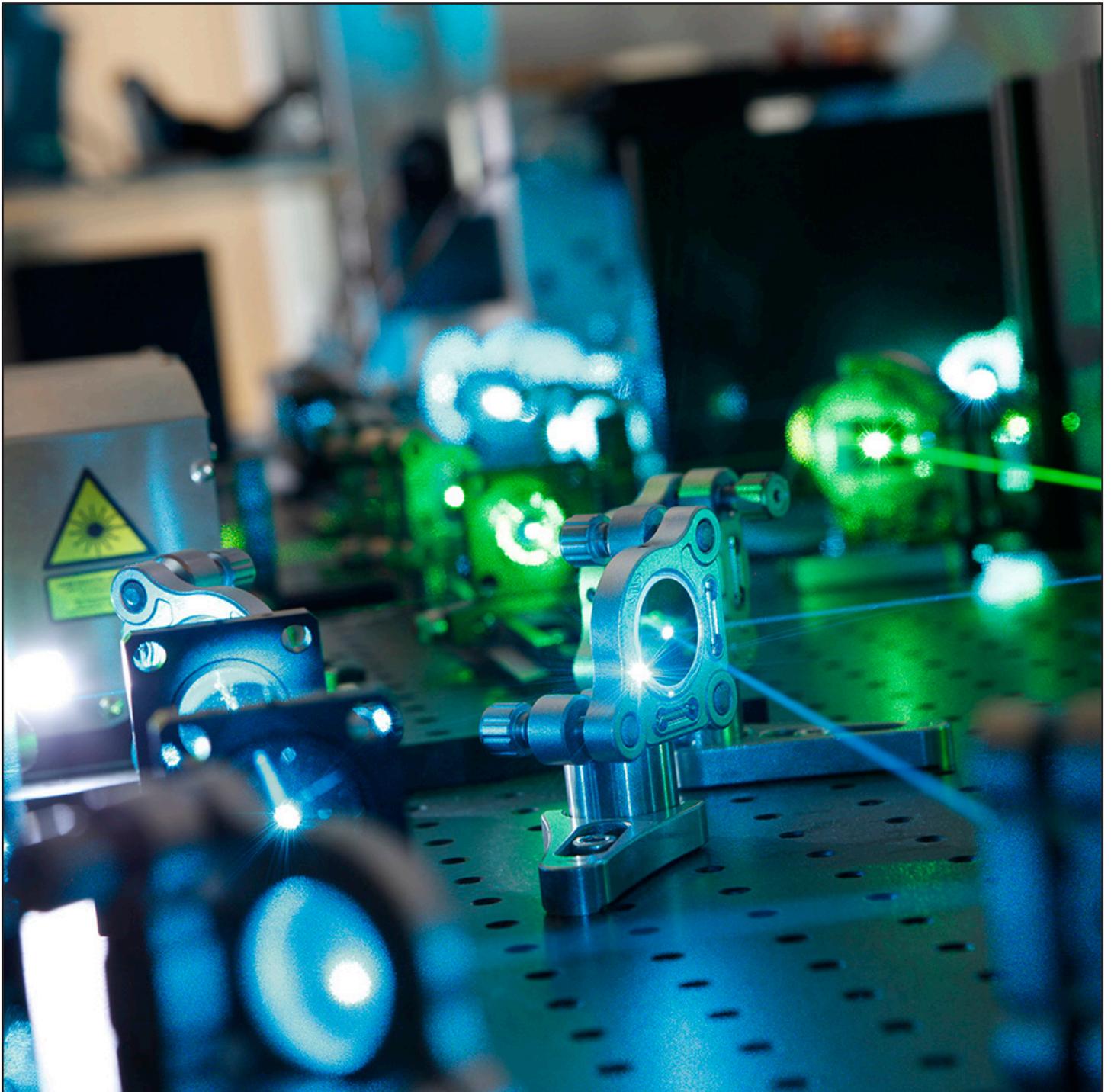


**Optik / Kurze Wellenlängen**  
**Optics / Short Wavelengths**



**Photonische Sensorik**  
**Photonic Sensor Technologies**

Berichte aus der Abteilung  
Departmental Reports



# 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 for 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.



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

☎ +49-(0) 551/5035-35  
☎ +49-(0) 551/5035-99  
✉ alexander.egner@llg-ev.de

### **Mitarbeiter**

#### **Staff members**

Dr. Claudia Geisler  
Parul Jain  
Julia Kratz  
Oskar Laitenberger  
Dr. Francesco Rocca  
René Siegmund  
Dr. Kareem Soliman  
Britta Vinçon

# Optische Nanoskopie

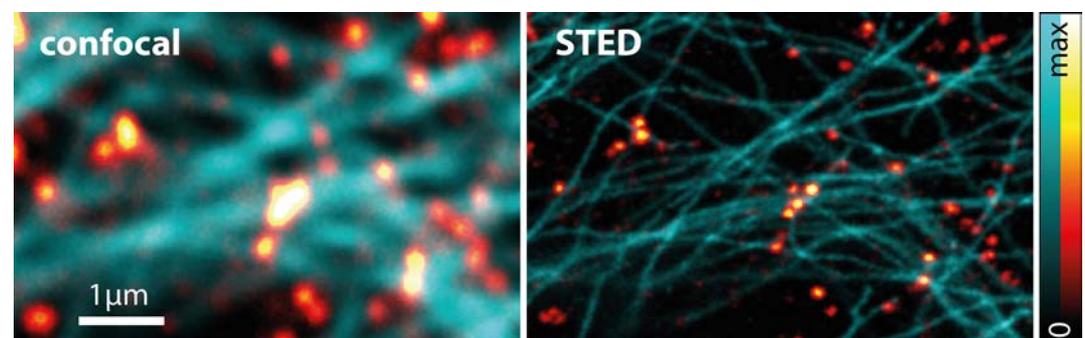
## Optical Nanoscopy

### 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, nicht-fluoreszierenden 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 eingengegte fluoreszierende Bereich pixelweise durch das Bildfeld gerastert.

Die Auflösung des STED-Bildes, die durch die Ausdehnung des fluoreszierenden Flecks 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.



▲  
Zweifarbige Mikroskopbild in konfokaler Auflösung (links) und in Hochauflösung (rechts). Gezeigt sind das Mikrotubulinetzwerk (cyan) und Clathrin (gelb-rot) in einer U2-OS Zelle.

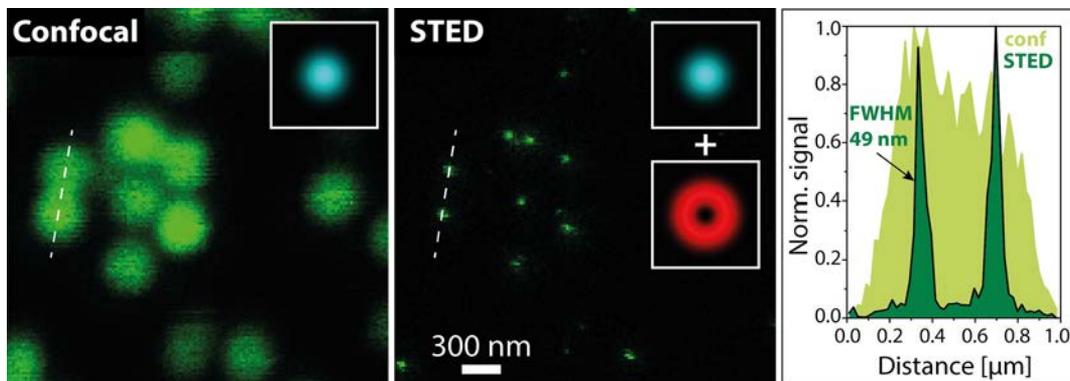
Two-color microscopy image in confocal (left) and in high resolution (right). Shown are the microtubule network (cyan) and clathrin (yellow-red) in a U2-OS cell.

# Optische Nanoskopie

## Optical Nanoscopy

### 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.*

The resolution of the STED image, which is given by the extent of the fluorescent spot, depends on the applied STED intensity and the photophysical properties of the fluorophore. Theoretically, the resolution can get arbitrarily better and, experimentally, a few 10 nanometers can currently be achieved without any problems.

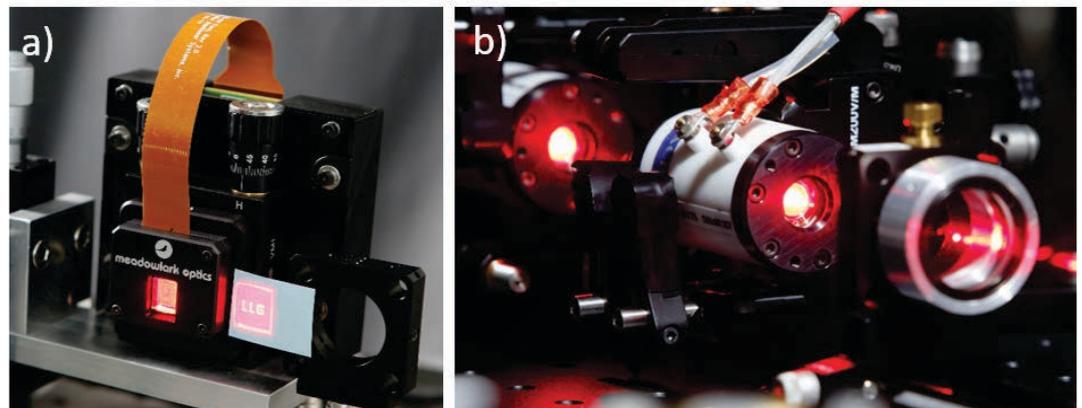
For many biological questions, it is interesting to investigate the relative spatial distribution of two different types of proteins at high resolution. From the color-coded images of locations, conclusions can then be drawn regarding the protein's function and their interaction. Our technical implementation 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.

# Optische Nanoskopie

## Optical Nanoscopy

### Tomographische STED-Mikroskopie

Die optische Auflösung wird bei der STED-Mikroskopie von der STED-Intensität im Laserfokus und von den Eigenschaften der Farbstoffe bestimmt und ist theoretisch unbegrenzt. Jedoch ergeben sich praktische Limitierungen, z. B. durch die verfügbare Laserleistung oder durch die Photostabilität der verwendeten Fluoreszenzfarbstoffe. Im Falle einer limitierten Laserleistung bleiben eventuell Details der zu untersuchenden Probe verborgen, die mit höherer Leistung aufgelöst werden könnten. Reicht dagegen die Photostabilität der Fluoreszenzfarbstoffe nicht aus, so wird zwar die gewünschte Auflösung, jedoch keine ausreichende Bildhelligkeit erreicht. Wir haben eine Variante der STED-Mikroskopie entwickelt, mit der die benötigte Lichtdosis reduziert wird und trotzdem die Bildqualität erhalten bleibt. Das Grundprinzip dieser tomographischen STED-Mikroskopie ist es, den fluoreszierenden Bereich nicht in zwei Richtungen wie in der klassischen STED-Mikroskopie, sondern in nur einer Richtung einzuschränken. Dazu wird ein STED-Fokus verwendet, der - anders als die klassische Ringmode - eine Nulllinie der Intensität aufweist. Hochauflösende Informationen des Objekts in allen Raumrichtungen lassen sich durch Rotation dieser sogenannten 1D-Mode erzielen. Die so erhaltenen Einzelbilder erlauben dann die Rekonstruktion eines zweidimensional hochaufgelösten Bilds. In der Praxis lässt sich die 1D-Mode z. B. mit Hilfe eines räumlichen Lichtmodulators und zweier Pockelszellen rotieren.



▲ Kernkomponenten unseres tomoSTED-Mikroskops sind ein räumlicher Lichtmodulator (a) und zwei Pockelszellen (b), die zur Drehung der 1D-Mode verwendet werden.

*Key components of our tomoSTED microscope are a spatial light modulator (a) and two Pockels cells (b), which are used to rotate the 1D mode.*

Der Vorteil der tomoSTED-Mikroskopie gegenüber der klassischen Variante der STED-Mikroskopie ist, dass sie eine identische Auflösungserhöhung unter Verwendung niedrigerer Laserleistungen und kürzerer Belichtungszeiten erzielt. Die geringere Lichtdosis reduziert die Strahlenbelastung der Probe und folglich das Ausbleichen des Farbstoffs. Dies wiederum erhöht die Ausbeute an Fluoreszenzphotonen pro Farbstoffmolekül, was insbesondere unter signallimitierten Bedingungen vorteilhaft ist und zu helleren und besser aufgelösten Bildern führt.

# Optische Nanoskopie

## Optical Nanoscopy

### Tomographic STED microscopy

The optical resolution in STED microscopy is determined by the focal STED intensity and by the properties of the fluorophores and it is theoretically unlimited. However, there are practical constraints for example due to the available laser power or the photostability of the fluorescent dyes. In case of limited laser power, details of the sample may remain hidden, which could be resolved with higher power. If the photostability is insufficient, the image - though being well resolved - may be too dark. We have developed a STED microscopy variant which reduces the necessary light dose and still maintains the image quality. The key principle of this tomographic STED microscopy is that the fluorescent area is not narrowed in two dimensions as in classical STED microscopy, but only in one dimension. For this purpose, a STED focus is used which - unlike the classical ring mode - has a zero line of intensity. High-resolution information of the object in all spatial directions can be achieved by rotating this so-called 1D mode. The single images obtained in this way allow the reconstruction of a two-dimensionally highly-resolved image. In practice, the 1D mode can be rotated using for example a spatial light modulator and two Pockels cells.



▲ Prinzip der tomographischen STED-Mikroskopie: Aus einer Sequenz von Einzelbildern mit einer hohen Auflösung in nur einer, aber jeweils unterschiedlicher Richtung lässt sich ein zweidimensional hochaufgelöstes Bild rekonstruieren.

*Principle of tomographic STED microscopy: A two-dimensionally super-resolved image can be reconstructed from a series of single images with a high resolution in only one direction, but with different orientations.*

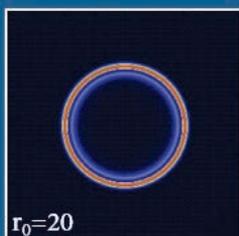
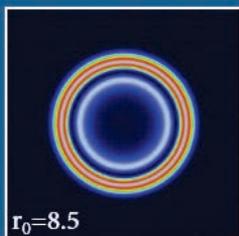
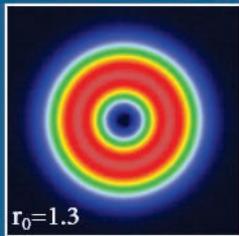
The advantage of this method compared to the classical variant of STED microscopy is that it achieves an identical resolution enhancement using lower laser powers and shorter exposure times. The lower light dose reduces the sample's exposure to laser radiation and therefore relaxes the requirements on the fluorophore's photostability. In turn, this increases the fluorescence photons yield per dye molecule, which is especially beneficial under signal-limited imaging conditions as it allows brighter and better resolved images.

# Optische Nanoskopie

## Optical Nanoscopy

### Ultraschnelles Schalten mit biaxialen Kristallen

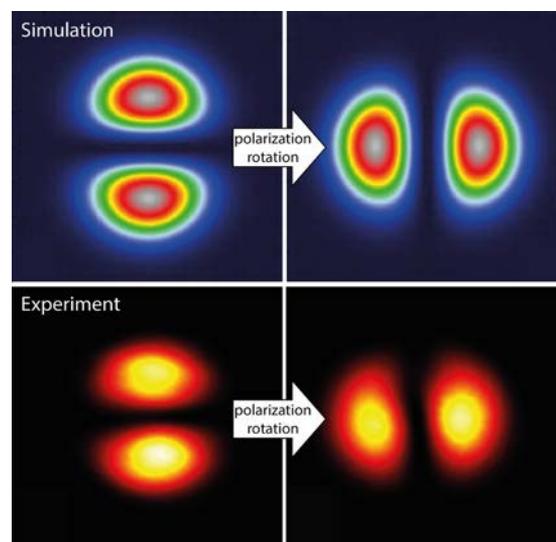
Variation of  $r_0$



Bei der tomoSTED-Mikroskopie wird ein zweidimensional hochaufgelöstes Bild aus mehreren Einzelbildern, die eine hohe Auflösung in jeweils nur einer, aber dafür unterschiedlicher Richtung aufweisen, rekonstruiert. Daher profitiert die tomoSTED-Mikroskopie von einer schnellen, idealerweise pixelweisen Rotation der Orientierung der Abregungsverteilung.

Wir untersuchten den Effekt der konischen Diffraction, der in biaxialen Kristallen auftritt, um geeignete Intensitätsverteilungen zu erzeugen. Für Licht mit einer Ausbreitungsrichtung entlang der optischen Kristallachse kann ein austretender Strahlkegel beobachtet werden. Dessen Intensitätsverteilung hängt von dem Verhältnis der Radien des austretenden und des einfallenden Strahls ( $r_0$ ), von der Distanz  $Z$  von der Fokalebene im Kristall wie auch von der Polarisationsrichtung des einfallenden Strahls ab. Für zunehmende  $r_0$  beispielsweise wird der Intensitätsring relativ zu seinem Durchmesser schmaler. Je nach Distanz  $Z$  entsteht zusätzlich ein zweiter Intensitätsring oder es bildet sich eine Intensitätsspitze im Zentrum aus.

Durch Variation der Parameter in Simulation und Experiment wurde die Intensitätsverteilung derart optimiert, dass bei Verwendung als Abregungsverteilung für die tomoSTED-Mikroskopie die beste Auflösung zu erwarten ist. Für die optimale Wahl der Parameter ist das Profil der Abregungsverteilung identisch mit der auf konventionelle Weise mittels einer Phasenplatte erzeugten 1D-Verteilung. Außerdem ist die Orientierung der Intensitätsverteilung nur von der Polarisation des einfallenden Strahls abhängig und kann daher bei Verwendung elektrooptischer Geräte ultraschnell mit Raten von bis zu mehreren hundert kHz umgeschaltet werden. Dies verbessert die Stabilität des tomoSTED-Mikroskops gegenüber Probenbewegungen und macht es somit zu einem vielversprechenden Kandidaten für Lebendzellmessungen.



◀ Simulierte (oben) und gemessene (unten) Intensitätsverteilungen (nach einem zusätzlichen Polarisator) für lineare Eingangspolarisation und optimierte Parameter. Durch Rotation der Eingangspolarisation kann die Verteilung beliebig gedreht werden.

Simulated (top) and measured (bottom) intensity distributions (after an additional polarizer) for linear polarization of the incident beam and optimized parameters. By rotating the polarization of the incident beam, the pattern can be rotated by any wanted angle.

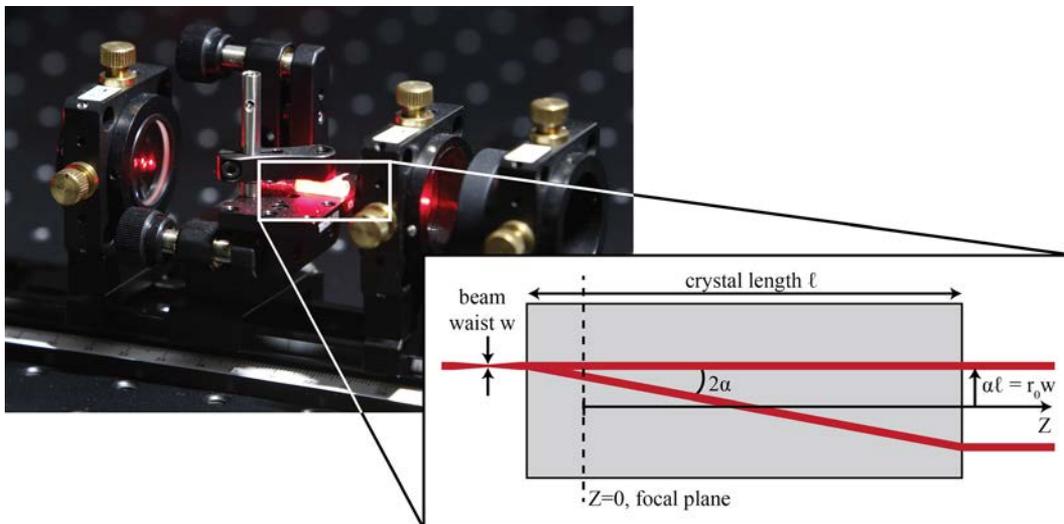
# Optische Nanoskopie

## Optical Nanoscopy

### Ultrafast switching utilizing biaxial crystals

In tomoSTED microscopy, a two-dimensionally resolved image is reconstructed using multiple single images with a high resolution in only one direction, but with different orientations. Thus, it benefits from fast, ideally pixelwise, rotation of the depletion pattern orientation.

For realizing a fast rotation of the depletion pattern, we studied the effect of conical diffraction, which can be observed in biaxial crystals. For light propagating along the crystal optic axis, an emergent ray cone is observed. Its intensity distribution is determined by the ratio between the radius of the emergent and of the incident beam ( $r_0$ ), the distance  $Z$  with respect to the focal plane in the crystal as well as the polarization of the incident beam. For increasing  $r_0$ , for example, the intensity ring becomes narrower relative to its diameter. Depending on the distance  $Z$ , a second intensity ring develops or an intensity spike forms in the center.



▲ Foto eines biaxialen Kristalls, der von einem roten Laser durchstrahlt wird (links). Skizze des divergierenden Strahlkegels, der sich in dem biaxialen Kristall ausbildet, mit Angabe relevanter Größen (rechts).

Photograph of a biaxial crystal which is traversed by a red laser beam (left). Sketch of the divergent ray cone, that forms inside the biaxial crystal, with relevant parameters (right).

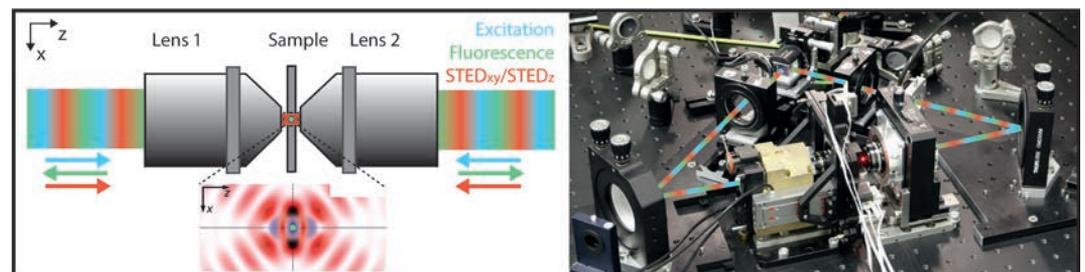
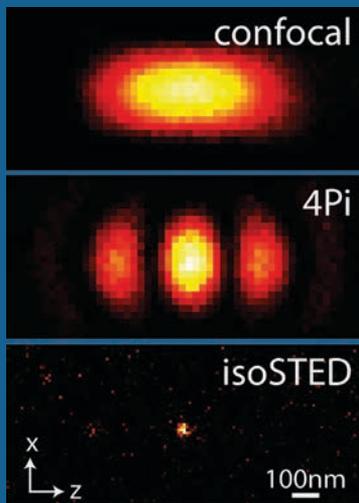
By varying these parameters in both simulations and experiments, the intensity distribution was optimized to yield the best resolution using these depletion patterns for tomoSTED microscopy. It was shown that for the optimal choice of parameters, the profile of the depletion pattern is the same as for a 1D pattern conventionally created by a phase plate. Moreover, the pattern orientation is completely controlled by the polarization of the incident beam and can therefore be switched ultrafast with rates up to several 100 kHz by using electro-optical devices. Ultrafast switching by conical diffraction will improve the tomoSTED microscope's robustness against sample drift and makes it a promising candidate for live-cell imaging.

# Optische Nanoskopie

## Optical Nanoscopy

### Interferenzeffekte ermöglichen isotrope Hochauflösung

Um dreidimensional ausgedehnte Strukturen, beispielsweise Mitochondrien in Zellen, objektgetreu abbilden zu können, ist eine identische Hochauflösung in allen drei Raumrichtungen notwendig. Bei der isoSTED-Mikroskopie werden die 4Pi mit der STED-Mikroskopie kombiniert, um dies zu erreichen. Bereits die gleichzeitige kohärente Verwendung von zwei sich gegenüberstehenden Objektiven (4Pi-Konfiguration) verringert - im Vergleich zum Konfokalmikroskop - die axiale Ausdehnung des Anregungsfokus um einen Faktor von drei bis fünf. Unter Ausnutzung dieses hilfreichen Interferenzeffekts werden im isoSTED-Mikroskop zwei weitere, geschickt gewählte fokale Intensitätsverteilungen generiert: je eine für die weitere Einschränkung des fluoreszierenden Bereichs in lateraler (STED<sub>xy</sub>) und in axialer Richtung (STED<sub>z</sub>). Beide STED-Fokusse haben eine gemeinsame Nullstelle und werden inkohärent mit dem Anregungsfokus überlagert. Der zigarrenförmige, konfokale Lichtfokus wird hierdurch in allen drei Raumrichtungen auf eine Kugel von nur 30 nm Durchmesser verkleinert, was einer Reduzierung des fokalen Volumens um drei Größenordnungen entspricht. Mit der Anregung im 4Pi-Modus geht eine Schonung der Probe einher, da das Volumen, in dem Marker den An- und Abregungszyklus durchlaufen, deutlich reduziert ist.



▲ Zwei Objektive in 4Pi-Konfiguration (links). Ein Anregungsstrahl und zwei STED-Strahlen werden zwischen den Objektiven überlagert und erzeugen einen isoSTED-Fokus in der Probenebene. Experimentelle Umsetzung der 4Pi-Konfiguration mit farblicher Markierung der Strahlwege (rechts).  
*Two objective lenses in 4Pi configuration (left). One excitation and two STED beams are superimposed between the objective lenses and create an isoSTED focus in the sample plane. Experimental implementation of the 4Pi configuration with colored markings of the beam paths (right).*

Mit diesem "3D-Nanoskop" ist es möglich, rein optisch und demzufolge nichtinvasiv beliebige laterale Ebenen mit einer Dicke von 30 nm in einer intakten Zelle zu adressieren. Die Verwendung eines Strahlscanners und eines axialen Piezoscanners erlaubt die schnelle Abrasterung eines großen Bildvolumens. Durch die Verwendung von Wasserimmersionsobjektiven ist das isoSTED-Mikroskop in der Lage, dreidimensionale Proteinverteilungen in lebenden Zellen abzubilden.

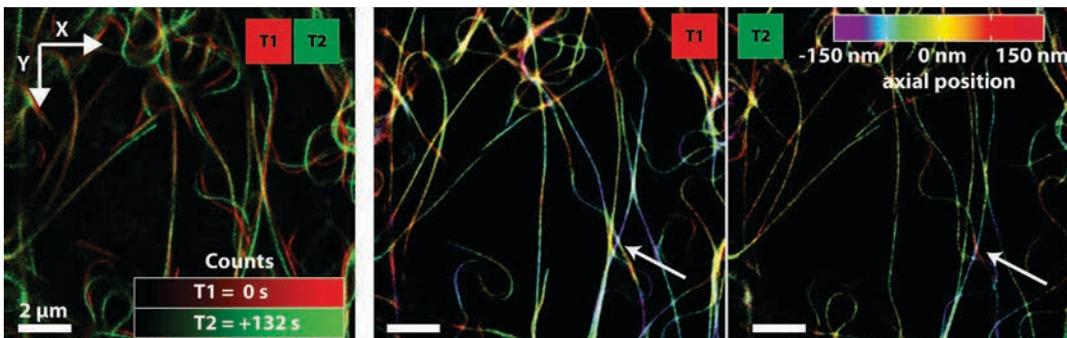
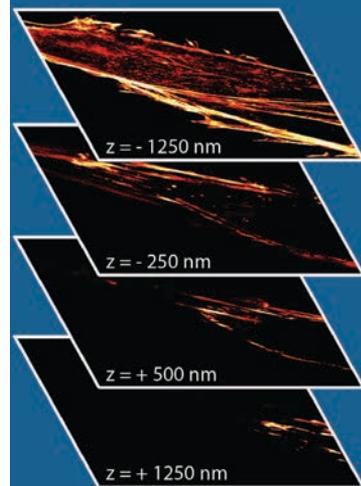
# Optische Nanoskopie

## Optical Nanoscopy

### Interference effects enable isotropic super-resolution

In order to be able to image three-dimensionally extended structures accurately, for example mitochondria in cells, an identical high resolution in all three spatial dimensions is necessary. In isoSTED microscopy, 4Pi microscopy is combined with STED microscopy to achieve this. The coherent use of two opposing objective lenses (4Pi configuration) already reduces the axial dimension of the excitation focus by a factor of 3–5 as compared to the confocal (single lens) implementation. Using this beneficial interference effect, two additional cleverly selected focal intensity distributions are generated in the isoSTED microscope: one each for the further reduction of the fluorescent volume in the lateral (STED<sub>xy</sub>) and the axial (STED<sub>z</sub>) direction. Both STED foci feature a common zero and they are incoherently superposed with the excitation focus. Hereby, the cigar-shaped confocal volume is narrowed down to a sphere of only 30 nm diameter, which corresponds to a reduction of the focal volume by three orders of magnitude. Utilizing the 4Pi configuration for the excitation has the additional benefit of being more sample-conserving than the single lens configuration as only those molecules within the considerably smaller 4Pi focus undergo on-off cycles.

This "3D-nanoscope" renders it possible to address arbitrary 30 nm thick sections within an intact cell in an all-optical and thus non-invasive manner. The incorporation of a beam scanner and an axial high-speed piezo scanner allows fast imaging of large volumes. The use of water immersion lenses enables imaging of three-dimensional protein distributions within living cells.



IsoSTED-Aufnahmen der 3D-Struktur des Mikrotubulinetzwerks in einer lebenden Zelle zum Zeitpunkt T1 und 132 Sekunden später (T2). Links: Die Überlagerung beider Aufnahmen zeigt die laterale Bewegung des Netzwerks. Mitte, rechts: Zu beiden Zeitpunkten ist zudem der axiale Verlauf der Filamente bekannt, welcher hier farbkodiert ist und deutlich zeigt, dass die Filamente in unterschiedlichen Ebenen verlaufen und ihre axiale Position mit der Zeit ändern (Pfeile).

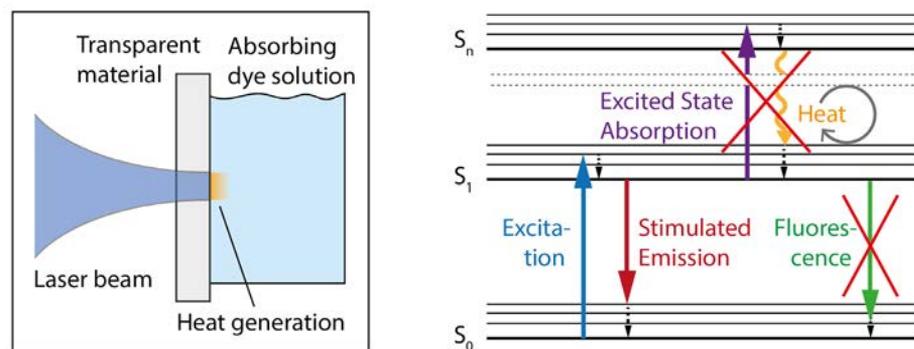
IsoSTED images of the 3D microtubule network in a living cell at time T1 and 132 seconds later (T2). Left: The superposition of both images shows the lateral movement of the network. Center, right: In addition to the lateral information, the axial position at both times is known. Color-coding clearly visualizes that the filaments are running in different planes and that they change their axial position over time (arrows).

# Optische Nanoskopie

## Optical Nanoscopy

### Subtraktives Verfahren zur Nanostrukturierung

In den letzten Jahren hat das direkte Schreiben von Nanostrukturen mit einem fokussierten Laser zunehmend an Bedeutung gewonnen. Da jedoch Licht aufgrund seiner Wellennatur nicht auf einen beliebig kleinen Punkt fokussiert werden kann, ist letztendlich auch die Mindestgröße der zu schreibenden Struktur begrenzt. In der STED-Mikroskopie wird dieses Beugungslimit umgangen, indem Moleküle mit Hilfe der stimulierten Emission am Fluoreszieren gehindert werden und so der fluoreszierende Bereich räumlich eingeschränkt wird. Die Auflösung hängt hier von der verwendeten STED-Laserleistung ab und ist theoretisch unbegrenzt. Das zugrundeliegende Prinzip, molekulare Übergänge optisch zu schalten, lässt sich auch zur räumlichen Eingrenzung von chemischen Reaktionen im Nanometerbereich verwenden. Experimentell wurden bereits Strukturen unterhalb des Beugungslimits geschrieben, indem die Polymerisationsrate eines Photolacks kontrolliert wurde. Jedoch arbeiten die bisher umgesetzten Methoden nur additiv.



Prinzip der laserinduzierten Rückseitenätzung (links) und Jablonski-Diagramm der elektronischen Zustände und Übergänge, die bei der STED-unterstützten Nanostrukturierung beteiligt sind (rechts).

*Principle of laser-induced backside wet etching (left) and Jablonski diagram which shows the electronic states and transitions relevant for STED-assisted nanostructuring (right).*

Wir haben ein neuartiges STED-unterstütztes Verfahren zur Strukturierung transparenter Materialien entwickelt, welches im Gegensatz zu den bisherigen Verfahren subtraktiv arbeitet, also Material in einem einstufigen Prozess direkt abtragen kann. Es basiert auf der Kombination von STED und laserinduziertem Rückseitenätzen (laser-induced backside wet etching, LIBWE). Bei LIBWE wird ein Laserstrahl auf die Grenzfläche zwischen einem transparenten, zu strukturierenden Material und einer hochkonzentrierten Farbstofflösung fokussiert. Dadurch wird in unmittelbarer Nähe der Oberfläche Wärme erzeugt, die schließlich zum Materialabtrag führt. Wir haben gezeigt, dass die Wärmeerzeugung und damit auch die Abtragsrate mit einem zugeschalteten rotverschobenen (STED-)Laser kontrolliert werden kann. Insbesondere lässt sich die Größe des abgetragenen Bereichs mit Hilfe einer eindimensionalen fokalen Intensitätsverteilung deutlich reduzieren. Diese neue Methode zur subtraktiven Materialbearbeitung hat das Potenzial, selbst harte Materialien wie Quarz oder Saphir mit Strukturgrößen deutlich unterhalb des Beugungslimits zu strukturieren.

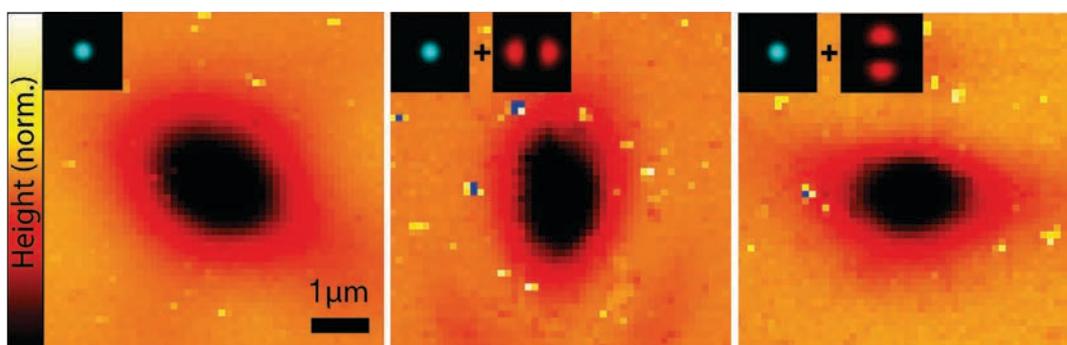
# Optische Nanoskopie

## Optical Nanoscopy

### Subtractive nanostructuring method

In recent years, direct laser writing techniques have gained considerable significance for writing nanostructures. However, since light cannot be focused to an arbitrarily small spot due to its wave nature, the attainable resolution is limited. This diffraction limit has been overcome in STED microscopy by preventing molecules from fluorescing via stimulated emission and thereby reducing the extent of the fluorescing spot. The resolution hereby depends on the applied STED laser power and is theoretically unlimited. The underlying principle of optically switching molecular transitions can also be used to spatially confine chemical reactions on the nanometer scale. This has been experimentally realized for sub-diffraction direct laser writing by controlling the polymerization rate of a photoresist. However, the so far presented STED-inspired writing methods work only additively.

We have developed a novel STED-assisted method for structuring transparent materials that works subtractive; it thus directly ablates the material in a one-step process. It is based on the combination of STED and laser-induced backside wet etching (LIBWE). In LIBWE, a laser beam is focused on the interface of a transparent material to be structured and a highly concentrated dye solution. Thereby, heat is generated in close proximity to the surface, which eventually leads to material ablation. We showed that the heat generation and therefore the ablation rate can be controlled by a red-shifted (STED) laser. Importantly, by using a spatially modulated STED laser focus, the extent of an ablated region can be clearly reduced. This new method has great potential to structure even hard materials like fused silica or sapphire with structure sizes well below the diffraction limit.



▲ Abtrag einer PMMA-Oberfläche ohne (links) und mit STED-Licht (Mitte, rechts). Für beide Ausrichtungen der STED-Mode ist der abgetragene Bereich in der jeweiligen Richtung räumlich deutlich eingeschränkt. Die Einsatzbilder zeigen die jeweils verwendeten fokalen Intensitätsverteilungen (Anregung: cyan, STED: rot).

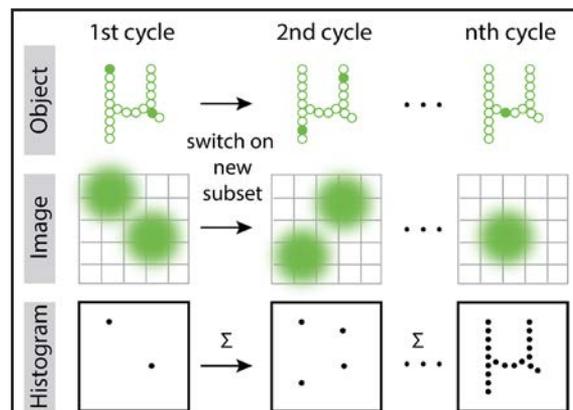
Ablation of a PMMA surface without (left) and with STED light (center, right). For both orientations of the STED mode, the extent of the ablated region is clearly reduced in the respective direction. The insets show the focal intensity distributions used in each case (excitation: cyan, STED: red).

# Optische Nanoskopie

## Optical Nanoscopy

### Einzelmolekülbasierte Methoden der Nanoskopie

Eine zum ensemblebasierten Ansatz komplementäre Methode zur Erhöhung der Auflösung basiert auf dem Schalten von einzelnen, stochastisch ausgewählten Fluorophoren. Im Folgenden werden Methoden dieser Art unter dem Begriff SMS (Single Marker Switching)-Mikroskopie zusammengefasst. Anders als z. B. bei der STED-Mikroskopie werden bei der SMS-Mikroskopie einzelne Marker durch einen Schaltprozess zufällig aus einer Vielzahl von Molekülen, die sich in einem dunklen Zustand befinden, herausgegriffen und in einen hellen, also einen detektierbaren, Zustand überführt. Sind die fluoreszierenden Moleküle hinreichend räumlich getrennt, so lassen sich ihre Positionen präzise aus ihren beugungslimitierten Fluoreszenzbildern bestimmen. Die Lokalisationsgenauigkeit ist hierbei besser als das Beugungslimit und skaliert mit  $\sqrt{N}$ , wobei  $N$  die Anzahl der detektierten Photonen ist. Nachdem diese bereits lokalisierten Moleküle wieder in einen dunklen Zustand überführt worden sind, wird dieser Prozess des Anschaltens, Auslesens und Ausschaltens von zufällig ausgewählten Markern hinreichend oft wiederholt. Das Histogramm aller ermittelten Markerpositionen ergibt dann das hochaufgelöste SMS-Bild.



◀ Prinzip der SMS-Mikroskopie: Untermengen von Markern werden angeschaltet, ausgelesen, ausgeschaltet und lokalisiert. Dieser Vorgang wird genügend oft wiederholt, um das Objekt zu rekonstruieren.  
*Principle of SMS microscopy: Subsets of markers are switched on, read out, switched off and localized. This is repeated until enough marker positions have been registered to reconstruct the object.*

Da bei der SMS-Mikroskopie einzelne Emitter nacheinander aufgenommen werden müssen, liegt die typische Aufnahmezeit für ein hochaufgelöstes Bild im Bereich von mehreren Minuten. In nicht ausreichend temperaturstabilisierten Räumen kann es daher während der Aufnahmezeit zu einer relativen Bewegung zwischen Probe und Objektiv kommen. Dieser Drift verschlechtert die Qualität des hochaufgelösten Bilds deutlich. In Zusammenarbeit mit dem Institut für Mathematische Stochastik der Universität Göttingen wurde aus diesem Grund eine statistisch fundierte sowie robuste Methode zur Bestimmung und Korrektur dieses Drifts erarbeitet. Unsere Methode kommt ohne invasive Probenveränderung, z. B. das Einbringen von Referenzmarkern, aus und ermöglicht zudem, die Güte der Driftkorrektur zu quantifizieren. Obwohl die Methode nur mit den reinen Messdaten arbeitet, sind die erzielten Ergebnisse vergleichbar mit denen von Referenzmarker-basierten Methoden.

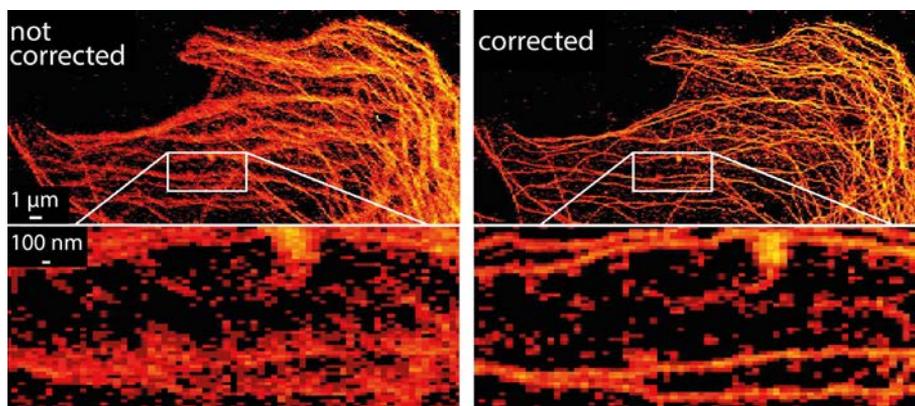
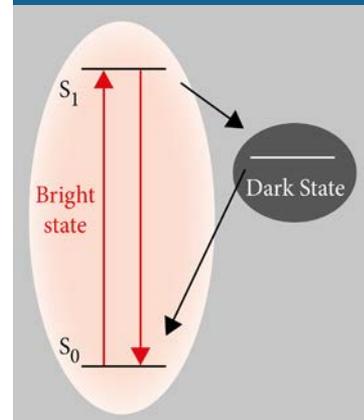
# Optische Nanoskopie

## Optical Nanoscopy

### Single molecule-based nanoscopy methods

Complementing the ensemble-based approach, a method for increasing resolution is based on switching individual, stochastically selected fluorophores. In the following, methods of this kind are summarized under the term SMS (Single Marker Switching) microscopy. In contrast to e. g. STED microscopy, the SMS scheme relies on a stochastic on-switching process, which randomly selects markers from a large number of markers being in a dark state and transfers them to a bright, detectable state. If the fluorescing molecules are sufficiently separated in space, their positions can be precisely determined from their diffraction-limited fluorescence images. Here, the localization precision is better than the diffraction limit and scales with  $\sqrt{N}$ , where  $N$  is the number of detected photons in each spot. After the localized molecules are subsequently transferred to a dark state, this process of switching on, reading out and switching off randomly selected markers is repeated a sufficient number of times. The histogram of all determined marker positions represents the final super-resolved SMS image.

Since emitters are recorded sequentially in SMS microscopy, the typical measurement time for a super-resolved image is in the range of several minutes. In rooms that are not sufficiently temperature-stabilized, a relative movement between sample and objective lens can occur during the recording time. This drift deteriorates the quality of the high resolution image significantly. For this reason, a statistically sound and robust method to detect and correct this drift was developed in cooperation with the Institute for Mathematical Stochastics from Göttingen University. Our method does not require any invasive sample alteration, e. g. insertion of reference markers, and it also allows to quantify the correction quality. Although the method requires only the measurement data, its results are competitive with those of fiducial marker-based methods.



Statistische Driftkorrektur auf experimentellen Daten. Unkorrigiertes (links) und korrigiertes SMS-Bild (rechts) des Mikrotubulinetzwerks in einer fixierten Zelle. Die Ausschnittsvergrößerungen (jeweils unten) zeigen die deutliche Erhöhung der Bildqualität durch die Driftkorrektur.

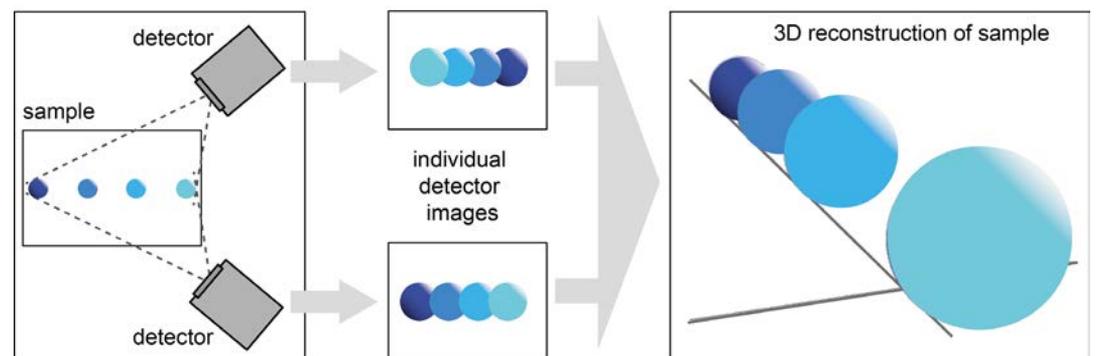
Statistical drift correction on experimental data. Uncorrected (left) and corrected SMS image (right) of the microtubule network in a fixed cell. The detail enlargements (below) show the significant increase in image quality due to drift correction.

# Optische Nanoskopie

## Optical Nanoscopy

### Isotrope Auflösung in einem großen axialen Bereich

Um dreidimensionale Strukturen, z. B. subzelluläre Komponenten, in allen Raumrichtungen gleich gut abbilden zu können, ist eine isotrope Auflösung notwendig. Die Auflösung eines Mikroskops ist in der Regel jedoch in axialer Richtung dreimal geringer als in lateraler Richtung. Dieses Missverhältnis kann umgangen werden, indem beispielsweise zwei gegenüberstehende Objektive kohärent verwendet werden. Hierdurch wird eine dreidimensionale Auflösung von 30 nm oder besser erzielt. Jedoch ist das Volumen, innerhalb dessen Fluorophore lokalisiert werden können, aufgrund der geringen Tiefenschärfe der Objektive auf dünne Bereiche von ca. 1  $\mu\text{m}$  Stärke beschränkt. Proben müssen folglich axial abgerastert werden, wenn es gilt, dickere Bereiche abzubilden.



▲ Prinzip der Stereoskopie: Eine dreidimensionale Probe wird aus zwei unterschiedlichen Blickrichtungen detektiert. Aus den zwei zweidimensionalen Ansichten der Probe lässt sich eine dreidimensionale Darstellung rekonstruieren.

*Principle of stereoscopy: A three-dimensional sample is detected from two different viewing angles. The two two-dimensional images can be used to reconstruct a three-dimensional representation.*

Wir haben aus diesem Grund eine neue Methode zur hochauflösten dreidimensionalen Abbildung axial ausgedehnter Bereiche entwickelt. Unser 3D-SMS-Mikroskop beruht auf dem Prinzip der Stereoskopie und verfügt über vier niedrignumerische Objektive in einer tetraederähnlichen Anordnung. Die Probe wird hierbei gleichzeitig aus vier Blickwinkeln beobachtet, wodurch hochauflöste 3D-Bilder in einem axial ausgedehnten Volumen ohne Rastern der Probe gewonnen werden. Die Bildqualität profitiert signifikant davon, dass der ausgenutzte Raumwinkel im Vergleich zur Detektion durch ein einzelnes, hochnumerisches Objektiv deutlich größer ist. Mit unserem Mikroskop können nicht nur fluoreszenzmarkierte Zellen aufgenommen, sondern auch die Bewegung einzelner Fluoreszenzmarker verfolgt werden. Aus Trajektorien lassen sich hierbei Diffusionskonstanten ermitteln, aus denen z. B. auf die Größe der Teilchen oder die Viskosität des umgebenden Mediums geschlossen werden kann.

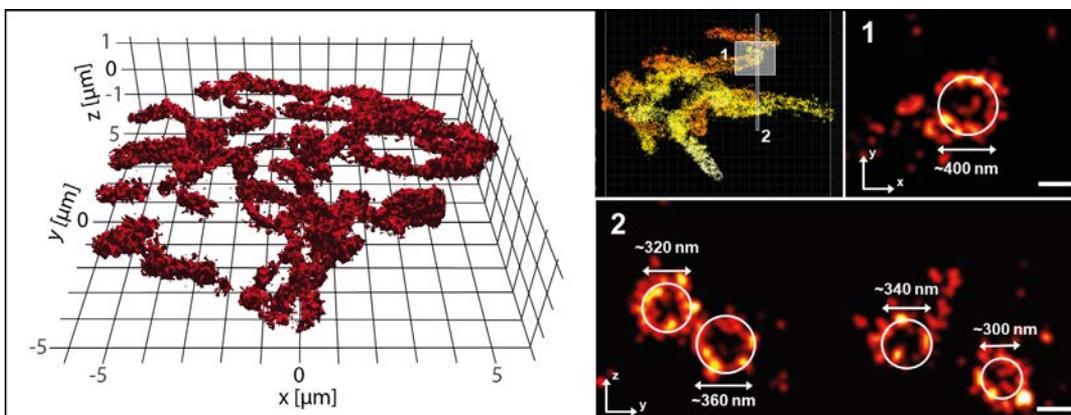
# Optische Nanoskopie

## Optical Nanoscopy

### Isotropic resolution over large axial range

In order to map three-dimensional structures, for example subcellular components, equally well in all spatial directions, an isotropic resolution is needed. However, the resolution of a microscope is usually three times worse in the axial direction than in the lateral direction. This asymmetry can be overcome by using two opposing objective lenses coherently, whereby a three-dimensional resolution of 30 nm or better is achieved. However, the volume in which fluorophores can be localized is limited to thin layers of approximately 1  $\mu\text{m}$  thickness because of the low depth of focus of the used objective lenses. Samples must therefore be scanned axially if thicker regions are to be imaged.

We have therefore developed a new method for high-resolution three-dimensional imaging of axially extended regions. Our 3D SMS microscope is based on the stereo view principle and features four objective lenses with low numerical aperture (NA) that are oriented in a tetrahedron-like shape. The sample is observed simultaneously from four angles, whereby super-resolved 3D images are obtained within an axially extended volume without scanning. The image quality benefits from the significantly enhanced solid angle as compared to detection through a single standard high NA lens. Our system allows not only to image fluorescently labeled cells, but also permits tracking of individual fluorescent marker molecules. By analyzing trajectories, diffusion coefficients can be determined, which give information, for example, about the size of the markers or the viscosity of the surrounding medium.



▲  
Links: Die 3D-Ansicht von Mitochondrien in einer HeLa-Zelle zeigt die isotrope Auflösung des 3D-SMS-Mikroskops über einen großen axialen Bereich. Rechts: Querschnitte einzelner Mitochondrien. Maßstab: 250 nm.  
Left: The 3D view of mitochondria in a HeLa cell shows the isotropic resolution of the 3D SMS microscope over a large axial range. Right: Cross-sections of single mitochondria. Scale bar: 250 nm.

# Optische Nanoskopie

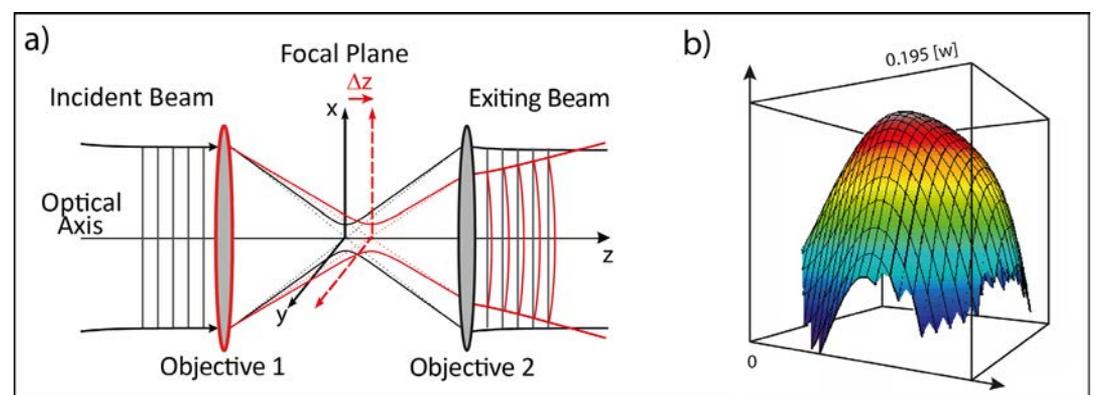
## Optical Nanoscopy

### Analyse von laserinduzierten Aberrationen in Mikroskopobjektiven

Hochauflösende Mikroskopie ermöglicht Aufnahmen von fixierten und lebenden Proben mit einer bisher unerreichten Detailgenauigkeit. Die im Vergleich zur konventionellen Mikroskopie deutlich verbesserte Auflösung macht sie jedoch anfälliger für Aberrationen, die die Bildqualität erheblich beeinträchtigen können. Da in der optischen Nanoskopie deutlich höhere Laserleistungen benötigt werden als in der Konfokal- und Weitfeldmikroskopie, untersuchten wir den Einfluss der Laserleistung auf die Abbildungsqualität des Mikroskops. Zu diesem Zweck analysierten wir laserinduzierte Wellenfrontaberrationen in Objektiven für verschiedene nanoskopische Beleuchtungsschemata.

Ein Laserstrahl mit niedriger Intensität und ebener Wellenfront wurde von einer Objektivlinse fokussiert und von einer zweiten Linse gesammelt. Die Austrittspupille des Sammelobjektivs wurde auf einen Hartmann-Shack-Wellenfrontsensor abgebildet, um die Laserwellenfront zu charakterisieren. Das Linsenpaar konnte dann von einem zweiten Laser (Nanoskopielaser), der eine Leistung von bis zu 400 mW hatte und vor dem Sensor geblockt wurde, beleuchtet werden.

Bei Beleuchtung mit dem Nanoskopielaser nahmen die Aberrationen zu, wobei der dominierende Effekt hierbei die Defokussierung war. Die maximale Amplitude dieser Aberration war proportional zur angewandten Nanoskopielaserleistung und wurde nach Einschalten des Lasers mit einer Zeitkonstante in der Größenordnung von mehreren Minuten erreicht. Daraus folgt, dass Laserleistungen, die typischerweise in der optischen Nanoskopie eingesetzt werden, bei der Bildaufnahme Defokussierungen bis zu mehreren hundert nm verursachen. Wir zeigten außerdem, dass die Defokus-Amplitude proportional zur Temperatur an der Oberfläche des Objektivs ist und dass ihr zeitliches Verhalten gut durch die Wärmeübertragungsgleichung von thermisch dünnen Körpern beschrieben werden kann. Wir kamen daher zu dem Schluss, dass die Defokussierung durch die thermische Ausdehnung des Objektivs induziert wird und durch eine Temperaturstabilisierung kompensiert werden kann.



a) Experimentelle Umsetzung der Wellenfrontmessung. Ein axial verschobener Fokus führt zu einer defokussierten Wellenfront (rot). b) Beispiel einer defokussierten Wellenfront.

a) Experimental implementation of wavefront measurement. An axially-shifted focus results in a defocused wavefront (red). b) Example of a defocused wavefront.

# Optische Nanoskopie

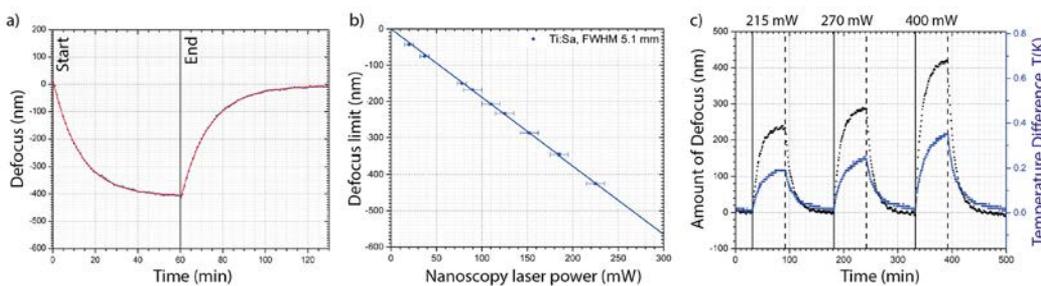
## Optical Nanoscopy

### Analysis of laser-induced aberrations in objective lenses

Super-resolution microscopy allows imaging in fixed and living samples with unprecedented detail level. However, its greatly improved resolution compared to conventional microscopy renders it more susceptible to aberrations, which can severely impair the image quality. Since significantly higher laser powers are needed in optical nanoscopy than in confocal and widefield microscopy, we investigated the influence of the laser power on the imaging quality of the microscope. For this purpose, we analyzed laser-induced wavefront aberrations in objective lenses for different nanoscopy illumination schemes.

A low-intensity probe laser beam with a plane wavefront was focused by an objective lens and collected by a second lens. The back pupil of the collecting lens was imaged onto a Hartmann-Shack wavefront sensor in order to characterize the laser's wavefront. The objective lens pair could then be illuminated by a second laser beam (nanoscopy laser) with tunable power up to 400 mW, which was blocked before the sensor.

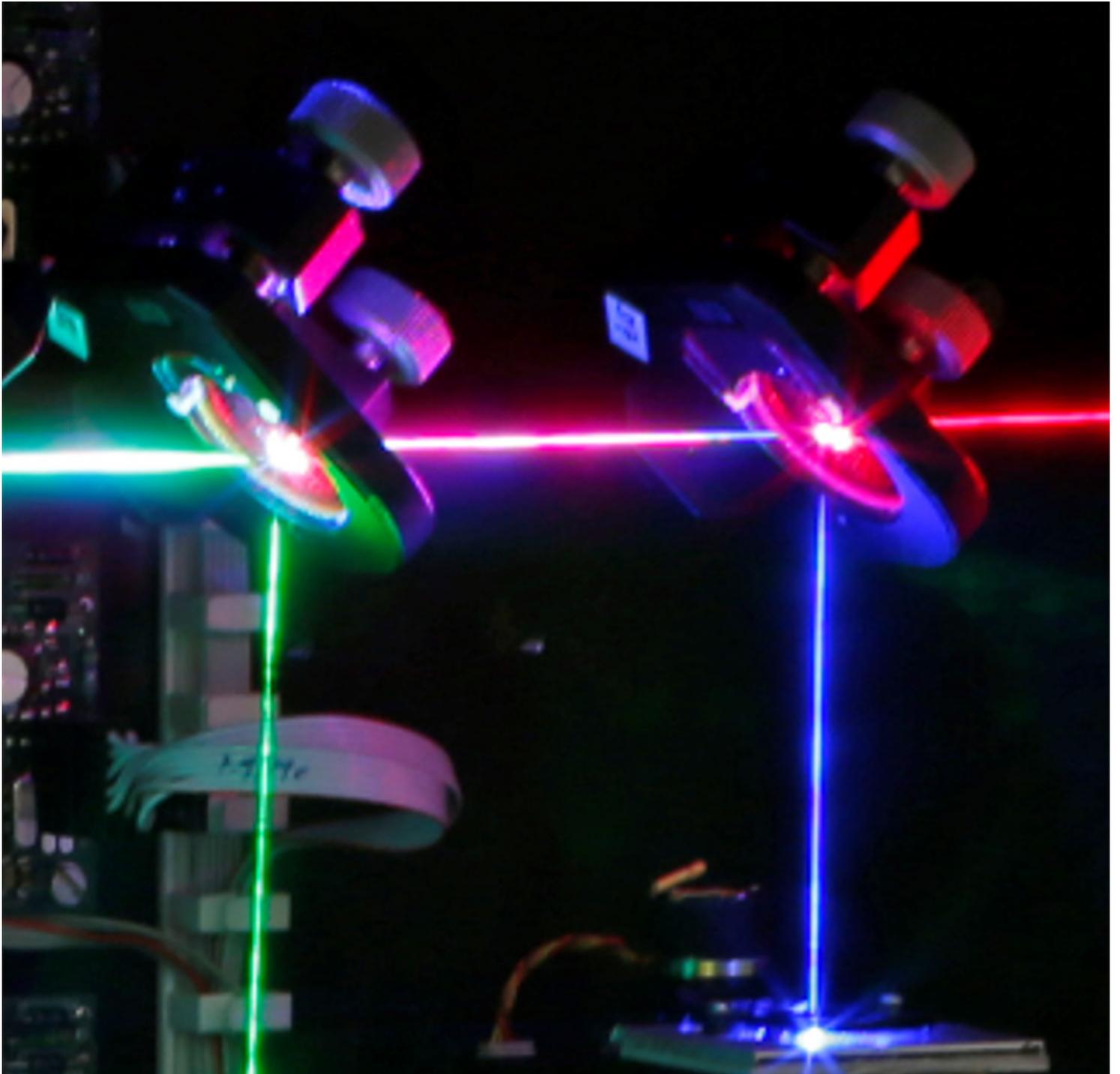
Upon illumination with the nanoscopy laser, the aberrations increase, highly dominated by the defocus aberration. The maximum amplitude of this aberration was proportional to the applied nanoscopy laser power and was reached with a time constant in the order of several minutes after switching on the laser. It follows that laser powers that are typically used in optical nanoscopy imaging schemes introduce up to several 100 nm defocus during image acquisition. We further showed that the defocus amplitude is proportional to the temperature at the objective lens surface and that its time-dependent behavior can be well described by the heat transfer equation of thermal thin bodies. We therefore concluded that the defocus is induced by thermal expansion of the objective lens and that it may be compensated by temperature stabilization.



- ▲
- a) Zeitliches Verhalten der Defokus-Amplitude während und nach der Beleuchtung mit dem Nanoskopielaser.
  - b) Die maximale Amplitude konvergiert bis zu einem Grenzwert, der proportional zur angelegten Laserleistung ist.
  - c) Die Defokus-Amplitude steht in direktem Zusammenhang mit der Temperaturänderung an der Objektivoberfläche.

- a) Time-dependent behavior of the defocus amplitude during and after nanoscopy laser illumination.
- b) The maximum amplitude converges to a limit that is proportional to the applied laser power.
- c) The defocus amplitude is directly related to the temperature change at the objective lens' surface.

Berichte aus der Abteilung  
Departmental Reports



# Kurze Pulse / Nanostrukturen

## Short Pulses / Nanostructures

Mikro- und nanostrukturierte Oberflächen haben vielfältige Einsatzmöglichkeiten in mikrofluidischen, tribologischen, medizintechnischen oder optischen Anwendungen. Laserablation und Lasermodifikation stellen flexible und hocheffiziente Verfahren zu deren Herstellung dar. Mittels Maskenprojektion oder Interferenzverfahren wird bei geeigneter Laserwellenlänge und Pulsdauer Sub- $\mu\text{m}$ -Präzision erreicht. Strukturdetails mit Abmessungen im Bereich von 50 nm sind realisierbar. Dabei gewinnt der Einsatz ultrakurzer Pulse in immer mehr Anwendungsgebieten zunehmend an Bedeutung. Mittlerweile sind kompakte, industrietaugliche Ultrakurzpulslaser verfügbar. Für die Effizienzsteigerung in bestehenden und für die Erschließung neuer Anwendungen ist die Weiterentwicklung ultrakurzpulsbasierter Techniken unabdingbar. Dabei stehen die Erzeugung leistungsstarker ultrakurzer Pulse sowie die Erzeugung periodischer Nanostrukturen auf technischen Oberflächen im Mittelpunkt.

Aktuelle Themen sind die Erzeugung leistungsstarker ultrakurzer Pulse mit gasgefüllten Hohlwellenleitern, die fälschungssichere Markierung von Glasoberflächen mit UV-Pulsen, die Verwendung dynamischer Strahlformungselemente für die Erzeugung computergenerierter Hologramme (CGH) auf Werkstoffoberflächen und die grundlegende Untersuchung der Dynamik 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 give rise to numerous functionalities for fluidic, tribological, medical or optical applications. Laser ablation and surface modification are enabling technologies for their flexible and economic fabrication. Beam delivery concepts like mask projection and interference methods allow sub- $\mu\text{m}$  precision, if laser wavelength and pulse duration are suitably selected. The fabrication of structural details of the order of 50 nm is possible.

In this field, ultrashort laser pulses are gaining a rapidly increasing importance for a range of emerging applications. Recently, compact, industrial-scale short pulse laser systems are commercially available. For a 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 hollow fibers, anti-fraud marking of glass surfaces by UV pulses, efficient fabrication of computer generated holograms (CGH) on material surfaces by dynamic beam shaping elements, and the study of the ablation dynamics of solid surfaces 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.



**Dr. Peter Simon**  
Abteilungsleiter

☎ +49-(0) 551/5035-21  
☎ +49-(0) 551/5035-99  
✉ peter.simon@llg-ev.de

**Ansprechpartner**  
für Nanostruktur-  
technologie:  
**Dr. Jürgen Ihlemann**

**Mitarbeiter**  
Staff members

Clemens Beckmann  
Andreas Blumenstein  
Frederick Kleinwort  
Jan-Hendrik Klein-Wiele  
Dr. Jörg Meinertz  
Jens Oltmanns  
Lukas Janos Richter  
Till Schröder

# Kurze Pulse / Nanostrukturen

## Short Pulses / Nanostructures

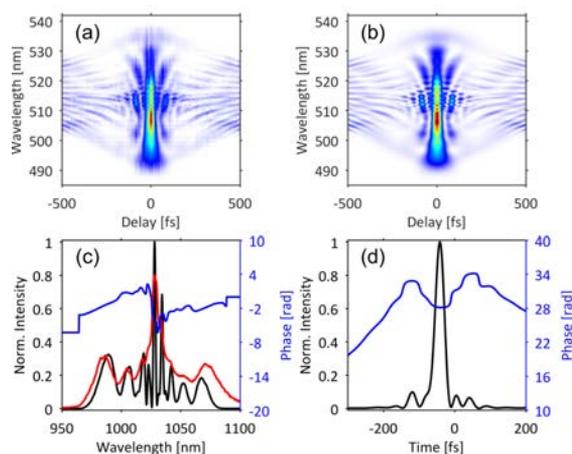
### Kompression von Pikosekundenpulsen mit gestreckten flexiblen Hohlfasern

In den vergangenen Jahren haben wir gezeigt, dass die von uns entwickelte Technologie auf Basis gestreckter flexibler Hohlfasern Rekordergebnisse bei der Kompression von Multi-Millijoule Pulsen auf kürzeste Pulsdauern (wenige optische Zyklen) liefert.

In einer aktuellen Studie in Zusammenarbeit mit Forschern aus dem Max-Planck-Institut für Quantenoptik (Garching) und dem Max-Born-Institut (Berlin) haben wir die Eignung der Technologie für die Kompression von Pikosekundenpulsen gezeigt.

Es gibt einen steigenden Bedarf an Laserquellen, die ultrakurze Pulse (Sub-30 fs) bei hoher Wiederholrate und mittlerer Leistung bereitstellen. Mit solchen Pulsen kann ein breites Anwendungsfeld von der Terahertz-Technologie bis hin zur Erzeugung ultraschneller Elektronenpulse bedient werden. Derartige Lasersysteme verwenden immer häufiger ytterbiumbasierte Lasermedien, da diese mit hohem Wirkungsgrad direkt durch Dioden gepumpt werden können. Neben den großen Vorteilen solcher Systeme ist deren eingeschränkte Bandbreite jedoch nachteilig. Abhilfe hierfür kann ein nachgeschalteter Pulskompressor schaffen.

Um die Kompression von Pikosekundenpulsen eines Scheibenlasers mit ytterbiumbasiertem Lasermedium mit unserer Hohlfaser zu testen, wurden verstärkte Pulse aus einem Yb:YAG mit einer Dauer von ca. 1 ps bei der Wellenlänge 1030 nm mit einer mittleren Leistung von 15 W spektral verbreitert. Hierzu wurde eine zweistufige Pulskompressionsanordnung realisiert. In der ersten Stufe erfolgte die spektrale Verbreiterung in einem BBO-Kristall. Die Pulse wurden dann mit einem Gitterkompressor auf eine Dauer von ca. 400 fs komprimiert. Anschließend wurden die Pulse in eine 2,66 m lange gestreckte Hohlfaser mit einem Innendurchmesser von 320  $\mu\text{m}$  geleitet. Um eine hinreichend große Selbstphasenmodulation (SPM) bei der moderaten Pulsenergie von ca. 200  $\mu\text{J}$  zu erreichen, wurde die Hohlfaser mit Xenon bis zu einem Druck von 4 bar gefüllt (Abbildung 1). Die so gewonnenen Pulse wurden dann in einem Kompressor, bestehend aus geschichteten Spiegeln, komprimiert. Die komprimierten Pulse haben eine Pulsdauer von 30 fs und eine Spitzenleistung von 1,5 GW erreicht. Solche Pulse können ideal für die Erzeugung von Terahertz-Strahlung verwendet werden.



◀ Gemessene (a) und zurückgerechnete (b) FROG-Daten der komprimierten Pulse. Die zurückgerechnete spektrale (c) und zeitliche Pulsform (d) sowie das gemessene Spektrum (rote Linie in (c)) sind ebenso gezeigt.

FROG measurement of compressed pulses. Besides the recorded (a) and retrieved (b) traces, the spectral intensity and phase (c) as well as the temporal pulse shape and phase (d) are shown. The red line in (c) shows the measured spectrum.

# Kurze Pulse / Nanostrukturen

## Short Pulses / Nanostructures

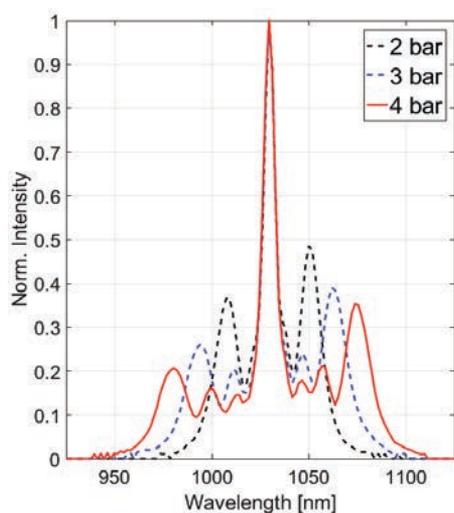
### Compression of picosecond pulses with stretched flexible hollow fibers

In the previous years, we demonstrated the unprecedented capability of our stretched flexible hollow fiber technology for the compression of multi-millijoule pulses down to durations in the few-cycle regime.

In a recent study in collaboration with researchers from the Max Plank Institute for Quantum Optics in Garching and the Max Born Institute in Berlin, we investigated the feasibility of our technology for the compression of picosecond pulses.

There is a growing interest in high-average-power, high-repetition-rate, sub-30 fs lasers for a broad range of applications, e.g. terahertz technology or ultrashort electron pulse generation. The laser systems for such applications are mainly based on Ytterbium-doped solid-state materials, which can be very efficiently pumped by high-power laser diodes. Besides their great advantages, these systems suffer from a limited spectral bandwidth resulting in correspondingly longer pulses. Therefore, the implementation of post-compression techniques are required to reach ultrashort pulse durations demanded by many applications.

For the spectral broadening of 1 ps long pulses of a thin-disk laser amplifier running at 1030 nm with 15 W average power, we applied a hybrid cascaded approach involving a BBO-based pre-compressor and a long hollow fiber. In the first stage, a second-order nonlinearity beta-barium borate crystal (BBO) is applied for spectral broadening, followed by a grating compressor. In this compact arrangement, a compressed pulse duration of  $\sim 400$  fs was achieved. Finally, the compressed pulses at 10 W average power level (200 mJ) from the BBO stage were launched into a 2.66 m long hollow fiber of 320  $\mu\text{m}$  inner diameter filled with xenon gas. Figure 1 shows three typical spectra recorded at 2, 3 and 4 bar pressure, respectively. These pulses were eventually compressed by chirped mirrors down to a pulse duration of 30 fs thus having a peak power of 1.5 GW. Such pulses can be ideally used for the generation of terahertz radiation.



◀ Abbildung 1.: Spektrale Verbreiterung der Pulse in einer Hohl-faser gefüllt mit 2, 3 und 4 bar Xe.  
Figure 1: Spectral broadening in the Xe-filled hollow fiber recorded at 2, 3 and 4 bar pressure, respectively.



# Kurze Pulse / Nanostrukturen

## Short Pulses / Nanostructures

### Glasmarkierung mit „Fingerprint“-Merkmal

Diffraktive Merkmale oder holographische Sicherheitsmarkierungen sind in Form von metallisierten Folien, welche auf Oberflächen aufgeklebt werden, zur Kennzeichnung von Originalteilen und als besonderes Designmerkmal auf Produkten und Verpackungen fest etabliert.

In dem vom BMWi geförderten ZIM-Projekt „GLASIDEE: Glasmarkierung mit LAser als Sicherheits-, Identifikations- und DEsign-Element“ werden solche diffraktiven Markierungen direkt auf verschiedene Gläser geschrieben. Dies hat den Vorteil, dass keinerlei Fremdmaterialien verwendet werden und die Markierung zudem untrennbar mit dem Werkstück verbunden ist. Dadurch erhöht sich die Fälschungssicherheit und die Rückverfolgbarkeit zahlreicher Glasprodukte, wie z.B. pharmazeutische Gläser, Glas in der Automobilindustrie oder Uhren, u.v.m. wird ermöglicht.

Das LLG entwickelt innerhalb des Kooperationsprojektes die Erzeugung kleiner Markierungen (ca. 1 mm<sup>2</sup>) als nicht fälschbare Sicherheitsmerkmale, wobei das Beschriftungsverfahren auf dem LBIA (Laser beam interference ablation)-Prinzip zur Erzeugung periodischer Mikrostrukturen aufbaut, welches um die entscheidende „Fingerabdruck“-Qualität erweitert wird.

Als Laserquelle wurde ein Nanosekunden-Excimerlaser eingesetzt mit einer Wellenlänge von 193 nm und Einzelpulsenergie von bis zu 10 mJ bei einer Repetitionsrate von 1 kHz. Die diffraktive Beschriftung erfolgte durch die Abbildung einer Phasenmaske auf die Werkstückoberfläche. Um die für die Ablation von Glas nötige Energiedichte zu erreichen, wurde die Maske über einen eindimensionalen Scanner abschnittsweise ausgeleuchtet. Da die Einwirkzone des Lasers gering ist (<1µm), bleibt das Glas frei von Mikrorissen oder Schädigungen. Die Beschriftung erfolgt zudem extrem schnell (<1 Sekunde für Fälschungssicherheit) und ist damit effizient und kostengünstig.

Schematischer Aufbau der Beschriftungsanlage zur Erzeugung des „Fingerprint“-Merkmals auf Glas: Eine Phasenmaske wird mit einem eindimensionalen Scanner mit dem Laser ausgeleuchtet und über ein Objektiv auf das Glaswerkstück abgebildet. Die streng periodischen Linien werden dabei durch eine Phasenstörung zufällig gestört. ►

*Schematic setup of the labeling system for generating the "fingerprint" feature on glass: A phase mask is illuminated with a laser by a one-dimensional scanner and imaged onto the glass workpiece via an objective. The strictly periodic lines are randomly disturbed by a phase perturbation.*

Mit der Abbildung der Phasenmaske wurden zunächst streng periodische Linien erzeugt, welche eine diffraktive Wirkung bei Beleuchtung mit sichtbarem Licht zeigen. Um hieraus ein einzigartiges „Fingerprint“-Merkmal zu erzeugen, wird eine zufällige Phasenstörung eingebracht, die das Linienmuster jeder Markierung einzigartig verzerrt. Derzeit werden verschiedenen Möglichkeiten zur Störung getestet, wobei die Grundperiode der Linien erhalten bleibt, was nicht nur für den optisch visuellen Effekt wichtig ist, sondern auch für das spätere Auslesen der Markierung. Hierzu wird am LLG im Rahmen des Projekts ein laserbasiertes Auslesegerät entwickelt, welches die Markierungen erfassen und eindeutig wiedererkennen soll, damit die Echtheit der Markierungen später überprüft werden kann.

# Kurze Pulse / Nanostrukturen

## Short Pulses / Nanostructures

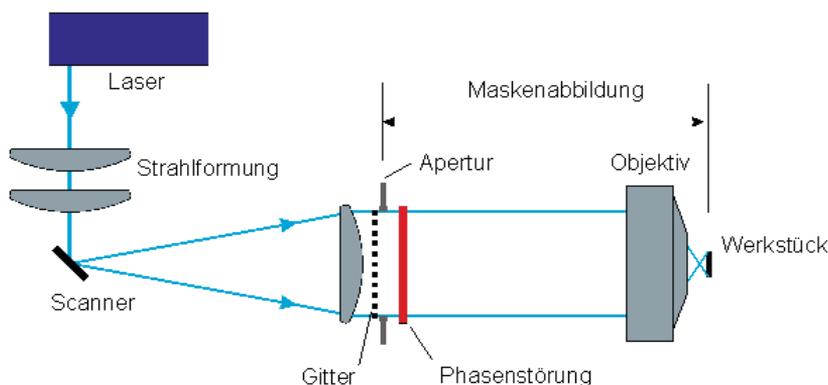
### Glass marking with "fingerprint" feature

Diffractive features or holographic security markings are firmly established in the form of metallized films which are adhered to surfaces for the marking of original parts and as a special design feature on products and packaging.

In the ZIM project "GLASIDEE: Glass Marking with LASer as Security, Identification and DEsign Element" founded by the BMWi, such diffractive markings are written directly onto different glasses. This has the advantage that no foreign materials are used and the marking is also inseparably connected to the workpiece. This increases the security against counterfeiting and enables the traceability of numerous glass products, e.g. pharmaceutical glasses, glass in the automobile industry, watches, and much more.

Within the cooperation project, the LLG is developing the creation of small markings (about 1 mm<sup>2</sup>) as unforgeable security features. The labeling procedure is based on the LBIA (laser beam interference ablation) principle for the generation of periodic microstructures, which is enhanced by the decisive "fingerprint" quality.

The laser source used was a nanosecond excimer laser with a wavelength of 193 nm and a single pulse energy of up to 10 mJ at a repetition rate of 1 kHz. The diffractive labeling was done by imaging a phase mask onto the workpiece surface. In order to achieve the necessary energy density for the ablation of glass, the mask was illuminated in sections via a one-dimensional scanner. Since the processing depth of the laser is low (<1 μm), the glass remains free from microcracks or damage. The labeling is also extremely fast (<1 second for counterfeit security) and is thus efficient and cost-effective.



With the imaging of the phase mask, at first strict periodic lines were generated showing a diffractive effect when illuminated with visible light. In order to create the unique "fingerprint" feature, a random phase perturbation is introduced that uniquely distorts the line pattern of each marking. Currently, various possibilities for the perturbation are tested, while maintaining the basic period of the lines, which is important not only for the visual effect, but also for the later reading of the marking. For this purpose, a laser-based read-out device is being developed at the LLG within the scope of the project, which will detect the markings and clearly recognize them so that the authenticity of the markings can be checked later.

# Kurze Pulse / Nanostrukturen

## Short Pulses / Nanostructures

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

Gefälschte Produkte und Originalteile stellen nach wie vor ein großes Problem für Wirtschaft und Gesellschaft dar. Neben jährlichen Kosten in Milliardenhöhe bergen Produktfälschungen auch erhebliche gesundheitliche Risiken, wenn gefälschte Pharmazeutika, Medizinprodukte (z.B. Implantate) und sicherheitsrelevante Ersatzteile unkontrollierbar in Umlauf gebracht und eingesetzt werden. Besonders hinsichtlich der exakten Nachverfolgbarkeit sicherheitsrelevanter Produkte, vor allem in der Medizintechnik, werden vom Gesetzgeber zunehmend härtere Bestimmungen erlassen. Gefordert wird inzwischen eine lückenlose Rückverfolgbarkeit jedes einzelnen Produkts, so dass sich zweifelsfrei ermitteln lässt, wann und wie das konkrete Produkt hergestellt wurde. Gefragt sind daher individualisierbare Markierungen, die sowohl einen hohen Fälschungsschutz gewährleisten als auch maschinell ausgelesen werden können. Zudem ist es vorteilhaft, wenn das Vorhandensein der Markierung zwar erkannt, die enthaltenen Informationen aber verdeckt enthalten sind und nur mit einem geeigneten, möglichst einfachen Lesegerät ausgelesen werden können.

Hier bieten auf der Produktoberfläche direkt geschriebene computergenerierte Hologramme (CGH) besonders gute Möglichkeiten, da sie zum einen nur schwer zu fälschen sind und zum anderen umfangreiche verdeckte Informationen enthalten können, die nur bei Beleuchtung mit einer geeigneten kohärenten Lichtquelle ausgelesen werden können.

Information



Calculated CGH

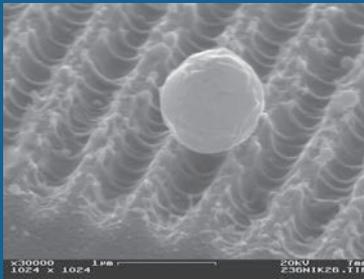


▲  
Abb. 1: Beispiel für ein binäres CGH das aus dem Eingangsbild berechnet wurde.  
Fig. 1: Example for a binary CGH calculated from an input image.



# Kurze Pulse / Nanostrukturen

## Short Pulses / Nanostructures



Ziel eines vom BMWi geförderten Kooperationsprojektes ist daher die Entwicklung einer Beschriftungstechnologie, mit der sich CGH auf Metallen und Halbleitern direkt und für jedes Werkstück individualisierbar mit hoher Qualität und mit industrietauglicher Geschwindigkeit schreiben lassen.

Solche CGH bestehen aus einer Anordnung binärer, oder mehrstufiger Pixel, die bei kohärenter Beleuchtung das Beleuchtungslicht in der Fourierebene einer fokussierenden Optik in ein reales lesbares Bild umwandeln. Die entsprechende Pixelverteilung wird zunächst aus dem Ausgangsbild (der Information) mit einem dazu optimierten Algorithmus berechnet (Abb. 1) und anschließend mittels direkter Laserablation auf der Werkstückoberfläche geschrieben (Abb. 2).

Dazu wird ein schneller Laserscanner mit einer hochauflösenden Abbildungsoptik kombiniert, die die Pixel eines schaltbaren zweidimensionalen Phasenelementes auf die Werkstofffläche abbildet. Da die angestrebte Pixelgröße hier im  $\mu\text{m}$ -Bereich liegen soll und zudem sehr präzise Ablationsraten von wenigen 10 nm gefordert werden, ist die Konstruktion einer speziellen Abbildungsoptik, sowie die Verwendung eines Kurzpulslasers notwendig. Bisher konnte eine Pixelgröße von 4  $\mu\text{m}$  erreicht werden, wie in Abb. 3 am Beispiel eines Testmusters gezeigt. Diese soll zum Projektende auf 1-2  $\mu\text{m}$  reduziert werden. Mit dieser Technologie soll es möglich sein, CGH mit einer Größe im  $\text{mm}^2$ -Bereich in ca. einer Sekunde direkt auf der Oberfläche eines Bauteils schreiben zu können, wobei das CGH für jedes Bauteil unterschiedlich sein kann. Das Auslesen der Information erfolgt anschließend durch Beleuchtung mit einer kohärenten Lichtquelle (z.B. einem Laserpointer). Die Ausgangsinformation erscheint dann als reales lesbares Bild im Fokus einer Optik und kann auf einem Schirm beobachtet, oder mit einer Kamera ausgelesen werden (Abb. 4).

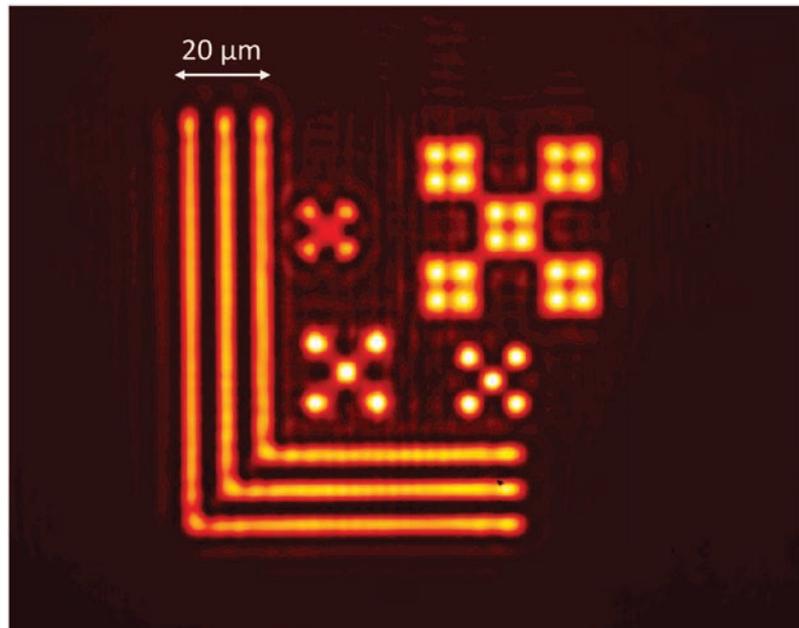


Abb. 3: Testbild in der Bildebene der Abbildungsoptik mit der aktuell erreichten Auflösung von 4  $\mu\text{m}$  pro Pixel.

Fig. 3: Test image in the image plane of the imaging optics with the currently achieved resolution of 4  $\mu\text{m}$  per pixel.

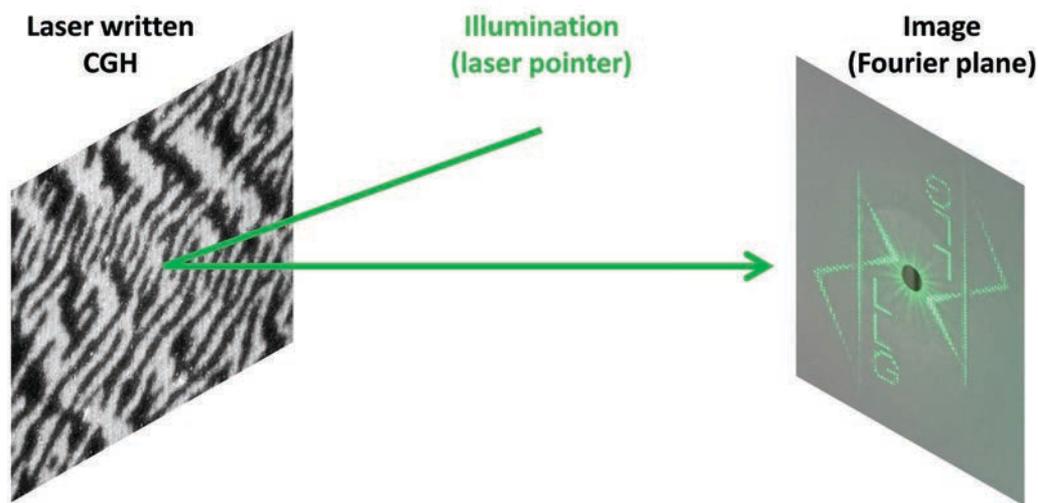
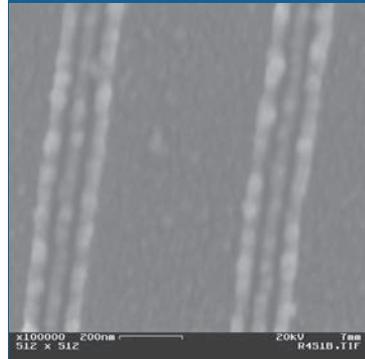
# Kurze Pulse / Nanostrukturen

## Short Pulses / Nanostructures

Such CGH consist of binary or multi-level pixels arranged in a specific way so that the illuminating coherent light transforms into a real readable image in a Fourier plane of a focusing optics. The corresponding pixel distribution is calculated from the initial image (the information) with an optimized algorithm (Fig. 1) and then written on the workpiece surface by means of direct laser ablation (Fig. 2).

For this purpose, a fast laser scanner is combined with a high-resolution imaging optics, which images the pixels of a switchable two-dimensional phase element onto the material surface. Since the desired pixel size should be in the  $\mu\text{m}$  range here and also very precise ablation rates of a few 10 nm are required, the construction of a special imaging optics, as well as the use of a short pulse laser are necessary. So far, a pixel size of 4  $\mu\text{m}$  could be achieved, as shown in Fig. 3 at the example of a test pattern. This should be reduced to 1-2  $\mu\text{m}$  at the end of the project.

With this technology it should be possible to write CGH with a size in the  $\text{mm}^2$  range directly in about one second on the surface of a component, whereby the CGH can be different for each component. The information is then read out by illumination with a coherent light source (e.g., a laser pointer). The output information then appears as a real readable image in the focus of an optic and can be observed on a screen, or read out with a camera (Fig. 4).



▲  
Abb. 4: Rekonstruktion des Eingangsbildes durch kohärente Beleuchtung des lasergeschriebenen CGH.

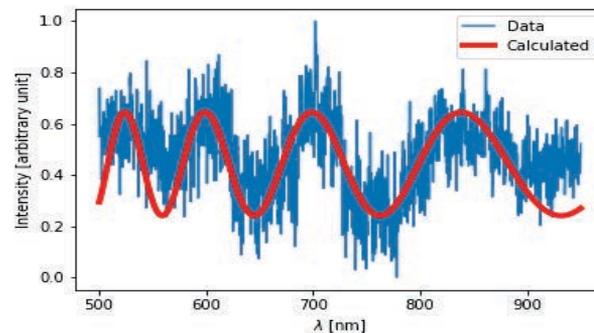
Fig. 4: Reconstruction of the input image by coherent illumination of the laser written CGH.

# Kurze Pulse / Nanostrukturen

## Short Pulses / Nanostructures

### Nanostrukturierung von Materialoberflächen unter dem Einfluss einer Deckschicht - reflektometrische Dünnschichtmessung

Bei der Oberflächenstrukturierung mit Lasern kann eine transparente Deckschicht auf dem zu bearbeitenden Material die entstehende Oberflächentopologie drastisch beeinflussen. Eine mögliche Anwendung dieser Technik ist, unter Ausnutzung des Druckaufbaus unter der Deckschicht, die gezielte Beeinflussung der Form der entstehenden Strukturen, um spezifische Oberflächenfunktionalitäten zu generieren. Hierzu ist ein direkter Vergleich von theoriebasierten Modellrechnungen mit Experimenten geplant, um die zugrundeliegenden Prozesse zu verstehen. Dabei sollen u.a. Flüssigkeitsschichten als Deckschicht untersucht werden. Um den auf die Oberfläche treffenden Strahl möglichst wenig zu beeinflussen, soll die Schichtdicke vorzugsweise kleiner als  $1\ \mu\text{m}$  sein. Um solche Flüssigkeitsschichten zu realisieren, müssen die Benetzungseigenschaften angepasst werden, was oft mit einer schnellen Verdampfung der Flüssigkeit einhergeht. Um eine Korrelation zwischen der bei der Bestrahlung vorliegenden Dicke der Flüssigkeitsschicht und der resultierenden Oberflächentopologie zu erhalten, ist eine genaue Kenntnis der Schichtdicke zu jedem Zeitpunkt am Ort des Experiment essenziell wichtig.



▲  
Aufgenommenes Spektrum bei Reflexion an einem Ethanolfilm auf einem Aluminiumsubstrat (blau). Das theoretische Spektrum für die aus den Positionen der Maxima und Minima errechnete Schichtdicke von  $1,6\ \mu\text{m}$  ist ebenso dargestellt (rot).

*Measured reflection spectrum of a thin ethanol layer on an aluminum substrate (blue). From the positions of maxima and minima, a layer thickness was calculated ( $1.6\ \mu\text{m}$ ) by fitting a theoretical spectrum (red) to the measured one.*

Ein geeignetes Verfahren zur Bestimmung der Dicke einer solchen Deckschicht ist die reflektometrische Dünnschichtmessung. Dieses Messverfahren nutzt die Eigenschaft des Lichts, Interferenzmuster zu erzeugen, wenn von der Luft-Schicht-Grenzfläche und der Schicht-Substrat-Grenzfläche reflektiertes Licht miteinander interferiert. Unter Verwendung einer breitbandigen Lichtquelle entstehen dadurch im Interferenzspektrum Maxima und Minima, anhand von deren Positionen sich die Schichtdicke eindeutig bestimmen lässt. Ein großer Vorteil dieser Messmethode ist, dass der Messaufbau ohne aufwändige Veränderungen in den Bestrahlungsaufbau integriert werden kann. Um ein möglichst breitbandiges Spektrum zu erhalten, wurden zwei unterschiedliche Weißlichtquellen verwendet. Das Licht beider Quellen wurde über eine Lichtleitfaser auf die Probe gelenkt. Das dort reflektierte Licht wird dann über eine weitere Lichtleitfaser in ein breitbandiges Spektrometer gelenkt. Anschließend wird das aufgenommene Spektrum geglättet und anhand der Positionen der Maxima und Minima die Dicke der das Muster erzeugenden Schicht bestimmt.

# Kurze Pulse / Nanostrukturen

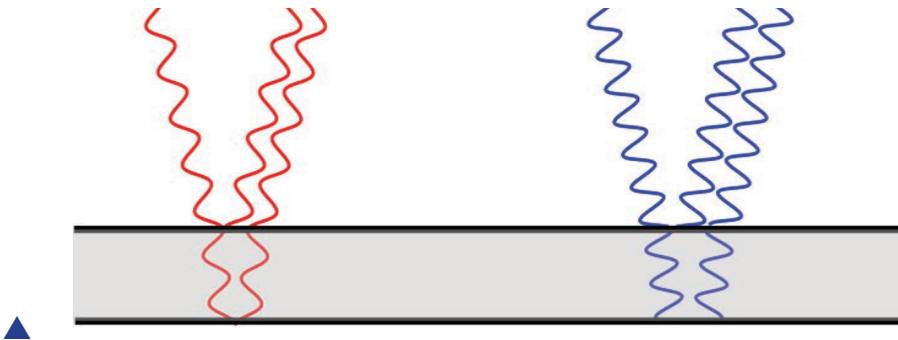
## Short Pulses / Nanostructures

### Nanostructuring of material surfaces under confinement conditions / thin-film interference

In laser surface structuring processes, a transparent confinement layer atop a target material can drastically influence the resulting topology. One possible application of this technique is making use of the effect of an increased pressure build up beneath the confinement layer for shaping the resulting structures, in order to create specific surface functionalities.

We plan to make a direct comparison between theory-based simulations and experiments to further understand the underlying processes of the laser-material interactions. For these studies, liquid layers should also be tested.

To insure that the confinement layer has only a negligible effect of the incoming radiation, its thickness should be smaller than  $1\ \mu\text{m}$ . For producing such a thin liquid layer, it is necessary to modify the wetting properties of the liquid, which often results in fast evaporation and thus causes a rather small time frame for the irradiation. Therefore, a knowledge of the thickness of the layer at every time is essential. One useful technique for measuring the thickness of such a thin film is the thin-film interference technique.



Skizze zur Veranschaulichung des Funktionsprinzips der reflektometrischen Dünnschichtmessung. Das an der ersten und zweiten Grenzschicht reflektierte Licht wird für eine Wellenlänge (rot) konstruktiv, für eine andere (blau) destruktiv überlagert. Dadurch entstehen im reflektierten Spektrum Maxima und Minima.

*Illustrative sketch of the principle of thin layer interference measurement. The light reflected at the first and second interface interferes constructively for a specific wavelength (red) and destructively for another (blue). The reflected spectrum therefore exhibits maxima and minima.*

This measurement technique uses the property of light to form interference patterns when the light reflected by the air-layer interface and the layer-substrate interface interfere. For a given confinement and substrate material, the positions of maxima and minima of the interference pattern allow to calculate the thickness of the layer. The benefit of this type of measurement is that it can be included in the same setup used for the structuring process, without the need to modify the setup.

To have a broad band spectrum for the test measurements, the light from two different white light sources was combined. With an optical fiber, the light was directed on to the target. The reflected light was collected by another fiber and transmitted to a broadband spectrometer. The recorded spectra were smoothed and, based on the positions of the maxima and minima, the layer's thickness was calculated.

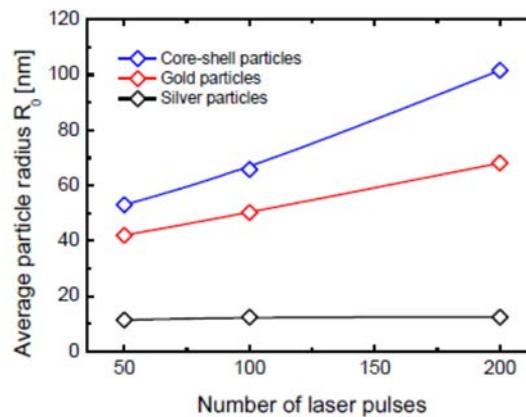
# Kurze Pulse / Nanostrukturen

## Short Pulses / Nanostructures

### Erzeugung plasmonischer Nanopartikel in Glas

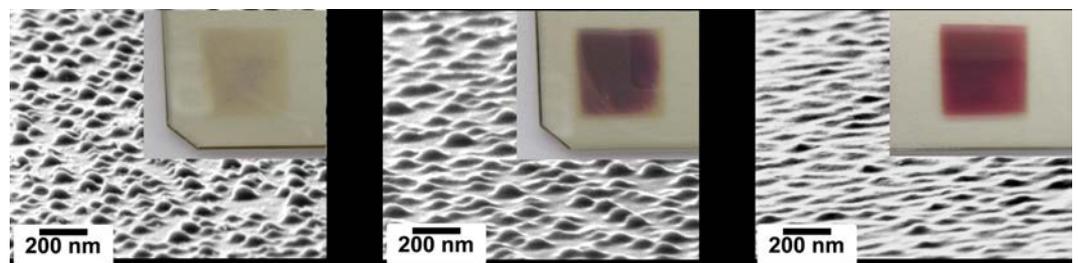
Erzeugung und kontrollierte Anordnung metallischer Nanopartikel sind Grundvoraussetzungen für die Herstellung plasmonischer Komponenten. Silber- und Gold-Nanopartikel in einer Glasmatrix sind besonders interessant, da ihre Plasmonenresonanz (SPR) im sichtbaren Spektralbereich liegt und zahlreiche Anwendungen in Optoelektronik und Nanoplasmonik möglich erscheinen. Typischerweise werden Silbernanopartikel in Kalknatronglas durch Ionenaustausch ( $\text{Ag}^+ \leftrightarrow \text{Na}^+$ ) und anschließende Wärmebehandlung hergestellt. Diese Methode lässt allerdings keine räumlich kontrollierte Partikelbildung in genau definierten Anordnungen zu. Bei Gold ist diese Methode gar nicht anwendbar.

Von besonderem Interesse sind bimetallische Au/Ag-Nanopartikel, da sich deren Resonanzwellenlänge über die Zusammensetzung abstimmen lassen sollte. Die laserbasierte Herstellung derartiger AuAg-Partikel in präzise definierten Bereichen wurde in Kooperation mit dem Institut für Physik der Universität Halle-Wittenberg durchgeführt. Dazu wurde Ag-ionenausgetauschtes, Au-beschichtetes Glas mit einem ArF-Excimerlaser (Wellenlänge 193 nm) bei Fluenzen unterhalb der Ablationsschwelle im Multipulsbetrieb bestrahlt. Die Absorptionsspektren zeigen, dass nach wenigen Pulsen zunächst die Plasmonenresonanz von Gold dominiert, nach weiterer Bestrahlung sich allerdings bimetallische Partikel bilden. Messungen mittels Kleinwinkel-Röntgenstreuung (SAXS) bestätigen die Bildung von Kern-Hülle-Partikeln mit relativ großem Au-Kern und einer dünneren Ag-Hülle.



Auf der Basis von Kleinwinkel-Röntgenstreuung (SAXS) ermittelte Partikelgrößen in Abhängigkeit der Laserpulszahl. Die Ergebnisse lassen sich mit der Bildung von relativ kleinen Ag-Partikeln, größeren Au-Partikeln sowie Kern-Hülle Partikeln mit einem Au-Kern und einer Ag-Hülle beschreiben.

*Particle size vs number of pulses determined on the basis of small angle x-ray scattering (SAXS). The results indicate the formation of small Ag particles, larger Au particles and core/shell particles with Au core and Ag shell.*



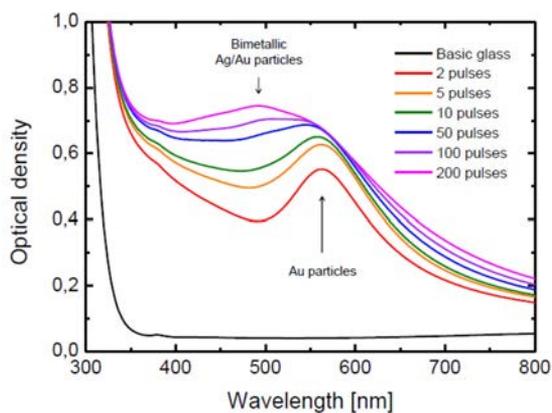
# Kurze Pulse / Nanostrukturen

## Short Pulses / Nanostructures

### Generation of plasmonic nanoparticles in glass

The generation and controlled arrangement of metallic nanoparticles is very important for the fabrication of plasmonic elements. Silver and gold nanoparticles in glasses are attracting particular attention since the wavelength of their surface plasmon resonance (SPR) is in the visible spectral range, making such materials promising candidates for applications in optoelectronics and nanoplasmonics. Typically, silver nanoparticles in sodium silicate glasses are prepared by  $\text{Ag}^+ \leftrightarrow \text{Na}^+$  ion exchange process and subsequent thermal treatment. However, this method does not allow creating nanoscaled arrays of particles localized in a certain way. Furthermore, this method is not suitable for gold.

Bimetallic Au/Ag nanoparticles are of special interest, as their resonance wavelength should be tunable by changing the composition. The laser-based generation of such AuAg particles has been performed in collaboration with the Institute of Physics of the University of Halle Wittenberg. Ag-ion exchanged glass has been irradiated by an ArF excimer laser (wavelength 193 nm) at fluences below the ablation threshold. Absorption spectra taken after a few pulses exhibit a dominating plasmon resonance of gold. After multiple pulse irradiation the peak broadens and shifts into the blue range indicating the formation of bimetallic particles. Small angle X-ray scattering (SAXS) measurements confirm the formation of core-shell particles with a large Au core surrounded by a thin Ag shell.

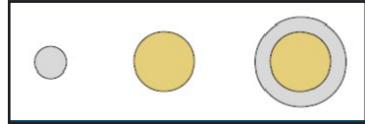


Absorptionsspektren von goldbeschichtetem,  $\text{Ag}^+ \leftrightarrow \text{Na}^+$  ionenausgetauschtem Glas nach der 193nm-Bestrahlung mit unterschiedlichen Pulszahlen. Nach der anfänglichen Bildung von Au-Nanopartikeln entstehen mit zunehmender Pulszahl bimetallische Ag/Au-Partikel.

Absorption spectra of gold-coated,  $\text{Ag}^+ \leftrightarrow \text{Na}^+$  ion exchanged glass after 193-nm-irradiation with various numbers of pulses. After initial formation of Au nanoparticles, with increasing pulse number bimetallic Ag/Au particles are formed.

Light microscopic and scanning electron microscopic views after 193 nm-laser irradiation of gold-coated,  $\text{Ag}^+ \leftrightarrow \text{Na}^+$  ion exchanged glass with 2 (left), 5 (center) and 10 (right) laser pulses.

Microscopic and scanning electron microscopic views after 193 nm-irradiation of gold-coated,  $\text{Ag}^+ \leftrightarrow \text{Na}^+$  ion exchanged glass with 2 (left), 5 (center), and 10 (right) laser pulses. (red) to the measured one.

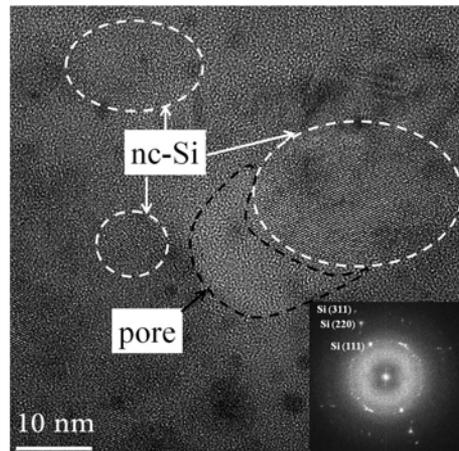


# Kurze Pulse / Nanostrukturen

## Short Pulses / Nanostructures

### Si-Nanokristalle

Si-Nanokristalle (Si-NC) sind als potenzielle Lichtemitter in der siliziumbasierten Photonik von Interesse. Sie werden bisher hauptsächlich durch eine Hochtemperaturbehandlung von substöchiometrischem  $\text{SiO}_x$  (silicon-rich oxide) hergestellt, bei der eine Phasenseparation in Si und  $\text{SiO}_2$  erfolgt. Die starke sichtbare Lumineszenz der entstehenden Si-Cluster und Si-Nanokristalle wird auf das Quantum-Confinement und Defektzustände an den Grenzflächen zwischen Kristall und umgebender Matrix zurückgeführt. Gegenüber Ofenprozessen bietet das Tempern durch Laserbestrahlung die Vorteile, dass die Umwandlung räumlich selektiv durchgeführt werden kann, eine Temperaturbelastung kritischer Bereiche in der Umgebung vermieden wird und Substrate eingesetzt werden können, welche die beim Ofentempnern erforderlichen Temperaturen nicht vertragen (z.B. Borosilikatgläser).



◀ Hochauflösendes TEM-Bild eines porösen Bereichs einer mit  $1,75 \times 10^5 \text{ W/cm}^2$  bestrahlten  $\text{SiO}_x$ -Probe. Das poröse Material ist amorph und enthält kristalline Si-Partikel (weiß gestrichelte Linien). Der hellere Bereich in der Mitte (schwarz gestrichelte Linie) repräsentiert den Teil einer Pore.  
*High-resolution TEM image from the porous part of a  $\text{SiO}_x$  sample irradiated with a laser intensity of  $1.75 \times 10^5 \text{ W/cm}^2$ . The porous material is amorphous and contains nc-Si particles indicated by white dashed lines. The brighter part in the center marked by a black dashed line contains part of a pore.*

In unserem Ansatz, den wir in Kooperation mit dem IV. Physikalischen Institut der Georg-August-Universität Göttingen verfolgen, wird ein kontinuierlich emittierender Laser mit 405 nm Wellenlänge für die Phasenseparation von  $\text{SiO}_x$  verwendet. Die resultierende Mikrostruktur wurde mit Hilfe von transmissionselektronenmikroskopischen Techniken untersucht. Dabei wurde unter bestimmten Bestrahlungsbedingungen die Bildung poröser Bereiche beobachtet. Hier liegt eine amorphe Matrix mit einer Zusammensetzung nahe am Siliziumdioxid vor, die mit Silizium-Nanopartikeln und Poren durchsetzt ist. Die Entstehung dieser Bereiche kann durch die Vorstellung einer „selektiven Silizium-Ablation“ erklärt werden. Diese Ergebnisse haben Bedeutung für die Beherrschung der zerstörungsfreien Herstellung von Si-Nanokristallen wie auch für die kontrollierte Herstellung poröser Silizium-

Beschreibung der zeitlichen Entwicklung der Mikrostruktur einer laserbestrahlten silicon rich silicon oxide Probe im Sinn von "selektiver Siliziumablation". ▶

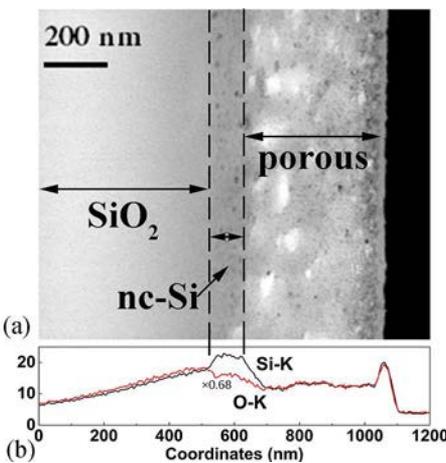
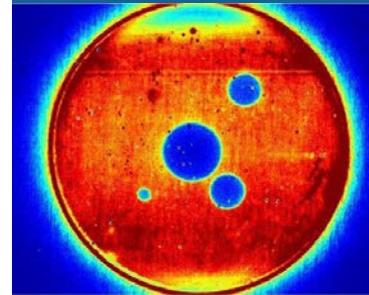
*Description of the temporal evolution of the microstructure of laser irradiated silicon rich silicon oxide samples in terms of "selective silicon ablation".*

# Kurze Pulse / Nanostrukturen

## Short Pulses / Nanostructures

### Si nanocrystals

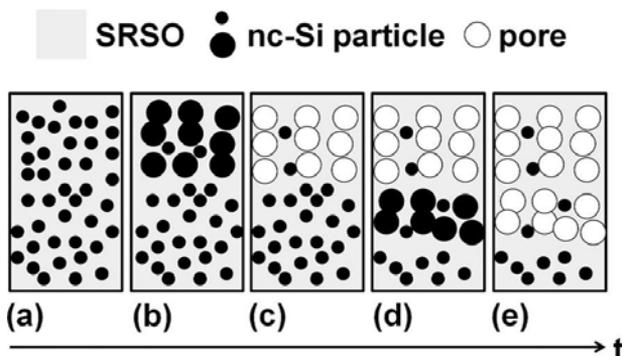
Silicon nanocrystals (Si-NC) are of interest as integrated light emitters in silicon-based photonics. They are mainly fabricated by high temperature annealing of substoichiometric  $\text{SiO}_x$  (silicon-rich oxide), leading to a phase separation into Si and  $\text{SiO}_2$ . The strong visible to infrared photoluminescence of Si-clusters and Si-nanocrystals formed in this way is attributed to quantum confinement and defect states at the boundary between nanocrystal and surrounding matrix. Compared to conventional furnace annealing, laser annealing offers the possibility to generate nanocrystals locally controlled. Furthermore, the thermal load of the substrate can be reduced, thereby allowing materials and components that do not permit high temperatures (e.g. borosilicate glass).



◀ (a) STEM Hellfeldbild des zentralen Bereichs einer CW-Laserbestrahlten Probe (Laserintensität  $1.75 \times 10^5 \text{ W/cm}^2$ ). (b) Mittels EDX aufgenommene Profile der Sauerstoff- und Siliziumkonzentration. Die gleiche Höhe von Si-K und O-K im porösen Bereich zeigt, dass das poröse Material  $\text{SiO}_2$  chemisch sehr nahe kommt.

(a) STEM bright field image from the center part of a CW-laser irradiated sample with a laser intensity of  $1.75 \times 10^5 \text{ W/cm}^2$ . (b) Profiles of oxygen and silicon counts obtained from EDX maps. The coincidence between Si-K and rescaled O-K counts indicates that the porous material is chemically close to  $\text{SiO}_2$ .

In our approach, in collaboration with IV. Physikalisches Institut der Universität Göttingen, we apply a continuous wave laser emitting at 405 nm for the laser-induced phase separation in  $\text{SiO}_x$  films into crystalline silicon particles and silicon dioxide. The resulting microstructure is studied using transmission electron microscopy techniques. Under specific irradiation conditions, the formation of porous regions is observed. Such regions consist of an amorphous matrix with a composition similar to silicon dioxide, which contains some nanometric silicon particles in addition to pores. A mechanism referred to as “selective silicon ablation” consistently explains the experimental observations. These results have implications for the damage-free laser decomposition of silicon-rich silicon oxides and for the controlled fabrication of porous silicon dioxide films.



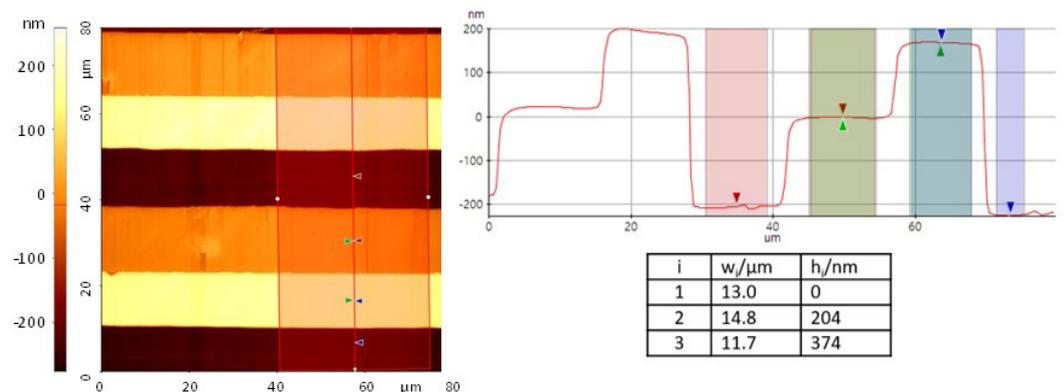
# Kurze Pulse / Nanostrukturen

## Short Pulses / Nanostructures

### Laserbasierte Herstellung von Mikrooptik

Die Herstellung von Mikrooptiken für hochintegrierte Mikrosysteme kann in vielen Fällen durch die direkte Bearbeitung und Strukturierung mittels Laserablation erfolgen. Zur Bearbeitung von Glaswerkstoffen sind in der Regel Wellenlängen im kurzwelligen UV-Bereich (z. B. 193 nm oder 157 nm) erforderlich.

Dünne Schichten aus UV-absorbierendem Silizium-Suboxid ( $\text{SiO}_x$ ,  $x \approx 1$ ) können durch Excimerlaserablation strukturiert und anschließend durch eine thermische Behandlung zu Siliziumdioxid (Quarzglas) oxidiert werden. Dieser zweistufige Prozess erlaubt die Herstellung mikrostrukturierter Komponenten aus reinem Quarzglas. Z. B. können binäre (zweistufige) diffraktive Phasenelemente durch die strukturierte Ablation eines  $\text{SiO}_x$ -Films auf einem Quarzglassubstrat mit anschließender Oxidation hergestellt werden. Derartige Phasenelemente werden als Projektionsmasken für die präzise Lasermikromaterialbearbeitung oder für die strukturierte Beleuchtung in der hochauflösenden Mikroskopie eingesetzt. Für die Herstellung mehrstufiger Elemente wird das strukturierte Element mit einem weiteren  $\text{SiO}_x$ -Film beschichtet und nochmals strukturiert. Ein diffraktives Phasenelement in Form eines dreistufigen linearen Phasengitters weist bereits eine Beugungseffizienz von über 60 % in der +1. Beugungsordnung auf. Die Effizienz kann durch eine höhere Anzahl an Stufen durch weitere Beschichtungs- und Strukturierungsschritte gesteigert werden. Auf den einzelnen Stufen wird eine Oberflächenrauheit von  $R_a \approx 3$  nm erreicht.



▲ Dreistufiges Phasenelement aus Quarzglas, hergestellt in zwei Zyklen aus  $\text{SiO}_x$ -Beschichtung und Strukturierung mittels Ablation. Atomkraftmikroskopische Aufnahme. Links: Falschfarbendarstellung des Höhenprofils. Rechts: Querschnitt durch den links markierten Bereich.

*Three-level fused silica phase element fabricated by two cycles of  $\text{SiO}_x$ -film deposition and ablation patterning and final oxidation. Image taken by atomic force microscopy. Left: False color representation of the height profile. Right: Cross section through the area indicated on the left side.*

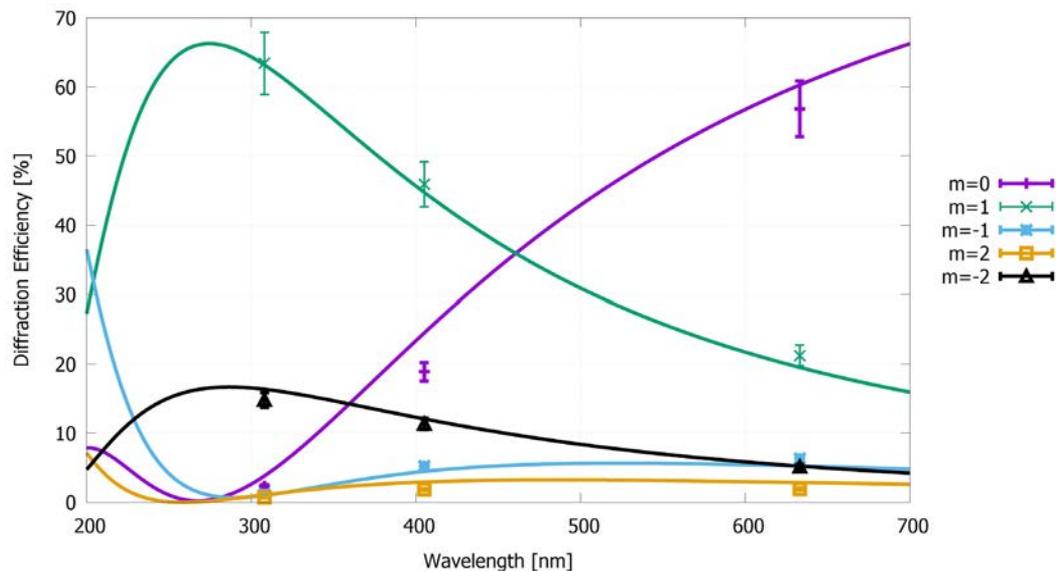
# Kurze Pulse / Nanostrukturen

## Short Pulses / Nanostructures

### Laser based fabrication of micro-optics

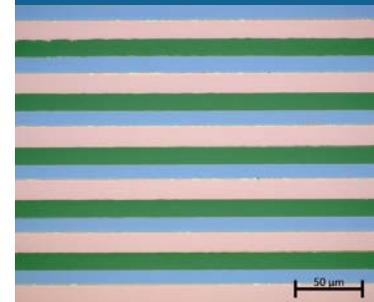
The fabrication of micro-optical components for highly integrated microsystems can often be accomplished by direct laser processing. The machining of glass materials usually requires wavelengths in the deep UV range (193 nm or 157 nm).

UV-absorbing silicon suboxide ( $\text{SiO}_x$ ,  $x \approx 1$ ) films can be patterned by excimer laser ablation and subsequently oxidized to fused silica by thermal annealing. This two-step process allows for the fabrication of microstructured components made entirely of fused silica. For example, diffractive optical elements with two phase-quantized levels (binary elements) can be produced through structured ablation of a thin film of silicon suboxide on a fused silica substrate followed by oxidation. Such phase elements can be used as projection masks for precise laser microfabrication or structured illumination in high resolution microscopy. In addition to these binary patterns, multilevel phase structures are produced by repeating the ablation step after recoating the structured surface with additional layers of silicon suboxide. A diffractive phase element in form of a three-level line grating exhibits a diffraction efficiency of more than 60 % in the +1st order. This efficiency can be enhanced by increasing the number of recoating and ablation steps and, thus, the number of phase levels. Within the levels, a surface roughness of  $R_a \approx 3$  nm is obtained.



▲ Beugungseffizienzen der im AFM-Bild gezeigten dreistufigen Struktur. Die bei drei Wellenlängen 308 nm, 405 nm und 633 nm gemessene (Datenpunkte) und die simulierte (Linien) Effizienz ist für die Beugungsordnungen  $m = -2$  bis  $m = 2$  dargestellt. Bei der Designwellenlänge um 270 nm werden eine hohe Effizienz in der +1. Ordnung und eine starke Unterdrückung der nullten Ordnung erreicht.

*Diffraction efficiencies for the three-level structure shown in the AFM image. Measured (data points taken at 308 nm, 405 nm, and 633 nm) and simulated (lines) efficiency is shown for the orders  $m = -2$  to  $m = 2$ . At the design wavelength of about 270 nm a high diffraction efficiency in the +1st order and a strong suppression of the zero order beam is obtained.*

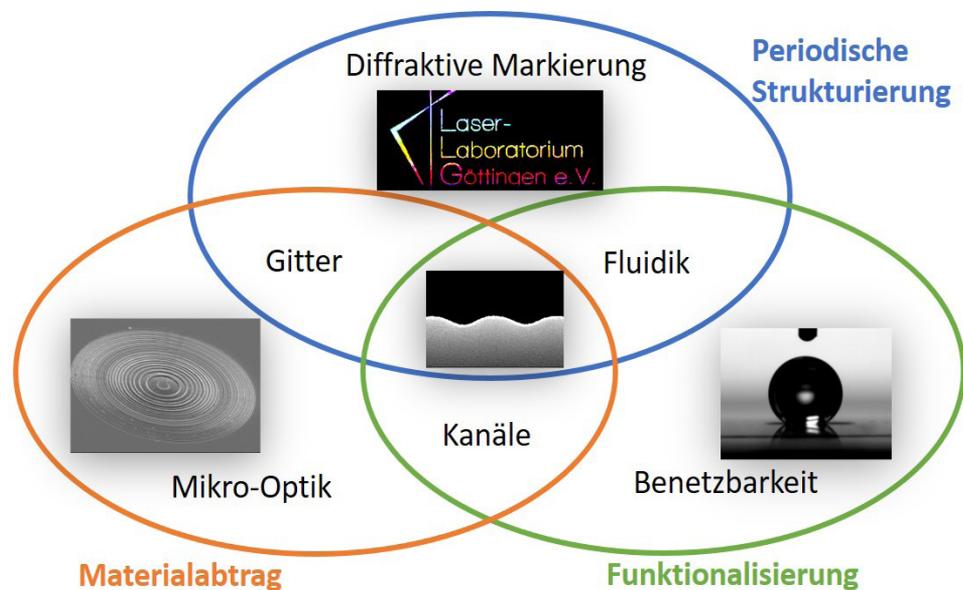


# Kurze Pulse / Nanostrukturen

## Short Pulses / Nanostructures

### Glas-Nanostrukturierung

Die Laserstrukturierung von Glas mit  $\mu\text{m}$ - oder Sub- $\mu\text{m}$ -Strukturauflösung stellt nach wie vor eine große Herausforderung dar. Glas ist über weite Wellenlängenbereiche vom nahen UV über den sichtbaren Spektralbereich bis ins nahe Infrarot transparent. Daher werden zur abtragenden Strukturierung von Glas im fernem IR oder im tiefen UV emittierende Laser eingesetzt; für höchste Strukturauflösung kommt dabei nur ein UV-Laser in Frage. Der ArF-Excimerlaser mit 193 nm Wellenlänge ist optimal geeignet, um kontrollierte, rissfreie Strukturen mit hoher Auflösung zu erzeugen. Oberflächenreliefgitter und Lochraster in zahlreichen Gläsern wurden hiermit erfolgreich hergestellt. Derartige periodische Strukturen haben zahlreiche Anwendungen, z. B. die Funktionalisierung oder die diffraktive Markierung von Glasoberflächen. Weiterhin können mikrooptische Komponenten wie Mikrolinsen, Fresnellinsen und fluidische Strukturen wie Kanäle oder Düsen hergestellt werden. Für die Bearbeitung von UV-transparentem Quarzglas wird der F<sub>2</sub>-Laser (Wellenlänge 157 nm) eingesetzt.



▲ Methoden und Anwendungen der Lasermikro- und Nanostrukturierung von Glas.  
*Methods and applications of laser micro- and nano-machining of glass.*

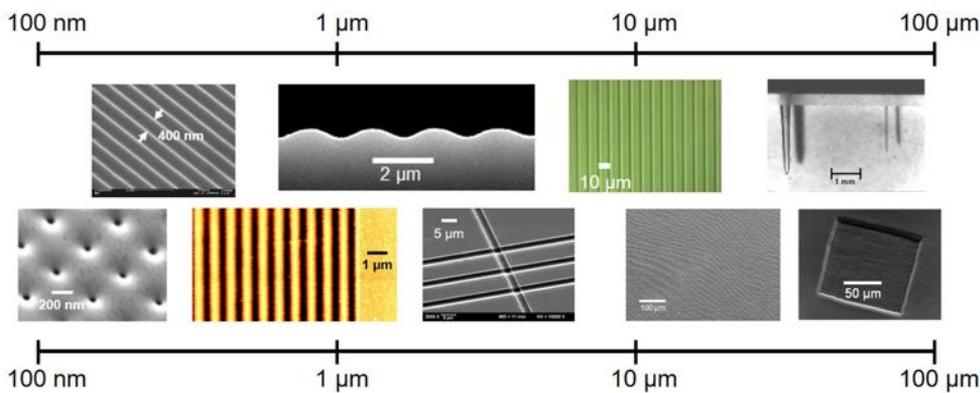
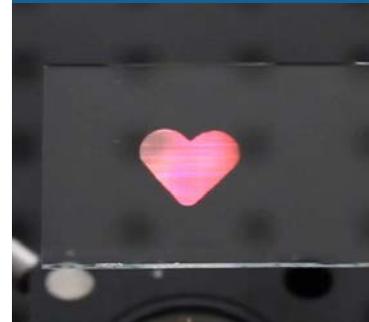
Abtragtiefe von Kalk-Natron-Glas bei der Laserbearbeitung mit einer Wellenlänge von 193 nm (ArF-Excimerlaser). Der Abtrag pro Puls nimmt mit steigender Laserfluenz zu. ▶  
*Ablation depth of soda lime glass for laser processing at 193 nm (ArF excimer laser). The ablated depth per pulse increases with growing laser fluence.*

# Kurze Pulse / Nanostrukturen

## Short Pulses / Nanostructures

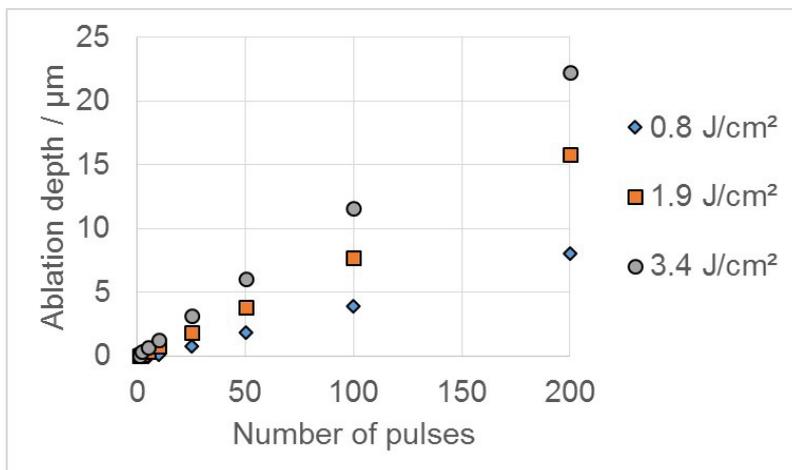
### Nanopatterning of glass

Precise, high-resolution laser patterning of glass materials is still a challenging task. Since glass is transparent in the visible and the near UV spectral ranges, IR or deep-UV lasers have to be used for the ablative structuring of glass. As the achievable resolution scales with the wavelength, IR light does not provide the spatial resolution required for  $\mu\text{m}$ - and sub- $\mu\text{m}$ -patterning. Hence, lasers emitting in the deep UV are preferentially used for fast and high-resolution patterning of glass. The ArF-excimer laser emitting at 193 nm is optimally suited to obtain controlled, crack-free patterns with high resolution. At this wavelength, surface relief gratings and hole arrays in numerous glasses have been successfully fabricated. Such periodic patterns have a number of applications, e.g. for surface functionalization, the generation of optical diffraction gratings, or for diffractive marking. Furthermore, micro optical elements like micro lenses or Fresnel lenses and fluidic structures like channels or nozzles can be fabricated. For the processing of UV transparent fused silica, the  $\text{F}_2$  laser (wavelength 157 nm) is applied.

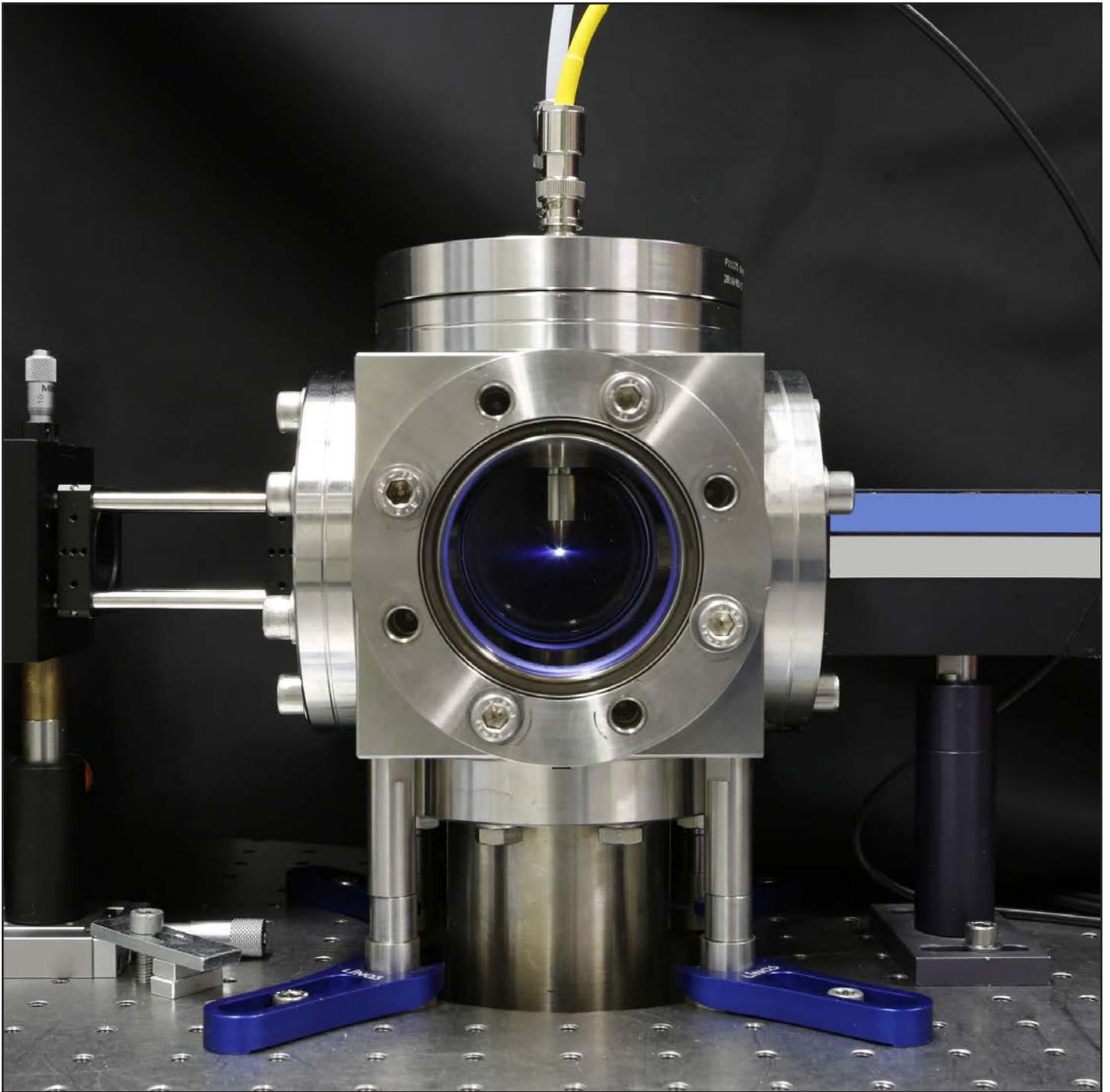


▲ Verschiedene Abtragsgeometrien bei der Excimerlaserbearbeitung von Glas. Die charakteristischen Strukturdimensionen reichen von 100 nm bis 100  $\mu\text{m}$ .

Various ablation patterns obtained by excimer laser processing of glass. Characteristic feature sizes range from 100 nm to 100  $\mu\text{m}$ .



Berichte aus der Abteilung  
Departmental Reports



# Optik / Kurze Wellenlängen

## Optics / Short Wavelengths

Die Abteilung "Optik / Kurze Wellenlängen" des Laser-Laboratoriums beschäftigt sich mit der Propagation von Laserstrahlung, d.h. einerseits mit dem Abstrahlverhalten von Lasern, andererseits auch mit der Charakterisierung von Hochleistungsoptiken 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 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 Laser-Laboratorium is concerned with the characterization of laser sources as well as high quality optics for beam steering and shaping. 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 radiation with the help of appropriate optical elements.



**Dr. Klaus Mann**  
**Abteilungsleiter**

☎ +49-(0) 551/5035-41  
☎ +49-(0) 551/5035-99  
✉ [kmann@llg-ev.de](mailto:kmann@llg-ev.de)

### Mitarbeiter

#### Staff members

Jens-Oliver Dette  
Jonathan Holburg  
Simon Lange  
Maik Lübbecke  
Dr. Markus Muchow  
Matthias Müller  
Dr. Bernd Schäfer  
Meike Schellhorn  
Dr. Jennifer Zimara

# Optik / Kurze Wellenlängen

## Optics / Short Wavelengths

### Charakterisierung von Laseroptiken

Das Ziel der seit über 20 Jahren betriebenen Aktivitäten zur Optik-Charakterisierung besteht darin, durch ein tieferes Verständnis der grundlegenden 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 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.

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 eigentlich 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. Darüber hinaus wird dasselbe Verfahren auch zur quantitativen Erfassung thermischer Linsen und des „Fokus Shift“ an komplexen Fokussieroptiken (F-Theta-Linsen) eingesetzt (s. Fig. 1).

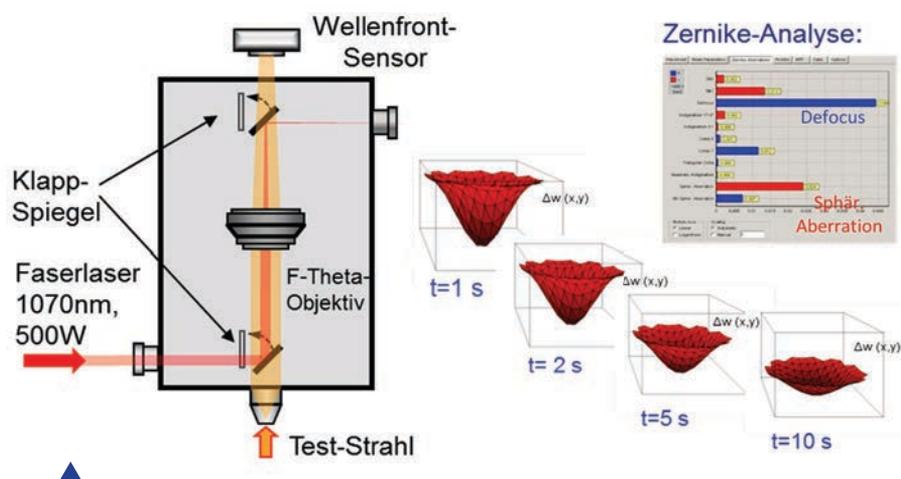


Abb. 1: Experimenteller Aufbau zur Bestimmung thermisch induzierter Wellenfrontdeformationen  $\Delta w(x,y)$  in komplexen optischen Systemen. Eine Zernike-Analyse der zu verschiedenen Zeitpunkten nach Abschalten des Faserlasers aufgenommenen Wellenfronten erlaubt die quantitative Auswertung des 'Focus shift'-Effekts und der induzierten Aberrationen.

Fig. 1: Experimental setup for the determination of thermally induced wavefront deformations  $\Delta w(x,y)$  in complex optical systems. A Zernike analysis of the wavefronts recorded at different times after switching off the fiber laser allows a quantitative evaluation of the focus shift effect and the induced aberrations.

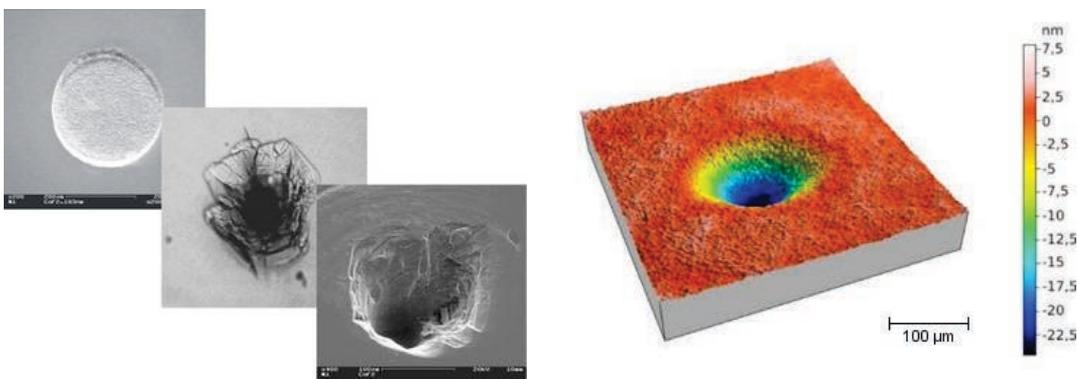
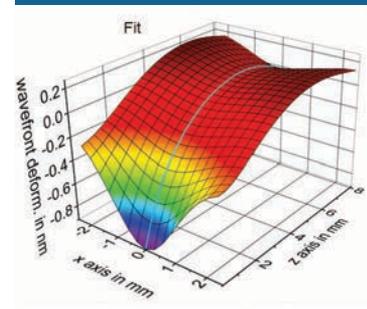
# Optik / Kurze Wellenlängen

## Optics / Short Wavelengths

### Laser optics characterization

The aim of the activities on optics characterization carried on for about 20 years now is to provide a deeper understanding of the basic mechanisms of interaction between intense laser radiation and optical materials, in order to optimize the manufacturing and coating processes. While in earlier times major focus had to be put on measuring of short-term damage thresholds, 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.

Key parameter for the stability of optical materials is the absorption: The absorbed laser radiation in the bulk and especially on the surface or coating of optics leads to an inhomogeneous temperature distribution which is, due to thermal expansion, refractive index gradients and internal stresses in the material, associated with the occurrence of a “thermal lens”. This undesirable effect can, however, be employed for a quantitative determination of the absorption of optical materials. For this purpose, a photothermal measuring system based on wavefront measurements with a high-sensitive Hartmann-Shack sensor was developed and applied in recent years for absorption measurements at several relevant laser wavelengths in the NIR, Vis and UV range. Moreover, the same metrology is also employed for quantitative monitoring of thermal lensing and assessment of the focus shift in complex focusing optics (e.g. F-Theta objectives, cf. Fig. 1).



▲  
Abb. 2: Morphologische Schädigungen optischer Komponenten bei der LIDT-Bestimmung; rechts unten: Kompaktierung einer Quarz-Probe durch ArF-Excimerlaser-Bestrahlung ( $10^8$  Pulse, Weißlicht-Interferogramm).

Fig. 2: Morphological damages of optical components after LIDT testing; bottom right: compaction of a quartz sample under ArF excimer laser irradiation ( $10^8$  pulses, white light interferogram).

# Optik / Kurze Wellenlängen

## Optics / Short Wavelengths

### Spektral aufgelöste Wellenfrontmessungen an beschichteten Optiken

Seit dem Jahr 2005 besteht eine Kooperation der Abteilung Optik / Kurze Wellenlängen mit der ESA/ESDEC (Noordwijk / NL). Unter anderem war das LLG maßgeblich an der Charakterisierung von Weltraum-Optiken für den Wetter-Satelliten Aeolus beteiligt. Der Satellit wurde im August 2018 gestartet und im Orbit erfolgreich in Betrieb genommen.

In Zusammenarbeit mit der ESA/ESDEC (Noordwijk / NL) und dem Fraunhofer Institut FhG IST wurde des Weiteren ein Diagnosesystem für spektral aufgelöste Wellenfrontmessungen entwickelt, mit dem Plan-Optiken bis zu einem Durchmesser von 120 mm untersucht werden können. Das Messsystem wird unter anderem zur Charakterisierung präziser breitbandiger Strahlteiler und dielektrischer Filter für Satellitenanwendungen genutzt, um etwaige laterale bzw. spektrale Inhomogenitäten zu ermitteln und auf diese Weise das Beschichtungsdesign zu optimieren.

Über eine lasergetriebene Plasmalampe mit nachgeschaltetem Monochromator wird zunächst ein durchstimmbarer kollimierter Teststrahl erzeugt, mit dem die Optiken im gesamten sichtbaren Spektralbereich mit einer Auflösung von 2 nm vermessen werden können. Der vom Testobjekt reflektierte oder transmittierte Strahl wird anschließend von einem hochsensitiven Hartmann-Shack-Wellenfrontsensor erfasst (siehe Abb. 1). Die dabei durch das Testobjekt verursachte Änderung der Wellenfront (bezogen auf ein Zygo-Referenzflat) gibt Auskunft über die laterale Inhomogenität der Probe. Die Genauigkeit beträgt dabei  $\pm 5$  nm RMS.

Im Rahmen des Projekts wurden spektral aufgelöste Wellenfrontmessungen an mit unterschiedlichen Schichtdesigns hergestellten dielektrischen Strahlteilern (Transmission: 400-900 nm, Reflexion: 920-2300 nm) durchgeführt. Dabei konnten spektrale Resonanzen in der reflektierten Wellenfront erkannt (siehe Abb. 2) und durch optimierte Beschichtungsparameter des FhG IST bis zur Auflösungsgrenze von  $\pm 5$  nm RMS erfolgreich eliminiert werden.

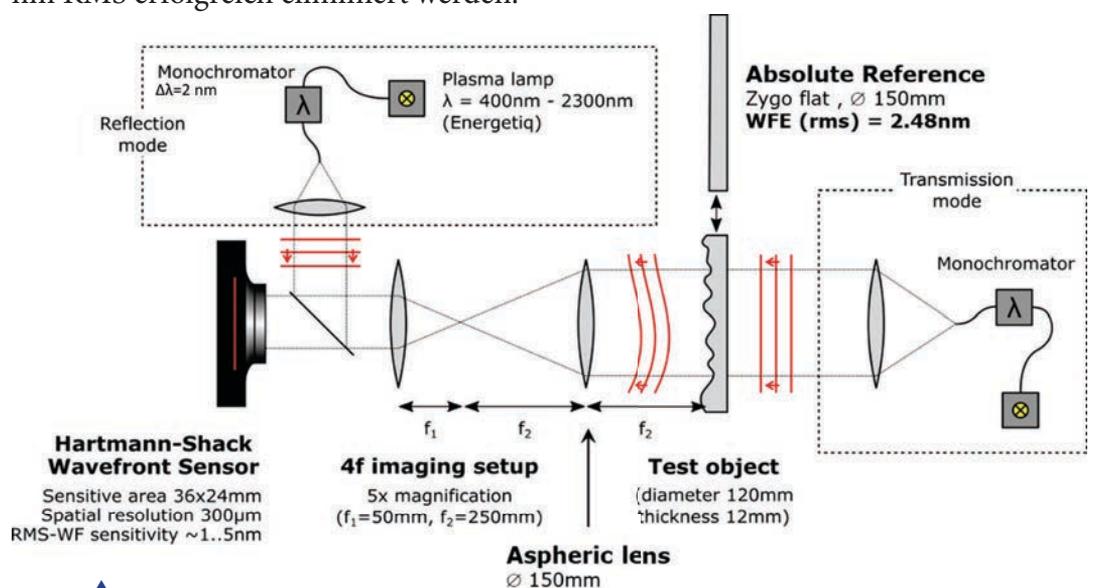


Abb.1: Experimenteller Aufbau für spektral aufgelöste Wellenfrontmessungen an dielektrisch beschichteten Testoptiken.

Fig. 1: Experimental setup for spectrally resolved wavefront measurements on dielectrically coated test objects.

# Optik / Kurze Wellenlängen

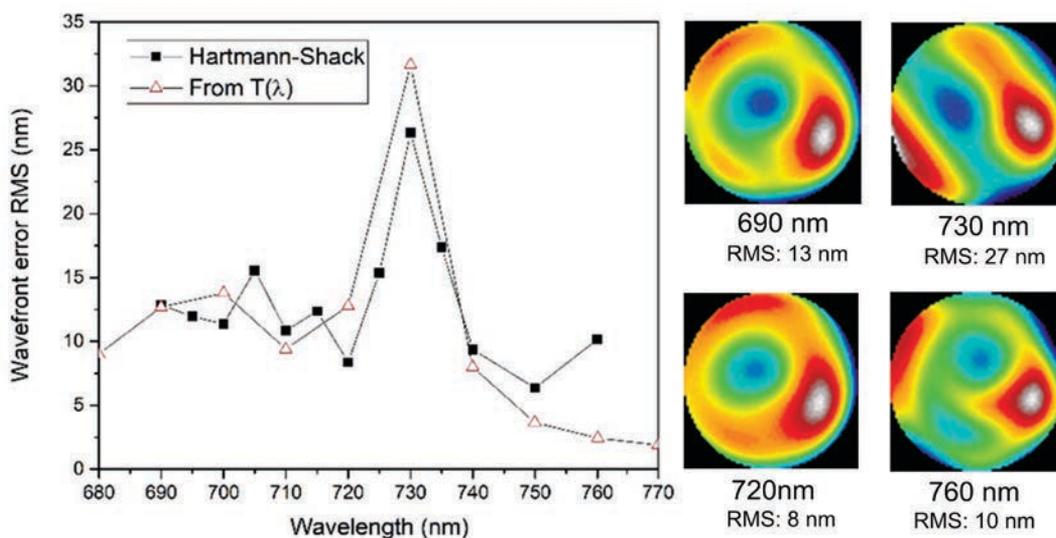
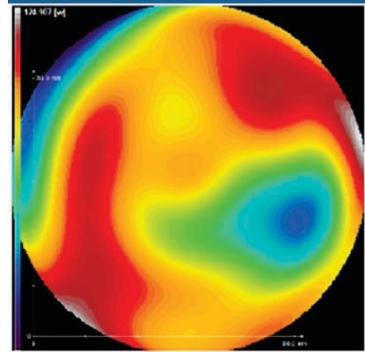
## Optics / Short Wavelengths

### Spectrally resolved wavefront measurements on coated optics

Since 2005, the Optics / Short Wavelengths department of LLG is cooperating with ESA/ESDEC (Noordwijk / NL). In particular, laser optics for the weather satellite Aeolus were comprehensively characterized at LLG. This satellite was launched to its orbit in August 2018 and thereafter successfully put into operation.

Furthermore, in collaboration with ESA and the Fraunhofer Institute FhG IST, LLG has developed a new diagnostic tool for spectrally resolved wavefront measurements in which plane optics with a diameter of up to 120 mm can be investigated. The measurement system is used to determine faintest lateral or spectral inhomogeneities of broadband beam splitters and dielectric filters for space applications. Using a laser driven plasma lamp followed by a fibre coupled grating monochromator a tuneable collimated test beam is employed for the measurements, covering the entire visible spectral range (spectral bandwidth 2 nm). The reflected or transmitted beam from the sample is detected by a highly sensitive Hartmann-Shack wavefront sensor (see Fig. 1). The wavefront changes caused by the sample (related to a Zygo reference flat) provide informations about the lateral inhomogeneity and can be specified with an accuracy of  $\pm 5$  nm RMS.

Within the project spectrally resolved wavefront measurements on dielectric beam splitters (transmission: 400-900 nm, reflection: 920-2300 nm) with different layer designs were analyzed. With the new diagnostic tool spectral resonances in the reflected wavefront could be detected (see Fig. 2) and successfully eliminated by optimized coating parameters of the FhG IST.



▲ Abb. 2. Links: Vergleich von gemessenen (schwarz) und berechneten (rot) Wellenfrontfehlern an einem dielektrisch beschichteten Strahlteiler. Rechts: Wellenfrontaberrationen gemessen mit dem Hartmann-Shack-Sensor bei verschiedenen Wellenlängen.

Fig.2. Left: Comparison of the measured (black) and calculated (red) wavefront errors on a dielectrically coated beam splitter. Right: Wavefront error maps of the beam splitter measured with Hartmann-Shack sensor at different wavelengths.

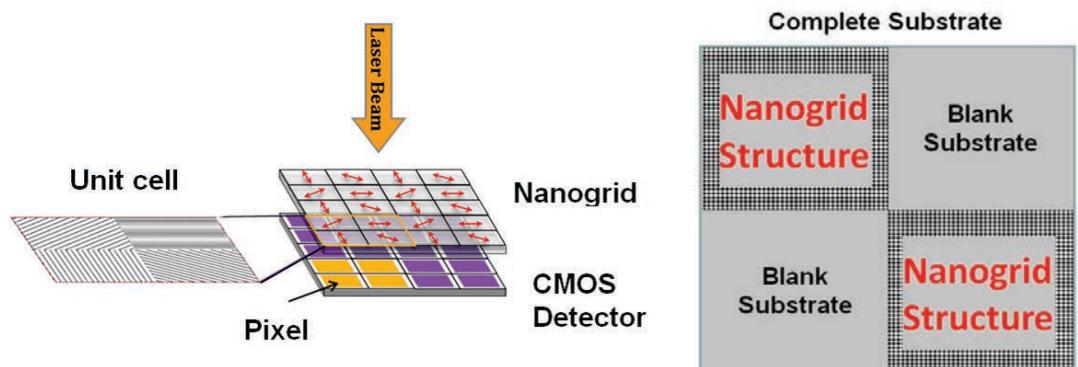
# Optik / Kurze Wellenlängen

## Optics / Short Wavelengths

### Polarisationsempfindlicher Wellenfrontsensor

In 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. Im NANOPOL-Verbund soll auf der Basis innovativer Subwellenlängen-Strukturen ein polarisationssensitiver Wellenfrontsensor entwickelt werden, 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 sowohl in laseroptischen Systemen als auch für konkrete Laser-Bearbeitungsprozesse in industriellen Produktionsanlagen.

Ziel des LLG-Teilvorhabens ist dabei der Aufbau des polarisationsempfindlichen Moduls auf Basis eines Wellenfront-Krümmungssensors in Kombination mit polarisierenden Nanogittern. Als polarisierendes Element ist ein Array von Sub-Wellenlängen-Gitterstrukturen aus Aluminium auf einem Quarzglassubstrat vorgesehen, das auf lithographischem Wege hergestellt wird. Die Elementarzelle dieses Nanogitter-Arrays besteht aus 4 Gittern mit unterschiedlicher Orientierung, die genau 4 Pixel des verwendeten CCD-Detektors abdecken. 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. Der Sensor soll im Projektverlauf in ein Messsystem der Fa. Primes GmbH integriert werden.



▲ Prinzip des polarisationsempfindlichen Sensors (links). Die Einheitszelle besteht aus 4 Nanogittern mit 0°, 45°, 90° und 135° Orientierung und ermöglicht so eine vollständige Polarisationsanalyse für kohärente Strahlung. Das Zieldesign im NANOPOL-Projekt (rechtes Bild) besteht aus zwei strukturierten und zwei unstrukturierten Bereichen mit je 1000 x 1000 Pixeln, entsprechend einer Sensorfläche von 8 x 8 mm<sup>2</sup>.

Principle of the polarization sensitive sensor (left). The unit cell consists of four nanogrid structures permitting the complete determination of the polarization state for coherent light. The NANOPOL target design (right figure) consists of two structured and two unstructured sectors with 1000 x 1000 pixels each, corresponding to a 8 x 8 mm<sup>2</sup> effective area for beam analysis.

# Optik / Kurze Wellenlängen

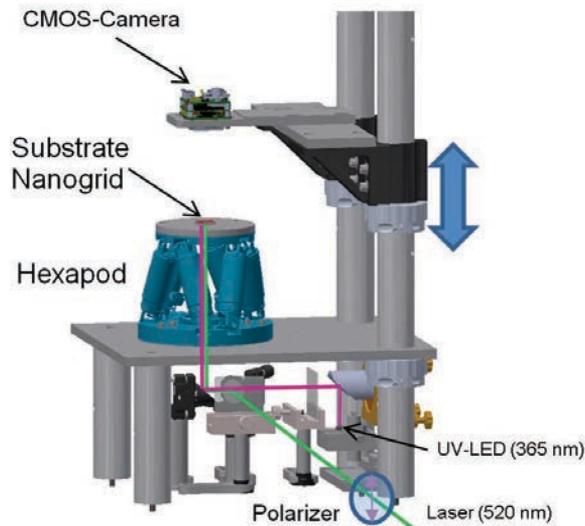
## Optics / Short Wavelengths

### Polarization sensitive wavefront sensor

In 2017 the LLG commenced activities within the framework of the BMBF joint project NANOPOL. Principal purpose is the development of a polarization sensitive wavefront sensor, based on the principle of the curvature sensor and utilizing a polarizing nanogrid structure. Based on high spatial resolution beam diagnostics 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.

Main issue of the LLG part within NANOPOL is the set-up of the polarization sensitive sensor module together with the development of corresponding analysis software. The intended polarizing element consists of an array of sub-wavelength structures on a fused silica substrate, to be manufactured by AMO using an adapted lithographic process.

The unit cell of the array consists of 4 grids with different orientations, covering precisely 4 pixels of the used CCD detector. By this means wavefront reconstruction can be performed for each polarization separately. Furthermore, the local state of polarization may be characterized by determination of the Stokes parameters. In the course of the project the LLG module shall be integrated into a Primes measurement system.



Hochstabiler experimenteller Aufbau zur pixelgenauen Verklebung von Nanogitter-Substrat und CMOS-Chip. Kernstück des Aufbaus ist ein Hexapod zur ultrapräzisen lateralen und vertikalen Ausrichtung beider Bauteile. Entsprechende Strahlführungen gestatten die Online Beobachtung der Ausrichtung sowie das UV-Aushärten des Klebers.

Stable mechanical setup for pixel-precise gluing of nanogrid substrate and CMOS-Chip. The main item is a Hexapod for ultra-precise lateral and vertical positioning of both parts. Corresponding beam guides enable the online inspection of the alignment or, alternatively, the UV-curing of the adhesive.

# Optik / Kurze Wellenlängen

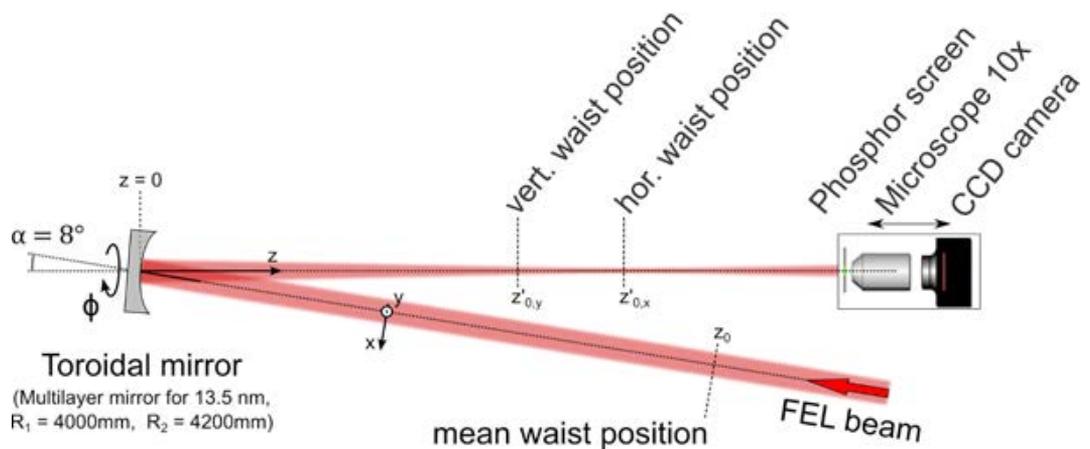
## Optics / Short Wavelengths

### Messung der Wigner-Verteilung zur Charakterisierung teilkohärenter Strahlung

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  $\vec{x}$  in Richtung  $\vec{u}$  interpretiert werden.

In langjähriger Kooperation mit DESY / Hamburg wurde ein tomographisches Verfahren zur Bestimmung der Wigner-Verteilung am Freie-Elektronen-Laser FLASH entwickelt. Da dieses Verfahren bisher nur einen Teil der Wigner-Verteilung erfassen konnte, wurde es in den letzten Jahren im Rahmen des BMBF-Projekts WeKo-KUBS wesentlich erweitert. Durch einen drehbaren Toroid-Spiegel kann jetzt die vollständige, vierdimensionale Wigner-Verteilung rekonstruiert werden. Testmessungen am LLG für bekannte Strahlen unterschiedlicher Komplexität zeigten die Eignung des verbesserten Verfahrens für die Strahlcharakterisierung.

Im Laufe des Jahres 2018 wurde der neue Aufbau in Hamburg an FLASH2 installiert und erste Messungen zur 4D-Wigner-Verteilung des FEL-Strahls bei der Wellenlänge 13 nm durchgeführt. Die dabei aufgenommenen Daten werden zur Zeit am LLG analysiert und ausgewertet. Erste vorläufige Ergebnisse wurden bereits auf Fachkonferenzen vorgestellt. Zusätzlich wurde eine weitere Messzeit am FLASH beantragt, um Optimierungen des Experiments vorzunehmen und weitere Messdaten aufnehmen zu können.



▲  
Abb.1: Skizze der experimentellen Anordnung zur Messung der 4D-Wigner-Verteilung. Der Strahl des Freie-Elektronen-Lasers (FEL) wird von einem Toroid-Spiegel auf den Phosphor-Schirm einer Mikroskopkamera fokussiert, die entlang der Taille bewegt wird und Strahlprofile an verschiedenen Positionen sowie für verschiedene Drehwinkel des Toroids aufzeichnet.

Fig.1: Sketch of the experimental setup for measuring the 4D Wigner distribution function. The FEL beam is focused by a toroidal mirror onto the phosphor screen of a microscope 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 toroid.

# Optik / Kurze Wellenlängen

## Optics / Short Wavelengths

### Wigner distribution measurement for characterization of partially coherent radiation

Representing the Fourier Transform of the mutual coherence function, the Wigner distribution function (WDF) contains the full propagation characteristics of the beam as well as its spatial coherence properties, which normally are only accessible with high experimental effort. Generally, one can interpret the WDF as radiance from point  $\vec{x}$  into direction  $\vec{u}$ .

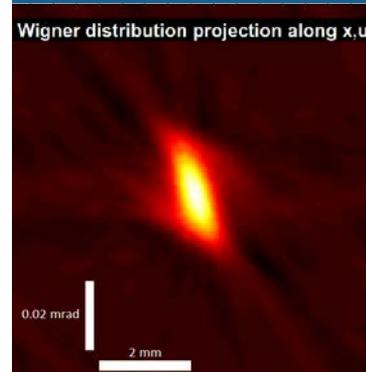
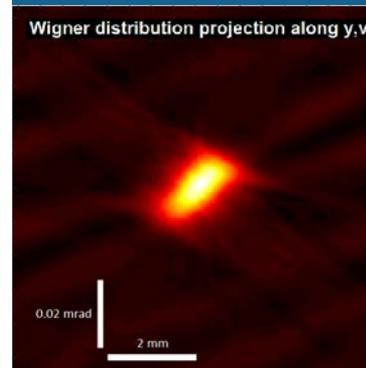
In continuation of a long-standing cooperation with DESY / Hamburg, a tomographical method to determine the WDF at the free-electron-laser FLASH was developed. Since previous methods could only probe parts of the WDF, the method was improved by insertion of a rotatable toroidal focusing mirror, which allows for the full reconstruction of the four-dimensional WDF. The method was tested and qualified for beam characterization using known radiation sources of different complexity at LLG.

During 2018, the new setup was installed at FLASH2 in Hamburg and measurements of the WDF were conducted at a wavelength of 13 nm. The obtained data are now being evaluated at LLG. Some first results were presented at international conferences. Additionally, we applied for more beam time to record more data and implement optimizations on the experiment.



▲  
Abb. 2: Aufbau des Experiments in der FLASH2-Experimentierhalle. Links ist die Vakuumkammer mit dem Spiegel zu sehen, rechts die Mikroskopkamera mit dem Phosphor-Schirm. Dazwischen befindet sich ein Vakuumrohr, in dem der fokussierte Strahl verläuft.

Fig. 2: Experimental setup in the experimental hall of FLASH2. Left: vacuum chamber containing the rotatable mirror; right: microscope camera with phosphor screen. The focused FEL beam propagates towards the camera in the vacuum tube in between.



# Optik / Kurze Wellenlängen

## Optics / Short Wavelengths

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

Weiche Röntgen- und EUV-Strahlung ermöglichen 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 LLG werden auf Basis laserinduzierter Plasmen diverse kompakte Quellen für weiche Röntgen- und EUV-Strahlung im Spektralbereich von 1 – 20 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. Die Brillanz der Quelle konnte im letzten Jahr durch eine Verkürzung der Weglänge durch den Gasjet und damit verbunden geringere Reabsorption der emittierten Strahlung um mehr als einen Faktor 2 erhöht werden (siehe Abb. 1).

Darauf aufbauend wurde ein Labormesssystem für EUV-Strahlung entwickelt, das u.a. für Ablationsexperimente (siehe Fokusprofil und Ablation PMMA), aber auch für Metrologie zum Beispiel zur Qualifizierung von EUV-Sensoren geeignet ist. Zudem wird im Rahmen des SFB 755 „Nanoscale Photonic Imaging“ ein kompaktes Laborröntgenmikroskop für den Wellenlängenbereich des „Wasserfensters“ ( $\lambda = 2,2 \text{ nm} \dots 4,4 \text{ nm}$ ) betrieben, mit dem zum Beispiel Algen, Mikro-Organismen sowie das Bakterium *Deinococcus radiodurans* mikroskopiert wurden (siehe Abb. 2).

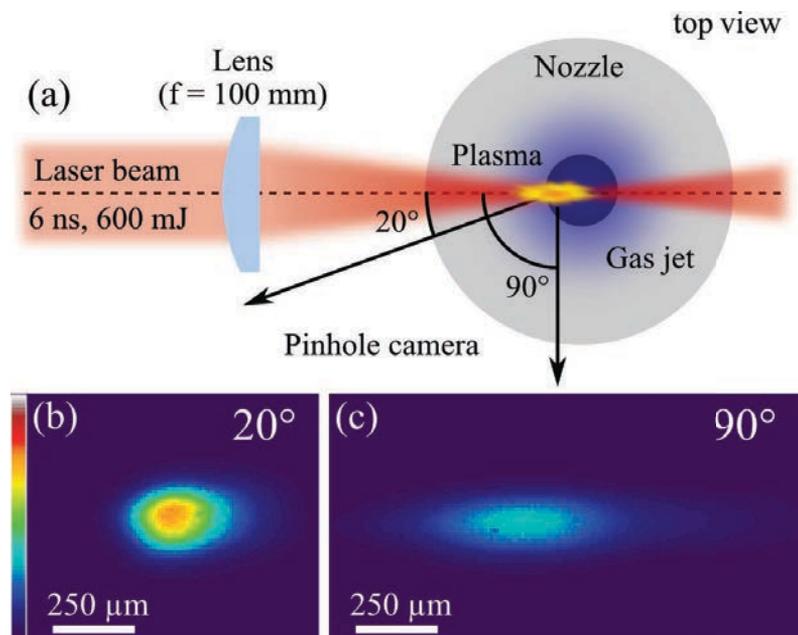


Abb. 1: (a) Schematische Darstellung der laserinduzierten Plasmaquelle und Lochkamerabilder eines Xenon-Plasmas, aufgenommen unter einem Winkel von (b)  $20^\circ$  und (c)  $90^\circ$  zur einfallenden Laserstrahlung.

Fig. 1: (a) Schematic drawing of the laser produced plasma source and pinhole camera images of a xenon plasma, taken under an angle of (b)  $20^\circ$  and (c)  $90^\circ$  referred to the incoming laser beam.

# Optik / Kurze Wellenlängen

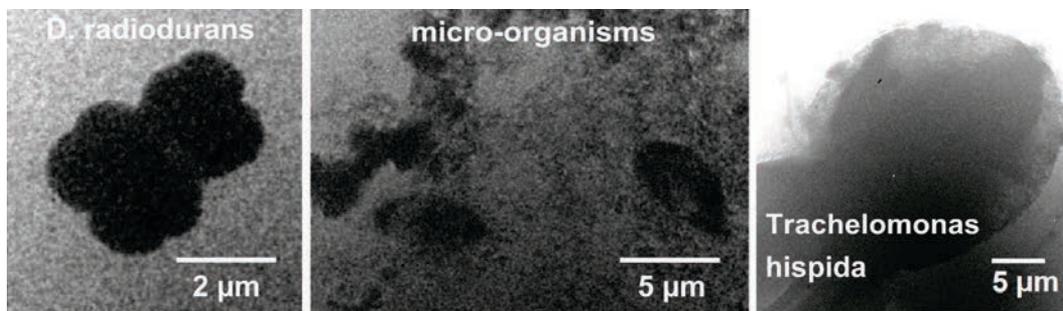
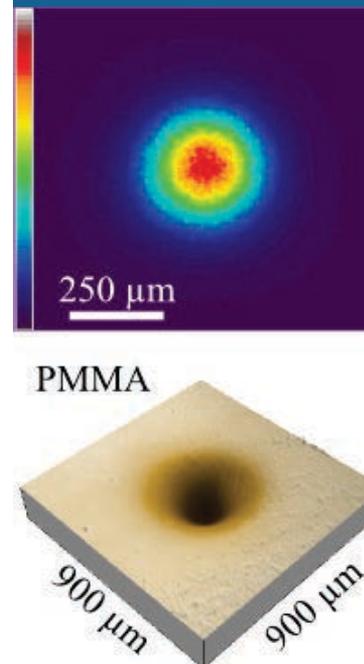
## Optics / Short Wavelengths

### 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  $\lambda = 13.5$  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 LLG make use of a pulsed gas jet as laser target, which allows, in contrast to other targets (solids, liquids), a long-term stable and clean operation in an extremely compact design. The source brilliance could be increased by more than a factor of 2 in the last year by shortening the path length through the gas jet and thus reducing reabsorption of the emitted radiation (see Fig. 1).

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, a compact laboratory X-ray microscope is operated in the "water window" spectral range ( $\lambda = 2.2 - 4.4$  nm) within the framework of the SFB 755 "Nanoscale Photonic Imaging", being used to image various algae, micro-organisms and also the polyextremophilic bacterium *Deinococcus radiodurans* (see Fig. 2).



▲  
Abb. 2: Mikroskopaufnahme des Bakteriums *Deinococcus radiodurans* (links), von eisenhaltigen Mikro-Organismen (mitte) und von der Alge *Trachelomonas hispida* (rechts) bei  $\lambda = 2,88$  nm (250-fach, eff. Pixelgröße 52 nm, 18 000 Pulse, Belichtungszeit 60 min). Die Probe *D. radiodurans* wurde von T. Salditt (Universität Göttingen) zur Verfügung gestellt.

Fig. 2: Soft X-ray micrograph of bacterium *Deinococcus radiodurans* (left), iron-containing micro-organisms (middle) and alga *Trachelomonas hispida* (right) recorded at  $\lambda = 2.88$  nm (250 $\times$ , effective pixel size 52 nm, 18 000 pulses, exposure 60 min). The *D. radiodurans* was provided by T. Salditt (University of Göttingen).

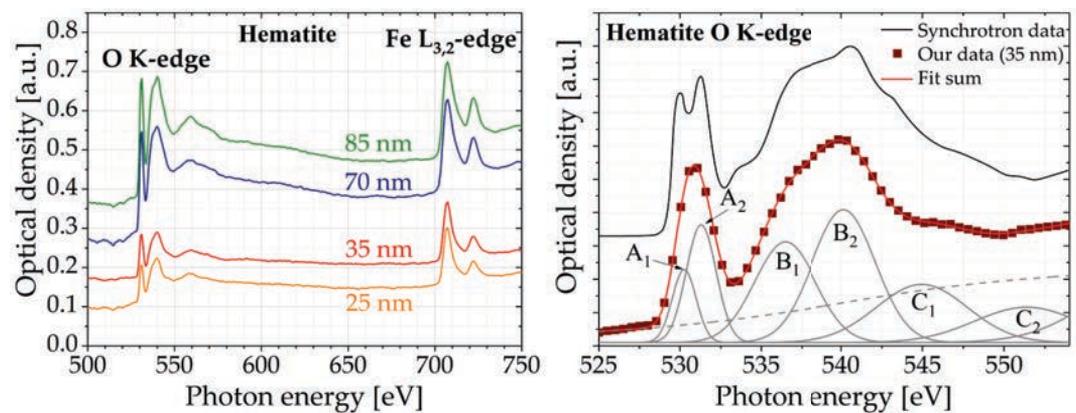
# Optik / Kurze Wellenlängen

## Optics / Short Wavelengths

### Röntgenabsorptionsspektroskopie (NEXAFS)

Auf Basis der kompakten Röntgenquelle wurde ein Labormesssystem zur Absorptionsspektroskopie für den Wellenlängenbereich von  $\lambda = 1 - 5$  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. Die Proben können dabei entweder im Vakuum oder an einer eigens für das kompakte Spektrometer entwickelten Helium-Probenkammer unter Atmosphärendruck untersucht werden.

Es wird bereits eine sehr gute Übereinstimmung mit vergleichbaren Messungen an Synchrotronquellen erzielt. Lediglich die spektrale Auflösung des Laborsystems muss weiter erhöht werden. Zu diesem Zweck wurde vom LLG gemeinsam mit drei kleineren Firmen das ZIM-Projekt ELaRA initiiert, das Ende 2018 bewilligt wurde.



▲ Abb. 1: (Links) NEXAFS-Spektren von Hämatit verschiedener Probendicken an der Sauerstoff-K- und der Eisen-L<sub>3,2</sub>-Kante. (Rechts) Analyse der 35 nm dicken Hämatitprobe an der Sauerstoff-K-Kante und Vergleich mit Synchrotrondaten von Brandt et al., *Chemical Geology* 329, 42-52 (2012).

Fig. 1: (Left) Oxygen K-edge and iron L<sub>3,2</sub>-edge NEXAFS spectra of hematite samples of different thickness. (Right) Analysis of the 35 nm thick hematite sample at the oxygen K-edge and comparison to synchrotron data taken by Brandt et al., *Chemical Geology* 329, 42-52 (2012).

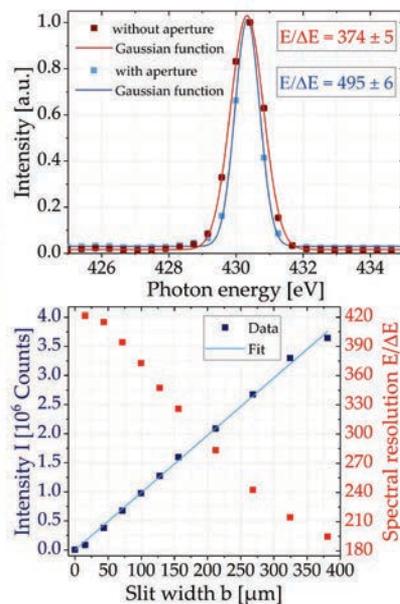
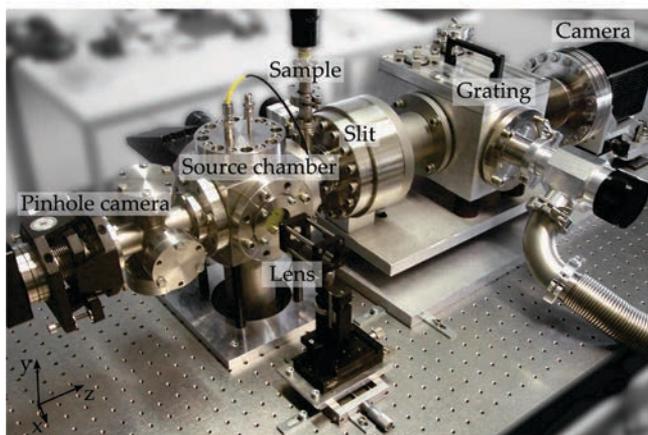
# Optik / Kurze Wellenlängen

## Optics / Short Wavelengths

### 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 target gas, it emits in the spectral range between  $\lambda = 1 - 5$  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 broad-band plasma radiation transmitted through a thin sample, divided by a reference spectrum without sample. The samples can be held in vacuum or in a Helium purged chamber specially developed for the compact NEXAFS spectrometer under atmospheric pressure.

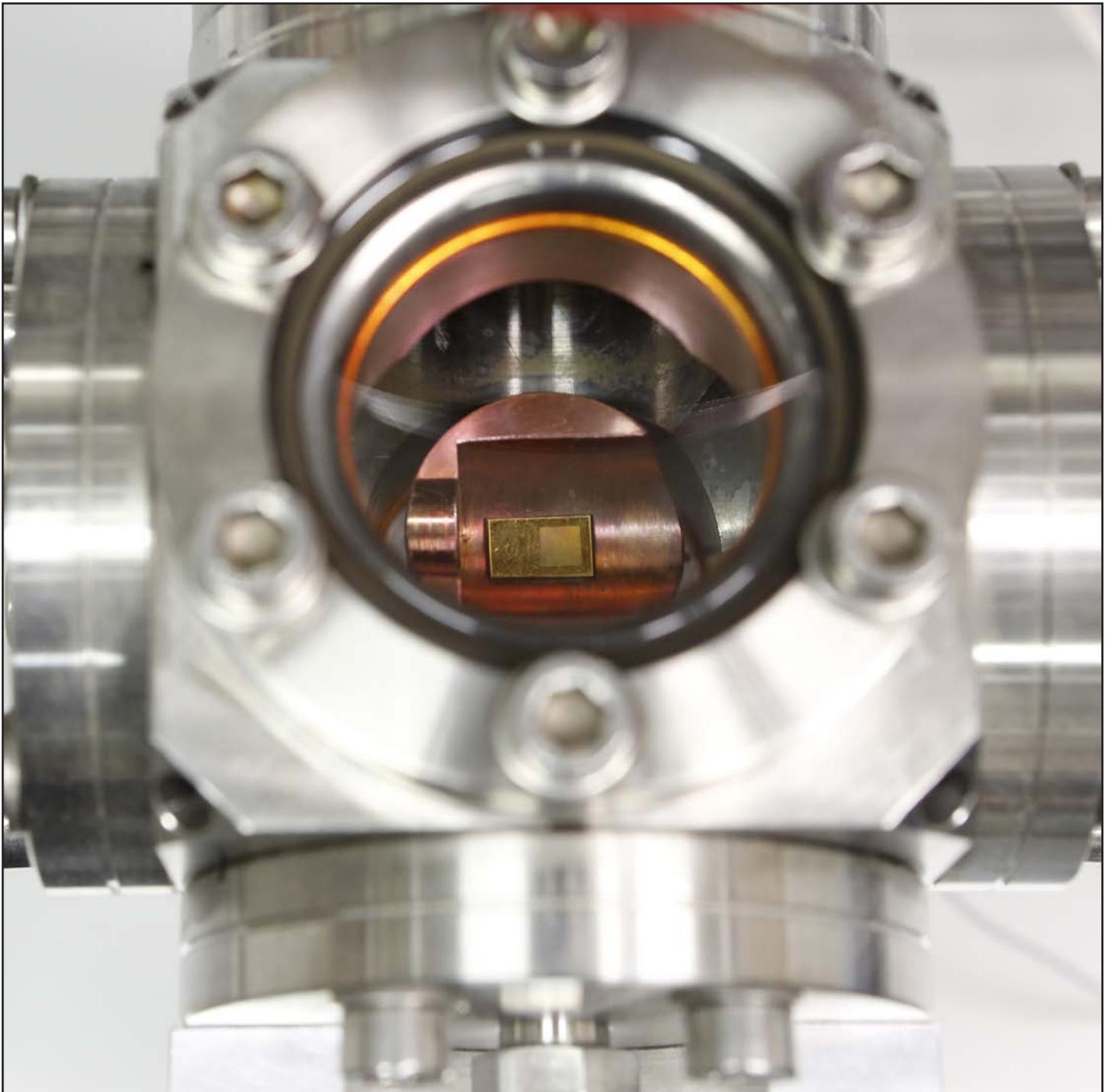
The measurements already achieve excellent agreement with comparable analyses at synchrotron sources. Only the spectral resolution of the laboratory system has to be further increased. For this purpose, LLG together with three small companies initiated the ZIM project ELARA that was granted end of 2018.



▲ Abb. 2: (Links) Foto des kompakten NEXAFS-Spektrometers und (rechts) spektrale Auflösung des Laborsystems, bestimmt anhand der Emissionslinie des Stickstoffs bei  $\lambda = 2,88$  nm (oben) mit und ohne zusätzlichen Quellschlitz (Breite  $100 \mu\text{m}$ ) und (unten) für verschiedene Spaltbreiten

Fig. 2: (Left) Photograph of the laboratory-scale NEXAFS spectrometer and (right) spectral resolution of the laboratory system determined by the emission line of nitrogen at  $\lambda = 2.88$  nm (top) with and without additional source slit (width  $100 \mu\text{m}$ ) and (below) for different slit widths

Berichte aus der Abteilung  
Departmental Reports



# Photonische Sensorik

## Photonic Sensor Technologies

Die Abteilung widmet sich der Entwicklung neuartiger optischer Messverfahren, überwiegend basierend auf Raman-Streuung, IR-Absorption und Fluoreszenz-emission, häufig in Kombination mit 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. Außer mit diesen Techniken befasst sich unsere Abteilung mit der Ionenmobilitätsspektrometrie (IMS) im Bereich der Spurenanalytik. Durch Kombination mit unserer spektroskopischen und chemometrischen Analytik ergibt sich ein sehr hohes Potenzial für innovative Anwendungen. Dazu gehören insbesondere Umweltanalytik, Vor-Ort-Analytik, Bioanalytik und Prozessanalyse.

Neben der Erfassung der Daten durch die photonische Messtechnik bildet die Erforschung der automatisierten Datenauswertung bei komplexeren Informationen einen weiteren Schwerpunkt. Das bedeutet für die von uns erforschte Explosivstoffdetektion: Daten verschiedener Sensoren, auch in Form komplexer Spektren, werden gesammelt und automatisch analysiert und die erhaltenen Informationen werden in einem Sensordatenfusionsprozess kombiniert. Die Ausgabe der Daten an den Endanwender erfolgt schließlich über ein einfaches Signal mit einer Ja-Nein-Entscheidung, hier zu der Frage, ob ein Explosivstoff vorhanden ist.

Weitere Beispiele für photonische Erfassung und automatisierte Datenauswertung sind die Detektion von Schadstoffen in Abwasser und die Bestimmung von CO<sub>2</sub>-Emissionen im Abgas.

The department devotes its research to the development of novel optical measurement procedures mainly based on Raman scattering, IR-absorption, and fluorescence emission, often combined with 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. The group additionally studies the complementary method of ion mobility spectrometry (IMS) in the field of trace analysis. Combining this technique with the spectroscopic and chemometric approaches, the research has great potential for innovative applications. This includes environmental analysis, on-site analysis, bioanalysis, and process control.

Besides recording of data by photonic sensors, the exploration of automated data evaluation on complex information is a major topic. This means in the case of explosives detection that data from different sensors, also in the form of sophisticated spectra, is collected, automatically analysed, and the information obtained is combined in a sensor data fusion process. The output of the result to the end users is processed by a yes/no decision; here, whether an explosive has been detected. Further examples of photonic acquisition and automated data analysis are the detection of pollutants in sewage and the determination of CO<sub>2</sub> emissions in exhaust gas.



**Dr. Hainer Wackerbarth**  
Abteilungsleiter

☎ +49-(0) 551/5035-58

📠 +49-(0) 551/5035-99

✉ hainer.wackerbarth@llg-ev.de

### Mitarbeiter

#### Staff members

Tobias Budig

Dr. Georgios Ctistis

Simon Göllner

Dr. Christoph Lenth

Fabian Müller

Christian Niklas

Vera Schalles

Stefan Scholz

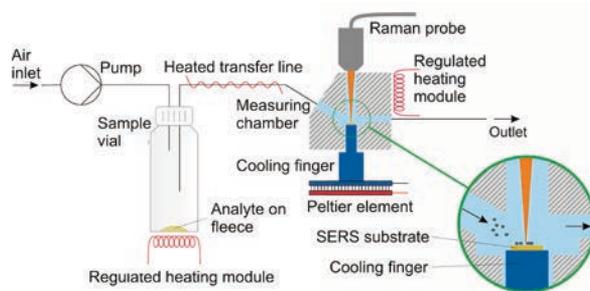
Florian Wieduwilt

# Photonische Sensorik

## Photonic Sensor Technologies

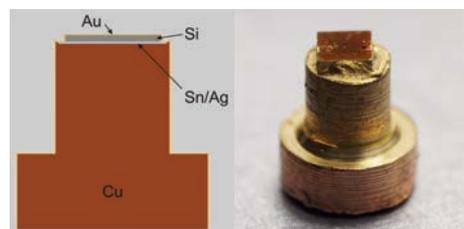
### Oberflächenverstärkte Raman-Spektroskopie in Kombination mit Kryofokussierung zur Explosivstoffdetektion

Sprengstoffdetektion ist – wie der Fund eines hochgefährlichen Sprengstoffs im Oktober 2016 in Chemnitz zeigte – ein sehr aktuelles und brisantes Thema. Die oberflächenverstärkte Raman-Spektroskopie ermöglicht das schnelle, fehlerfreie Aufspüren vieler Explosivstoffe, darunter auch Triacetontriperoxid (kurz: TATP). Dieser Sprengstoff wurde in Chemnitz sichergestellt und bei den Terroranschlägen im November 2015 in Paris verwendet.



◀ Apparatur zur Explosivstoffdetektion mittels Surface-enhanced Raman Spectroscopy (SERS).  
Schematic of the apparatus for the detection of explosives by means of surface-enhanced Raman spectroscopy (SERS).

Spuren von Explosivstoffen auf Kleidung oder an Gepäckstücken werden mittels sogenannter Wischtests von einem Vlies aufgenommen, welches aufgeheizt wird, um die verdampfenden Komponenten zu analysieren. Die geringen Substanzmengen stellen für die Raman-Spektroskopie, die so charakteristisch wie ein Fingerabdruck ist, eine große Herausforderung dar. Ein zentrales Anliegen unserer Forschung ist, die Nachweisgrenzen von Raman-basierten Analyseverfahren anhand des oberflächenverstärkten Raman-Effekts zu senken. Erst durch die Adsorption der Moleküle an einem plasmonischen Substrat werden die Signale bei diesen Verfahren so verstärkt, dass die Detektion von geringsten Konzentrationen, sprich eine Spurenanalytik, ermöglicht wird. Als plasmonische Substrate werden nanostrukturierte Edelmetalloberflächen eingesetzt. Um die Sprengstoffmoleküle auf dem plasmonischen Substrat zu sammeln, wird das Prinzip der thermischen Abscheidung genutzt. Dazu befindet sich die nanostrukturierte Oberfläche auf einem Kühlfinger. An diesem werden die zu analysierenden Substanzen, welche mittels der Thermo-desorptionseinheit aus dem Vlies ausgeheizt worden sind, auf einer minimalen Fläche wieder abgeschieden. Dieser Vorgang wird auch Kryofokussierung genannt. Ein wichtiger Aspekt ist die Konstruktion des Kühlfingers mit plasmonischer Oberfläche. Hierfür muss eine mechanisch stabile Verbindung eines dünnen nanostrukturierten Siliziumsubstrats mit Kupfer realisiert werden, welche maximale thermische Leitfähigkeit besitzt. Dies geschieht über ein spezielles Lötverfahren. Abschließend erhält die Si-Struktur durch Aufdampfen einer Goldschicht ihre plasmonischen Eigenschaften, so dass der Kühlfinger als SERS-Substrat fungieren kann. Mit dieser Technologie konnten 60 ng (60 Milliardstel Gramm) TNT nachgewiesen werden.



◀ Miniatur-Kühlfinger mit nanostrukturierter Goldoberfläche.  
Miniature cooling finger with nanostructured gold surface.

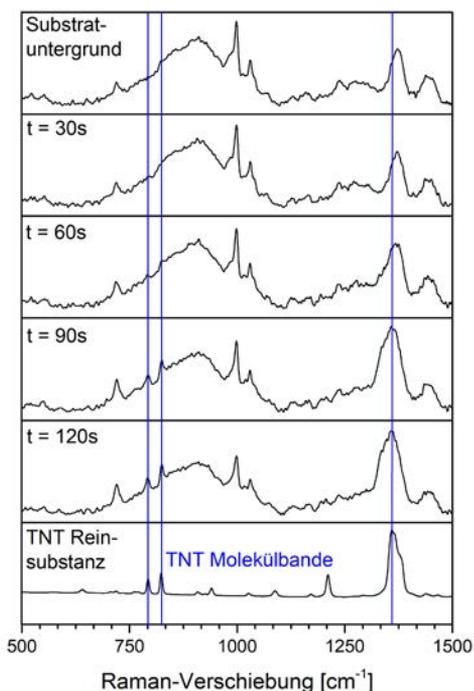
# Photonische Sensorik

## Photonic Sensor Technologies

### Surface-enhanced Raman spectroscopy in combination with cryofocussing for detection of explosives

Explosive detection is - as shown by the discovery of a high-risk explosive in Chemnitz in October 2016 - a highly topical and pressing issue. SERS-spectroscopy enables rapid, faultless detection of different classes of explosives including triacetone triperoxide (short:TATP). This explosive was confirmed in Chemnitz and was used in the terror attacks in Paris in November 2015.

Traces of explosives on clothing or on luggage are picked up with a fleece by means of the so-called wiping tests. The fleece is heated to analyse the vaporizable components. The low amounts of the substances are a big challenge for Raman spectroscopy, which is as characteristic as a fingerprint. A central concern of our research is to reduce the detection limits of Raman spectroscopy by means of the surface-enhanced Raman effect. The adsorption of the molecules on a plasmonic substrate is a prerequisite for the enhancement of the Raman signals. Thereby the detection of the lowest concentrations, i.e. trace analysis, is possible. Nano-structured noble metal surfaces are used as plasmonic substrates. The principle of thermal deposition is used to gather the explosive molecules on the plasmonic substrate. For this purpose, the nano-structured surface is located on a cooling finger. On to this surface, the substances to be analyzed, which have been baked out of the fleece by means of the thermal desorption unit, are redeposited on a minimal area. This process is also referred to as cryo-focussing. For this purpose, a mechanically stable connection of a thin nano-structured silicon substrate with copper must be realized which has maximum thermal conductivity. This is realized through a special soldering process. Finally, the silicon structure obtains its plasmonic properties by vapor deposition of a gold layer, so that the cooling finger can function as a SERS substrate. Using this technology, 60 ng (60 billionth gram) TNT has been detected.



◀ SERS-Spektren von 60 ng TNT, gemessen auf dem Temperierfinger der Messkammer. Zusätzlich dargestellt ist das Reinstoffspektrum von TNT.  
*SERS-spectra of 60 ng TNT measured on the tempering finger of the measurement chamber. Additionally, the pure TNT Raman spectrum is shown.*

# Photonische Sensorik

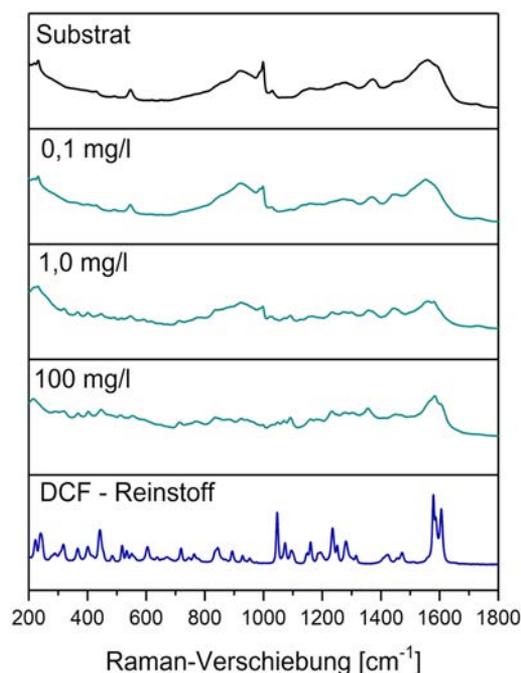
## Photonic Sensor Technologies

### Detektion von Arzneimittelrückständen im Abwasser

Über Haushaltsabwässer gelangen große Mengen an Arzneimittelrückständen in die kommunalen Kläranlagen. Sie stellen ein latentes Umweltproblem dar, wenn sie nicht durch den Klärprozess zurückgehalten werden. Für die Bestimmung dreier Leitsubstanzen, die sich im Abwasser finden lassen, Carbamazepin (Antiepileptikum), Diclofenac (Schmerzmittel und Entzündungshemmer) und Sulfamethoxazol (Antibiotikum), sind bisher nur aufwändige Laborverfahren auf Basis der Massenspektrometrie standardisiert. Ziel ist die Entwicklung eines Verfahrens, bei dem die oberflächenverstärkte Raman-Spektroskopie (SERS) als analytische Methode zur selektiven Detektion dieser Arzneimittelrückstände eingesetzt wird.

Zur Erzeugung des oberflächenverstärkten Raman-Effekts werden nanoskalige plasmonische Strukturen verwendet, die typischerweise aus Gold (Au) oder Silber (Ag) bestehen. Diese Kombinationen aus Edelmetalloberfläche und Nanostruktur ermöglicht die Anregung von Oberflächenplasmonen mit der Anregungswellenlänge des für die Raman-Messung verwendeten Lasers. Es resultieren lokale Überhöhungen des elektrischen Feldes, die zu einer Verstärkung der Raman-Signale führen. Die hohe Selektivität der oberflächenverstärkten Raman-Spektroskopie in Verbindung mit der hohen Signalausbeute ermöglicht eine Anwendung in der Spurenanalytik.

Herausforderungen stellen zum einen die reproduzierbare Herstellung dieser Nanostrukturen und zum andern die Bindung der Analyten an die Oberflächen dar. Mit den Substraten unseres Projektpartners AMO GmbH ist es aktuell möglich, Analytkonzentrationen  $\leq 1,0$  mg/l nachzuweisen. Um geringere Substanzmengen detektieren zu können, wird jedoch ein Aufkonzentrationsschritt benötigt, der den Analyten selektiv aus dem untersuchten Abwasser anreichert. Diese Aufkonzentration soll zukünftig durch den Einsatz von Magnetic Beads realisiert werden, deren Oberflächen mit Antikörpern belegt sind.



◀ Diclofenac (DCF), nachgewiesen auf Substrat C7 der AMO GmbH.  
Diclofenac (DCF) measured at the C7 substrate of our partner AMO GmbH.

# Photonische Sensorik

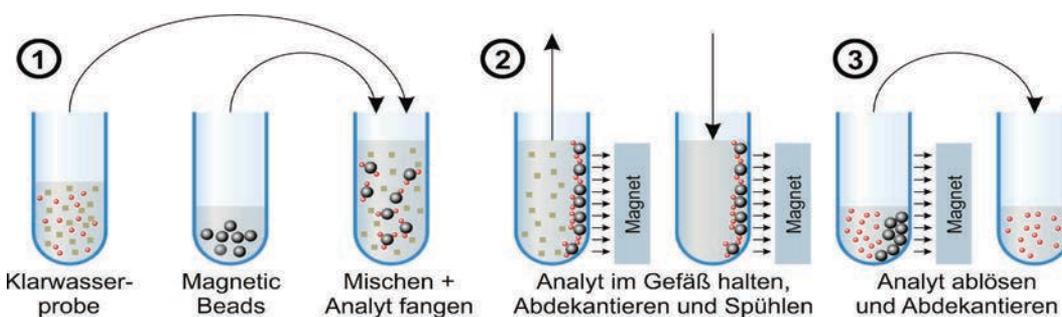
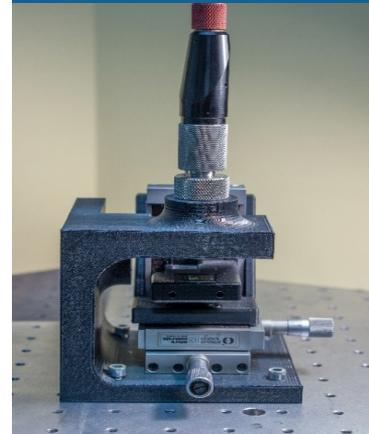
## Photonic Sensor Technologies

### Detection of medical residues in sewage

Large amounts of medical residues end up in municipal sewage treatment plants by means of domestic waste water. Medical residues like carbamazepine (anti-convulsant), diclofenac (analgetic and anti-inflammatory), and sulfamethoxazole (antibiotic) present a latent environmental problem, if they are not retained by sewage treatment plants. For the identification of these medical residues only elaborate lab procedures based on mass spectrometry are standardized. Our goal is the development of a procedure based on surface-enhanced Raman scattering (SERS) spectroscopy as an analytical method for the selective detection of medical residues.

For generation of the surface-enhanced Raman effect, nanoscale plasmonic structures have been used which usually consist of gold (Au) or silver (Ag). The combination of a noble metal surface and nano-sized structures permits the excitation of localized surface plasmons through the exciting laser being used for the Raman measurements. The result is a tremendous increase of the local electric field, which leads to an enhancement of the Raman scattering signal. The high selectivity combined with the large signal output make this a suitable technique for trace analysis. Major challenges yet are the reproducible manufacturing of the desired nano-structures and the adsorption of the target analyte on the given metal surface.

Presently, the SERS-substrates of our partner AMO GmbH allow us to detect analyte concentrations  $\leq 1.0$  mg/l. For the detection of smaller quantities, an additional procedure is needed which selectively concentrates the analyte in the wastewater. This procedure is going to be realized by the application of magnetic beads coated with antibodies.



Aufkonzentration von Analyten durch Magnetic Beads.  
*Concentration of analytes using magnetic beads.*

# Photonische Sensorik

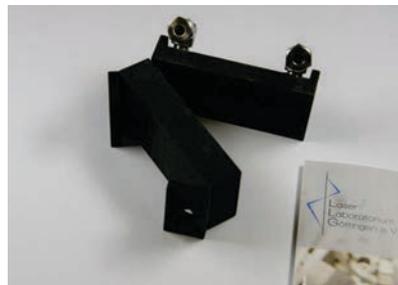
## Photonic Sensor Technologies

### Entwicklung eines optischen Sensors zur Überwachung der Abgaszusammensetzung in kleinen Feuerungsanlagen

Kleine und mittlere Feuerungsanlagen erzeugen durch das Verbrennen von Holz, Kohle, Öl oder Gas Wärme zum Heizen von Gebäuden. In Deutschland gab es 2016 etwa 13 Millionen Gasheizkessel, 5,6 Millionen Ölheizkessel und 0,7 Millionen Heizkessel für feste Brennstoffe. Darüber hinaus gab es etwa 11,7 Millionen Kaminöfen oder Kachelöfen, die mit Holz oder Kohle beheizt werden.<sup>1</sup>

Die in den dabei ablaufenden Verbrennungsprozessen entstehenden Abgase beeinträchtigen Umwelt, Klima und Gesundheit und unterliegen daher Grenzwerten. Diese sind für kleine und mittlere Feuerungsanlagen in der Bundes-Immissionsschutzverordnung festgelegt.

Zur Kontrolle der Einhaltung werden durch den Schornsteinfeger im Zweijahresrhythmus Messungen relevanter Parameter wie Kohlenmonoxid (CO) und Sauerstoff (O<sub>2</sub>) durchgeführt. Hierzu werden elektrochemische Sensoren eingesetzt, welche aufgrund ihrer Bauweise häufigen Wartungsintervallen unterliegen und verschleifen. Zudem kann das Treibhausgas und Hauptverbrennungsprodukt Kohlenstoffdioxid (CO<sub>2</sub>) nicht direkt elektrochemisch detektiert werden. Seine Konzentration wird daher aus den Messgrößen für CO und O<sub>2</sub> lediglich berechnet, was eine Fehlerquelle bei der Emissionsbestimmung darstellt.



- ◀ Prototyp der Messzelle zur CO-Detektion. Die kompakte Multipassgeometrie liefert eine lange Absorptionslänge.  
*Prototype of the gas-cell for CO measurements. The compact multi-pass geometry allows a long absorption length.*

Ziel unserer Arbeiten gemeinsam mit der Vereta GmbH ist die Entwicklung eines optischen Sensors, der die Konzentrationen von CO, CO<sub>2</sub> und O<sub>2</sub> im Abgasstrom von Verbrennungsanlagen simultan misst. Zur Messung wird die nichtdispersive Infrarotspektroskopie (NDIR) eingesetzt, bei der die Intensität des eingestrahlt Lichts durch Absorption an Molekülen abfällt. Diese nichtlineare Abnahme, die durch das Lambert-Beer'sche Gesetz beschrieben wird, liefert einen direkten Hinweis auf die Konzentration der Gase im Abgasstrom. Die Verwendung des mittleren Infrarotbereichs des elektromagnetischen Spektrums bringt dabei den Vorteil hoher Absorptionsquerschnitte und kleiner spektraler Überlagerung der einzelnen Absorptionsbanden von CO<sub>2</sub> und CO.

Kurze Messstrecken für einen kompakten Aufbau haben vielversprechende Ergebnisse geliefert. Hierfür wurden zudem unterschiedliche Elektroniken genutzt, bei welchen sich die Lock-In-Technik als Vielversprechendste zeigte. Trotz ähnlicher erzielter Auflösungen für CO und CO<sub>2</sub>, ist aufgrund der Toxizität von CO für dieses Gas eine noch bessere Auflösung notwendig, da bereits 60 ppm gesundheitliche Folgen hat. Weitere Zielsetzungen in diesem Projekt sind die Optimierung des CO-Aufbaus und die Zusammenführung der beiden separaten Aufbauten für CO<sub>2</sub> und CO.

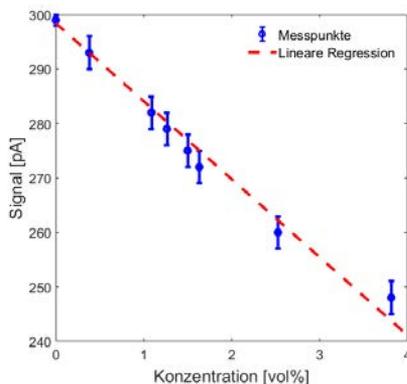
# Photonische Sensorik

## Photonic Sensor Technologies

### The development of an optical sensor to control exhaust gases in small firing places

In 2016, there were approximately 13 million gas boilers, 5.6 million oil heating boilers, and 0.7 million heating boilers for solid burning materials in Germany. Furthermore, there were approximately 11.7 million fireplaces or tile ovens, which operate with either wood or coal.<sup>1</sup> The exhaust gases from these combustion processes affect the environment, climate, and health and therefore are controlled by federal regulations, as stated in the "Federal Emissions Protection Regulation" for small- and medium-sized firing systems.

To control these regulations, a chimney sweep measures the relevant parameters such as carbon monoxide (CO) and oxygen (O<sub>2</sub>) every two years. For these monitoring measurements, electrochemical sensors are used, which require frequent inspections and undergo heavy wear due to the way in which they are constructed. Furthermore, the greenhouse gas and main combustion product carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) is not detected by electrochemical sensors. Its concentration is determined through CO and O<sub>2</sub>, resulting in an error for the calculation of the emission.



◀ Beispielmessung mit CO. Es wird eine Auflösung von knapp 70 ppm erreicht.  
Measurement example with CO, achieving a resolution of approx 70 ppm.

The goal of our work, in collaboration with Vereta GmbH, is the development of an optical sensor which can simultaneously measure the concentration of CO and CO<sub>2</sub> in the exhaust gas of a firing system. As measurement technique, the non-dispersive infrared spectroscopy (NDIR) is used. With the help of the Beer-Lambert law, the concentration of the gases in the exhaust gas flow can be determined. Working in the mid-infrared regime has the advantage of large absorption cross sections and a small overlap of the absorption bands of CO<sub>2</sub> and CO.

Short measurement lengths in a compact setup have delivered promising results. Different electronics and techniques were used, where the Lock-In technique was the most promising. Even though the resolutions of CO and CO<sub>2</sub> achieved is similar, based on the toxicity of CO where a concentration of 60 ppm already has effects on health, a better resolution is necessary. The next steps of the project are the optimization of the CO setup as well as the combination of the CO<sub>2</sub> and CO setup.

<sup>1</sup> Quelle: Homepage Umweltbundesamt.

<sup>1</sup> Source: Homepage Federal Environmental Agency.

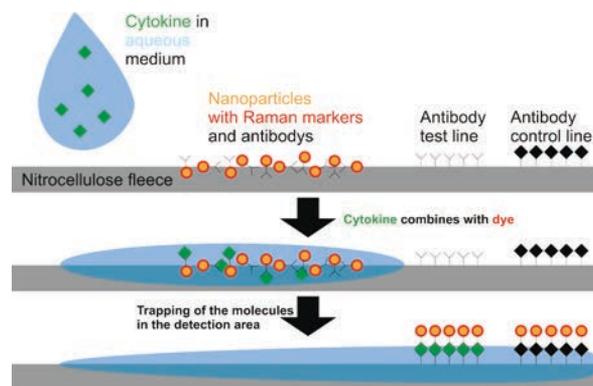
# Photonische Sensorik

## Photonic Sensor Technologies

### Entwicklung eines hochempfindlichen Analysators und eines chemometrischen Verfahrens zum Ablesen von Lateral-Flow-Tests (LFTs) mit Hilfe der oberflächenverstärkten Resonanz-Raman-Streuung (SERRS)

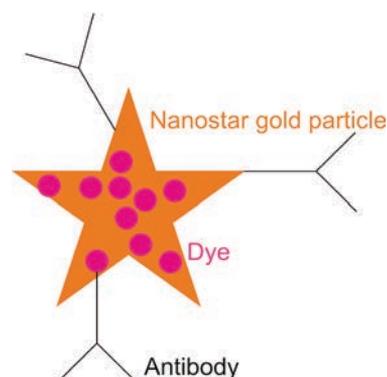
Der Nachweis von Zytokinen ist ein wichtiges Thema in der Tiermedizin. Traditionelle Labormethoden der Humanmedizin sind hierbei oft zu teuer, so dass Lateral-Flow-Tests (LFTs) eine willkommene Alternative darstellen. Leider weisen diese Tests selbst bei automatisierter Auslesung unter Verwendung von Fluoreszenzfarbstoffen zu niedrige Nachweisgrenzen auf. Ziel des Projekt ist die Entwicklung eines neuen Auslesesystems mit Raman-aktiven Farbstoffen. Dies klingt zunächst aufgrund der geringen Quanteneffizienz der Raman Streuung widersprüchlich. Bei den Raman-aktiven Farbstoffen können jedoch zwei Effekte kombiniert werden: resonante Anregung der Farbstoffmoleküle und Oberflächenverstärkung. Letztere tritt auf, wenn sich das Molekül in der Nähe einer nanostrukturierten Edelmetalloberfläche befindet. Dabei tritt eine Feldverstärkung durch die Kopplung des Lichts mit den Oberflächenplasmonen der Metalloberfläche auf.

Diese Kombination wird als oberflächenverstärkte Resonanz-Raman-Streuung (SERRS) bezeichnet und bietet eine enorme Verbesserung des Signal-zu-Rausch-Verhältnisses.



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

Als Farbstoffe kommen bei LFTs oft Silber- oder Gold-Nanopartikel zum Einsatz. Solche Partikel können so gestaltet werden, dass besagte Oberflächenplasmonen in ihnen angeregt werden können. Besonders hohe Verstärkungen lassen sich in der Form von Nanosternen erzielen. Diese Nanosterne werden mit resonant anregbaren Farbstoffen versehen. Das LLG ist dabei eines der ersten Institute, die den praktischen Nutzen dieser Partikel erforscht.



◀ Nanostern, funktionalisiert mit Raman-aktivem Farbstoff und Antikörpern für den Einsatz in LFTs.  
Nanostar functionalized with Raman-active dye and antibodies for use in LFTs.

# Photonische Sensorik

## Photonic Sensor Technologies

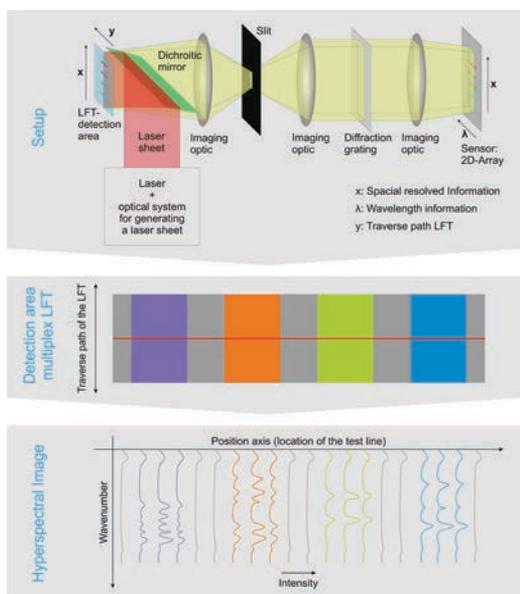
### Development of a highly sensitive analyzer and a chemometric procedure for read-out of lateral flow tests (LFTs) by means of surface-enhanced resonance Raman scattering (SERRS)

The detection of cytokines is an important issue in veterinary medicine. Traditional laboratory methods used in human medicine are often too expensive. Therefore, lateral flow tests (LFTs) pose a welcome alternative. Unfortunately, these tests show detection limits which are too low, even if performed with automated readout using fluorescent dyes.

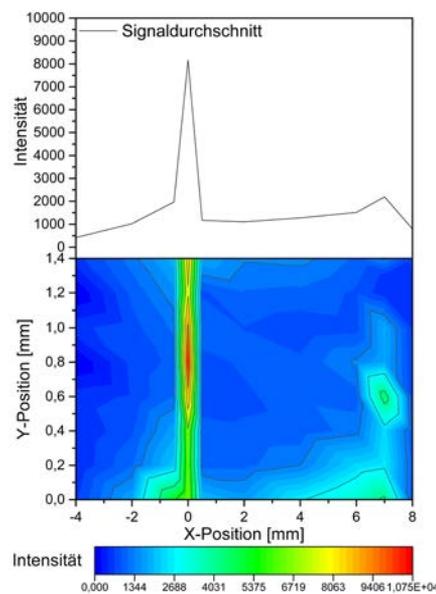
The aim of the project is the development of a new read-out mechanism based on Raman-active dyes. This might sound contradictory due to the inherent low quantum efficiency of Raman scattering. Yet, using Raman-active dyes, two effects can be combined: resonant excitation of the dye molecules and surface-enhanced Raman scattering. The latter getting strong when a molecule comes into the vicinity of a nanostructured noble metal surface. Thereby, a field enhancement arises through the coupling of the light with the surface-plasmons of the metal surface.

The combination of the two effects is the so-called surface-enhanced resonance Raman scattering (SERRS) and provides a tremendous enhancement of the signal-to-noise ratio.

As dyes, either silver or gold nanoparticles are often used in LFTs. The particles can be designed in a way that surface-plasmons can be excited. The shape of the nanostars can achieve tremendous enhancements. These nanostars are coated with dyes, which can resonantly excited. LLG is one of the first institutes to explore the practical benefits of these particles.



▲ Apparatur zum Auslesen des LFTs und Funktionsprinzip.  
Apparatus for read-out and functional principle of LFTs.



▲ Abrasterversuch eines LFTs mit deutlicher Nanostern-Belegung an der Kontrolllinie.  
Scan across a LFT with a high concentration of nanostars at the control line.

# Projekte

## Projects

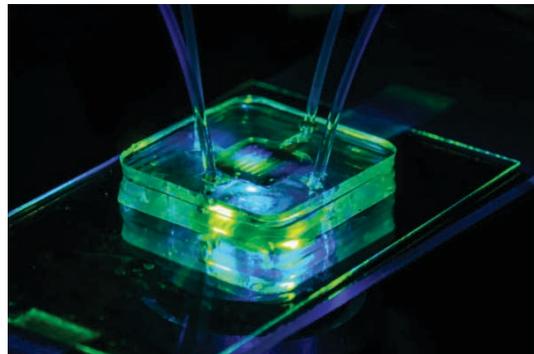
Advanced Microfluidic  
Systems GmbH

### Neue Ausgründung vom Laser-Laboratorium Göttingen e.V.

Am 16. Oktober 2018 trafen sich im Notariat Menge Noack in Göttingen Vertreter von Industrie, der Max-Planck-Gesellschaft und eines befreundeten Instituts mit dem ehemaligen Vorstandsmitglied des LLG, Professor Dr. Gerd Marowsky, um die neue Firma

### **Advanced Microfluidic Systems GmbH**

zu gründen. Deren Handelsregistereintragung erfolgte am 13. November 2018 und die neue Firma ist seitdem in den Räumlichkeiten des Laser-Laboratoriums Göttingen e.V. aktiv. Diese Neugründung befasst sich mit der Entwicklung, dem Bau und dem Handel mikrofluidischer und analytischer Systeme für Forschung und Industrie sowie dem Vertrieb von Komponenten auf dem Gebiet der Optomikrofluidik (Mikrofluidik mit Lasern). Daneben entwickelt und vertreibt die Firma neue Systeme zur Erzeugung von flüssigen Mikrostrahlen, unter anderem zur Bereitstellung eines flüssigen Targets unter Vakuumbedingungen. Dazu gehören auch ausgewählte Komponenten wie Düsensysteme zur Erzeugung von Flüssigkeitsstrahlen in Rund- oder Flachstrahlgeometrien. Die am Rand der Seite zu sehende Abbildung zeigt die freistehende Flüssigkeitsschicht eines Flachstrahls mit Abmessungen von etwa 3 mm x 1 mm. Die Dicke eines solchen Flüssigkeitsblattes kann im Mikrometer- bis Submikrometerbereich variiert werden.



◀ Mikrofluidischer Chip, angeschlossen und in funktioneller Halterung.  
*Microfluidic chip connected in functional mount.*

Ein weiteres Standbein der neuen Firma ist die Herstellung mikrofluidischer Chips mittels Cryoplotting. Dabei werden die zu entwickelnden Kanäle mit Wassereis aufgedruckt und anschließend mit einem Polymer übergossen. Das Wasser kann rückstandslos entfernt werden und es sind keine weiteren Chemikalien erforderlich. Dieses Verfahren eignet sich mit seiner sehr kurzen Herstellungszeit von unter zehn Minuten besonders gut für die schnelle Prototypenfabrikation. Die Abbildungen zeigen einen derartigen Chip und dessen funktionale Halterung mit Anschlüssen.

Advanced Microfluidic Systems ist international tätig, wobei jedoch großer Wert auf die Einbindung regionaler Unternehmen als Zulieferer gelegt wird. Aktuell arbeitet die Firma noch mit wenigen Angestellten, aber es ist kurzfristig die Einstellung weiterer Mitarbeiter geplant. Weiterhin ist gemäß Satzung die Einrichtung einer Zweigniederlassung in Leipzig vorgesehen.

# Projekte Projects

## New spin-off from the Laser Laboratorium Göttingen e.V.

On 16th October 2018, representatives from industry, Max Planck Society, and a partner institution met with the former Board Member of LLG, Professor Dr. Gerd Marowsky, in the advocate office Menge Noack in Göttingen to establish the new company:

### **Advanced Microfluidic Systems GmbH**

On 13th November 2018 the commercial registration took place. Since then, the new company is active in the rooms of the Laser Laboratorium Göttingen e.V.. The topic of this new spin-off is the development, manufacture, and trading of microfluidic and analytical systems for research and industrial applications as well as the sales and distribution in the field of opto-microfluidics (microfluidics and lasers). Alongside, new systems for operating liquid microjets, even under vacuum conditions, are developed and sold. This includes specific components like nozzle systems for generating liquid microjets with cylindrical or flat geometries. The picture shown on the frame on this site depicts a freely flowing liquid sheet with dimension of about 3 mm x 1 mm. The thickness of such a flat liquid sheet is adjustable in the micro- to sub-micrometer range.



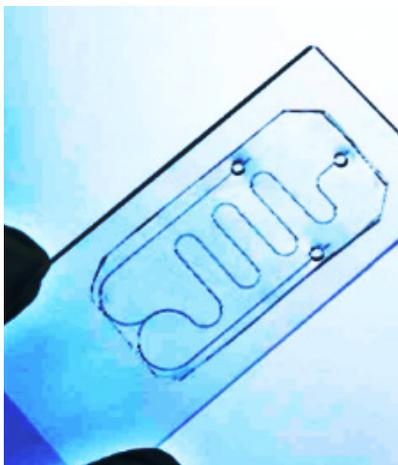
**Ansprechpartner:**

**Prof. Dr. Gerd Marowsky**

☎ +49 551/5035-30

☎ +49 551/5035-99

✉ [gmarows@gwdg.de](mailto:gmarows@gwdg.de)



◀ Mikrofluidischer Chip auf Standard-Objektträger (76 mm x 26 mm, Glas) als Substrat mit Mikrokanälen und Anschlüssen.

*Microfluidic chip on a standard object slide (76 mm x 26 mm, glass) as substrate with micro channels and connections.*

Another mainstay of the new enterprise is the production of microfluidic chips applying cryo-plotting. Micro-channels are developed on a substrate, i.e. glass, by 3D printing water ice on its surface and afterwards covering them with a polymer compound. The water is easily removed while no additional chemicals are required at all. This procedure with a very short lead time of less than ten minutes is perfectly suitable for rapid prototyping. The pictures show such chip and its functional mount with connections.

Advanced Microfluidic Systems is acting internationally, but pays a lot of attention to involve local companies as suppliers. Currently, the company is working with just a few employees and intends to expand its staff shortly. Further, according to its charter, a branch office is planned in Leipzig.

# Projekte

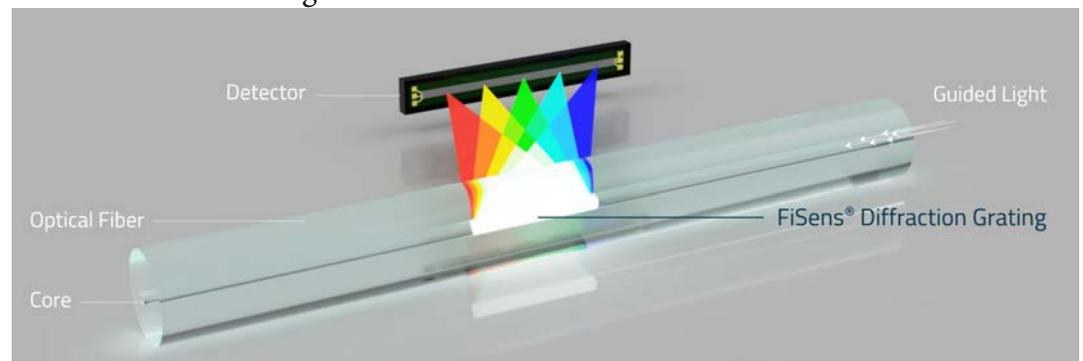
## Projects

### Der Photonik Inkubator - Entwicklung in 2018

Das Jahr 2018 ist für den Photonik Inkubator sehr erfolgreich verlaufen. Die Ausgründung FiberSense aus dem Jahr 2017 hat sich sehr gut weiterentwickelt und es wurden neue Firmen aus den PI-Projekten heraus gegründet.

Die in Göttingen im Jahr 2014 gegründete **Photonik Inkubator GmbH** – kurz PI - mit Firmensitz in den Räumen des Laser-Laboratoriums Göttingen bietet unverändert Unternehmensgründern mit zukunftssträchtigen Ideen ein sehr gutes Umfeld für deren Umsetzung in marktfähige Produkte. Innovative Forschungsvorhaben aus den Bereichen Photonik/optische Technologien und Plasma in Göttingen, in Niedersachsen, aber auch bundesweit werden von hier aus betreut.

Aus dem ersten Projekt "**FiberLab**" des PI ist zunächst in 2017 die **FiberSense UG** geworden, aus der in 2018 die **FiSens GmbH** mit Sitz in Braunschweig entstanden ist. Diese neue Gesellschaft produziert mit einem speziellen Laserverfahren ultraminiaturisierte Messsysteme und Sensoren unter Verwendung von handelsüblichen Glasfasern. Mittels eingeschriebener Faser-Bragg-Gitter können mit einer derartigen Faser Druck, Temperatur, Dehnung und sogar die drei dimensionale Verformung der Faser im Raum mit Hilfe eingekoppelter Lichtstrahlung ermittelt werden. Die Sensoren können entsprechend den Kundenwünschen hergestellt und als "Nerven aus Glas" in unterschiedlichste Geräte und Umgebungen eingesetzt werden. Zusätzlich ist es der **FiSens GmbH** gelungen, eine einzigartig einfache Methode vorzustellen, um die Lichtinformationen der verschiedensten Glasfasersensoren als Spektrometer zu nutzen und hierdurch gänzlich neue Anwendungsgebiete für faseroptische Sensoren zu erlauben. Die beiliegenden Abbildungen zeigen Details der FiSens Entwicklung.



▲  
Das Prinzip eines derartigen Streugitter-Spektrometers.  
The principle of such a diffraction grating-spectrometer.

Die bereits in 2017 geplante Investitionsrunde konnte mit bewährten Partnern im Frühjahr 2018 umgesetzt werden und es gelang, weitere 1,7 Mio. € frisches Kapital zu akquirieren zum Aufbau einer eigenen Produktionsanlage. Aktuell bezieht die FiSens GmbH in den ehemaligen Rolleiwerken Räumlichkeiten von über 400 m<sup>2</sup>, die die jährliche Herstellung von über einer Million faseroptischer Sensoren und ca. 10.000 Spektrometersystemen ermöglichen werden. Die Gesellschaft arbeitet eng mit anderen PI-Partnern zusammen und entwickelt z. B. ein faseroptisches Refraktionsmessgerät für das PI-Projekt "**Patientensicherheit 4.0**".

# Projekte

## Projects

### The Photonik Inkubator - Development in 2018

The year 2018 turned out to be very successful for the Photonics Incubator. The start-up FiberSense (founded in 2017) performed very well and new start-up companies were founded out of the PI-projects.

The **Photonik Inkubator GmbH** (PI) was founded in Göttingen in 2014 and is located at the Laser Laboratorium Göttingen. It offers potential start-up founders with promising ideas a high quality environment for turning their ideas into marketable products. Innovative research projects in the field of photonics, optical technologies, and plasma from Göttingen in Lower Saxony and other federal states of Germany are supervised by the PI.

In 2017 the first start-up **FiberSense UG** was established out of the "**FiberLab project**", and was reorganized in 2018 as **FiSens GmbH**. It is based in Brunswick in Lower Saxony and produces ultra-miniaturized measuring systems and sensors within standard glass fibers using special laser processing. These glass fibers with inscribed Fiber Bragg Gratings make it possible to determine pressure, temperature, strain, and also three dimensional torsion by using light. The sensors are produced according to customer requirements and are implemented as "nerves of glass" in various equipment and environments. Additionally, **FiSens GmbH** managed to successfully introduce a unique and simple method of using the light information from different glass fiber sensors as a spectrometer and hence to establish entirely new fields of applications for fiber optical sensors. The accompanying figures show details of the FiSens products.



◀ Kleine Bauweise eines Streugitter-Spektrometers.  
*An extremely compact diffraction grating spectrometer.*

The first round of financing, which was planned in 2017, was carried out in Spring 2018 with reliable partners and 1.7 M € fresh venture capital was acquired for the erection of an own production plant in Brunswick. Currently, FiSens GmbH is moving into premises of the former Rollei-plant with over 400 m<sup>2</sup> at its disposal that will allow the annual production of more than one million fiber optical sensors and approximately 10,000 spectrometer systems. The company works closely with other PI-partners and develops, for example, a fiber optical refractometer unit for the PI-project "**Patient Safety 4.0**".

## Projekte Projects

Aus dem Projekt "**SurPlas**" wurde in 2018 die **DBD Plasma GmbH** ausgegründet mit Sitz in Gleichen bei Göttingen. Sie entwickelt Geräte zur Oberflächenaktivierung mittels Atmosphärendruck-Plasma für die Druckindustrie. Die modular aufgebauten Geräte können schnell und individuell an die Bedürfnisse der Kunden angepasst werden und leisten durch den vollständigen Ersatz nasschemischer Inline-Verfahren einen wertvollen Beitrag zur Ressourcenschonung, Kostoptimierung und Arbeitssicherheit in der Produktion. **Die DBD Plasma GmbH** wird durch einen privaten Investor in signifikanter Höhe finanziert.

Als dritte Ausgründung ist zum Jahresende 2018 aus dem Projekt "**OptoGenTech**" die **OptoGenTech GmbH** mit Sitz in Hannover und Lehrte hervorgegangen. Das Projekt selbst wurde im Jahresbericht 2017 des LLG ausführlich mit mehreren Abbildungen beschrieben. Die **OptoGenTech GmbH** stellt Materialien und Ausrüstung für Versuche in den Bereichen Tissue-Engineering und biologische Systeme her, die unter anderem zur Zulassung optogenetischer Implantate notwendig sein werden. Die Optogenetik, die Steuerung von genetisch modifizierten Zellen mit Licht, ist ein sich derzeit schnell entwickelnder Ansatz, in dem Methoden der Photonik derzeit die Lebenswissenschaften revolutionieren. Gegenüber der etablierten und auch klinisch weit verbreiteten elektrischen Zellstimulation (Beispiele: Herzschrittmacher, tiefe Hirnstimulation, Cochlea-Implantat) erlaubt die Optogenetik eine zelltypspezifische und räumlich begrenzbar optische Steuerung der Zellaktivität.

Das noch in Inkubation befindliche Projekt "**SUPERLIGHT Photonics**" in Braunschweig überführt Mikro- und Nano-LED-Technologien auf der Basis von Gallium-nitrid (GaN) in Produkte für die Sensorik, Analytik sowie Prozesstechnologie. Das Hauptprodukt für das geplante Start-up ist eine nur wenige Millimeter große Mikro-LED-Basis für ortsaufgelöste Fluoreszenzanregung. Diese eröffnet neben einer hohen Ortsauflösung auch eine hohe zeitliche Auflösung und führt so zu vollkommen neuen Möglichkeiten für die Medizin- und Biotechnik beziehungsweise die Biophotonik. Die intelligent gesteuerte, strukturierte Beleuchtung wird aber auch neue Anwendungsfelder in der Gasanalytik, Point-of-Care-Diagnostik und Materialanalyse erschließen können.



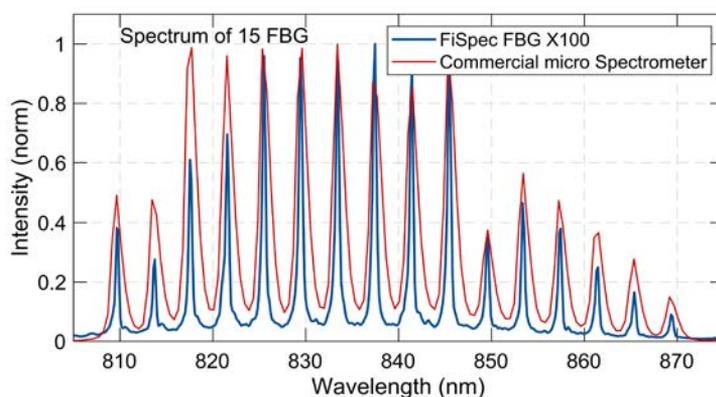
# Projekte

## Projects

In 2018, **DBD Plasma GmbH** was founded out of the project "**SurPlas**" with its head office in Gleichen near Göttingen. It engineers equipment for surface activation by atmospheric-pressure plasma for the printing industry. The modularly constructed devices are easily and individually customized, and contribute enormously by totally replacing wet-chemical in-line-processing to conserve resources, optimize cost and enhance work safety in production. **DBD Plasma GmbH** is significantly financed by a private investor.

At the end of 2018, **OptoGenTech GmbH** was the third start-up to be established. It originated from the project "**OptoGenTech**" and is based in Hanover and Lehrte. The project was described in detail with several illustrations in the annual report 2017 of the LLG. **OptoGenTech GmbH** produces material and equipment for experiments in tissue engineering and biological systems that are, amongst other things, necessary for the approval of optogenetic implants. Optogenetics, the control of genetically modified living tissue using light, is a rapidly developing approach that currently revolutionizes the life sciences by physical methods. In comparison with established and clinically widespread electric cell stimulation methods (e. g. cardiac pacemaker, deep brain stimulation, cochlea implant), optogenetics permits cell specific and spatially limited optical control of cell activity.

The project "**SUPERLIGHT Photonics**", which is still under incubation in Brunswick, transforms micro- and nano-LED technologies based on Gallium nitride (GaN) into products for sensor systems, analytics and process technologies. The main product for the planned start-up is a few millimeters large micro-LED platform for fluorescence excitation with high spatial resolution. In addition to high spatial resolution, it also provides high temporal resolution and hence leads to entirely new possibilities for medical- and bio-technology and biophotonics. Eventually, the smart controlled, structured lighting will open up new application areas in gas analytics, point-of-care diagnostics and material analysis.



▲ Im Vergleich Spektren, aufgenommen mit diesem neuartigen Spektrometer und einem wesentlich größeren Konkurrenzprodukt.

A comparison of the spectra recorded by this novel spectrometer an a much larger commercial one.

# Projekte

## Projects

Das Inkubationsprojekt "**Nanoscale**" entstammt ebenfalls der Halbleiterforschung. Mit einer neuartigen Fenstertechnologie soll maßgeschneiderte Beleuchtung für intelligente persönliche Umgebungen erzeugt werden - und nachhaltiges Energiesparen realisiert werden. Die im Projekt entwickelten Mikrospiegelarrays sind ein gutes Beispiel für großflächig angelegte Mikrosystemtechnik. Die Arrays werden genutzt, um elektromagnetische Felder und Wellen (z. B. sichtbar, NIR, MIR, FIR, Mikrowellen oder THz) gezielt zu beeinflussen. Die Manipulation umfasst die Regelung der transmittierten Intensität, die Umlenkung und die spektrale Auffächerung. Dabei soll eine Vielzahl von gezielt aktudierbaren Spiegeln zum Einsatz kommen, die beispielsweise in Fensterflächen verbaut werden und dadurch Kosten für Heizung und Klimaanlage signifikant senken.

Das Inkubationsprojekt "**Patientensicherheit 4.0**" entstand aus der Fragestellung, wie Zwischenfälle durch die fehlerhafte Vergabe von Medikationen in der Intensivmedizin bestmöglich durch technologische Mittel zu verhindern sind. Im Projekt wurde ein Analyseautomat für die Überwachung von Langzeitinfusionen entwickelt, die durch Perfusor-Spritzenpumpen auf Intensivstationen verabreicht werden. Der Analyseautomat dient als intensivmedizinischer Baustein, um die Richtigkeit der Medikation zu überprüfen und bereits bestehende Systeme zur Verbesserung des Qualitätsmanagements zu unterstützen. Im vergangenen Jahr ist es gelungen, sogar niedrigste Konzentrationen von Insulin aufzuspüren, das als sehr häufig verabreichtes Medikament bei einer Fehlmedikation für schwere Zwischenfälle sorgen kann.

**Der Bericht wurde verfasst von Prof. Dr. Gerd Marowsky in Zusammenarbeit mit Julia Liebing von der PI-GmbH**

Die Abbildung zeigt schematisch die Ausleuchtung eines Arbeitsraumes mit dieser Fenstertechnologie. 

*The illustration schematically shows the illumination of an office with this window technology.*

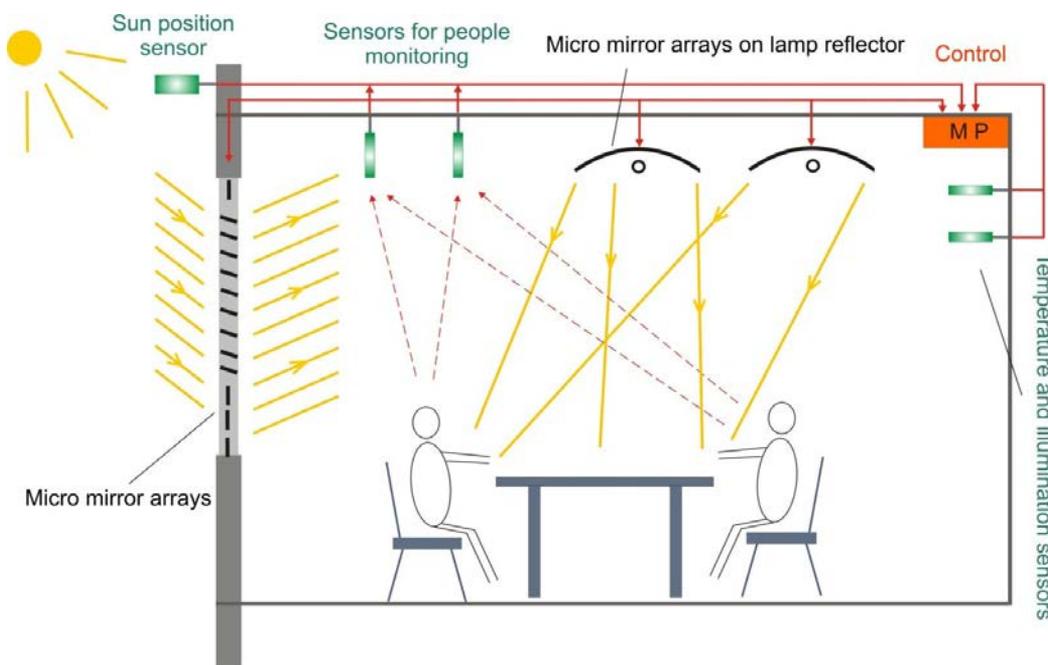
# Projekte

## Projects

The incubation project "**Nanoscale**" also originates from semiconductor research. With a new type of window technology, it aims at tailored lighting for smart personal environments – and the realization of sustainable energy saving. The micro-mirror arrays developed in this project are a good example for large-scale application of microsystem technologies. The arrays are used to specifically influence electromagnetic fields and waves (e. g. visible, NIR, MIR, FIR, microwaves or THz). The manipulation includes automatic control of the transmitted intensity, deflection and spectral diffraction. It is intended to install a large number of concertedly actuated mirrors that are implemented in window planes and thus reduce costs for heating and climate control significantly.

The incubation project "**Patient Safety 4.0**" evolved from the question of how to successfully prevent incidents due to incorrect medication administration in intensive care by using technological means. The project team engineered an automatic analytic device for monitoring long-term infusions that are administered with syringe drivers in intensive care units. The analytic device serves as a component of intensive care to verify the correctness of the medication and supports existing systems for the improvement of quality management. Last year it detected lowest concentrations of insulin which, as a frequently prescribed medication, can cause serious problems if incorrectly administered.

This report was written by Prof. Dr. Gerd Marowsky in collaboration with Julia Liebing from PI GmbH



# Projekte

## Projects

### **Projekt COCO-Sense:**

Kombinierter optischer CO/CO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> Sensor zur Überwachung von Abgaszusammensetzungen nach 1. Bundes-Immissionsschutzverordnung, gefördert vom BMWi im Rahmen des Programms ZiM

### **Projekt CNMPB A1:**

Aberration correction for STED microscopy, gefördert im Rahmen des Exzellenzclusters 171 Mikroskopie im Nanometerbereich und Molekularphysiologie des Gehirns

### **Projekt CNMPB A2:**

Quantitative molecular microscopy, gefördert im Rahmen des Exzellenzclusters 171 Mikroskopie im Nanometerbereich und Molekularphysiologie des Gehirns

### **Projekt COST:**

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

### **Projekt DiffraMark:**

Erzeugung diffraktiver Markierungen auf Werkzeugeinsätzen, Entwicklung und Aufbau, finanziert durch Auftraggeber

### **Projekt DIMAPRO:**

Diffraktive Markierung von Hartmetall und Hartbeschichtung für Design und Produktschutz, 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 Glas-BRIT:**

Glasmarkierung via Breakpoint-Induced-Triggering, gefördert vom BMWi (WIPANO - Wissens- und Technologietransfer durch Patente und Normen)

# Projekte

## Projects

### **Projekt GlasIDeE:**

Glasmarkierung mit Laser als Sicherheits-, Identifikations- und Design-Element, gefördert vom BMWi (ZIM-Netzwerk NesSi)

### **Projekt HCF:**

Hohlfaseranordnung zur Komprimierung energetischer ultrakurzer Pulse, Weiterentwicklung, Vorlaufforschung

### **Projekt Laser-Implant:**

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

### **Projekt NANOPOL:**

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

### **Projekt Nanointeraction:**

The mitochondrion-plasma membrane interaction at super resolution microscopy, gefördert im Rahmen des Programms Niedersachsen, vorab der Volkswagenstiftung

### **Projekt Paladin:**

Hochaufgelöste, parallelisierte Laser-Direktstrukturierung zur Erzeugung individualisierter computergenerierter Hologramme auf Metallen und Halbleitern, gefördert vom BMWi (ZIM-Netzwerk UKPL)

### **Projekt PPA-Kiss:**

Kombination von Ionenmobilitäts- und SERS-Spektrometrie, 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 Sub-100 nm:**

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

# Projekte

## Projects

### **Teilprojekt SFB 755 A01:**

isoSTED microscopy for live cell imaging,  
gefördert im Rahmen des SFB755 Nanoscale Photonic Imaging

### **Teilprojekt SFB755 A06:**

Statistical reconstruction methods for time-varying nanoscale  
imaging problems, gefördert im Rahmen des SFB755 Nanoscale  
Photonic Imaging

### **Teilprojekt SFB 755 C04:**

Soft X-ray spectro-microscopy with a lab-scale source,  
gefördert von der DFG

### **Teilprojekt SFB 755 C08:**

Coherent FEL and high harmonic pulses and their wavefronts,  
gefördert von der DFG

### **Projekt VAMINAP:**

Vor-Ort-Überwachung von Arzneirückständen, Mikro- und  
Nanopartikeln im Ablauf städtischer Kläranlagen mittels photonischer  
Verfahren, gefördert vom BMBF

### **Projekt WeKokUbs:**

Wellenfront- und Kohärenzkontrolle an Undulator-basierten  
Strahlquellen zur Optimierung bildgebender Verfahren,  
gefördert vom BMBF

### **Projekt Y-Flow:**

Entwicklung eines Y-Separators in Glas zur kontinuierlichen Phasentrennung durch oberflächeninduzierte Strömungssteuerung in Mikrokanälen für Anwendungen in der chemisch-pharmazeutischen Fluidverfahrentechnik, gefördert vom BMWi (ZIM)

# Patente

## Patents

### **Erteilte Patente / Patents granted**

**T. Fricke-Begemann, J. Ihlemann**

Sensor und Herstellungsverfahren für einen Sensor

DE 10 2014 010 402.8 , 8.11.2018

# Publikationen

## Publications

**M. Heinz, V. V. Srabionyan, L. A. Avakyan, A. L. Bugaev, A.V. Skidanenko, V. V. Pryadchenko, J. Ihlemann, J. Meinertz, C. Patzig, M. Dubiel, L. A. Bugaev:**

Formation and implantation of gold nanoparticles by ArF-excimer laser irradiation of gold-coated float glass, *Journal of Alloys and Compounds*, 736, 152 (2018)

**L. Avakyan, M. Heinz, A. Skidanenko, K. A. Yablunovskiy, J. Ihlemann, J. Meinertz, C. Patzig, M. Dubiel, L. Bugaev:**

Insight on agglomerates of gold nanoparticles in glass based on surface plasmon resonance spectrum: Study by multi-spheres T-matrix method, *Journal of Physics: Condensed Matter* 30, 045901 (2018)

**N. Wang, T. Fricke-Begemann, P. Peretzki, J. Ihlemann, M. Seibt:**

Formation of porous silicon oxide from substrate-bound silicon rich silicon oxide layers by continuous-wave laser irradiation, *Journal of Applied Physics* 123, 093104 (2018)

**M. Heinz, V. V. Srabionyan, L. A. Avakyan, A. L. Bugaev, J. Meinertz, A.V. Skidanenko, S. Yu. Kaptelinin, J. Ihlemann, C. Patzig, M. Dubiel, L. A. Bugaev:**

Formation of bimetallic gold-silver nanoparticles in glass by UV laser irradiation, *Journal of Alloys and Compounds* 767, 1253 (2018)

**T. Fricke-Begemann, J. Ihlemann:**

Hybrid micro-optical elements by laser-based fabrication of Fresnel lenses on the end face of gradient index lenses, *Optics Express* 26, 23751 (2018)

**B. H. Chen, M. Kretschmar, D. Ehberger, A. Blumenstein, P. Simon, P. Baum, T. Nagy:**

Compression of picosecond pulses from a thin-disk laser to 30fs at 4W average power, *Optics Express* 26, 3861 (2018)

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

Schlechte Karten für Produktpiraterie, *Mikroproduktion* 04/18, 60, (2018)

**P. Kranz, D. Fuhrmann, M. Goschütz, S. Kaiser, S. Bauke, K. Golibrzuch, H. Wackerbarth, P. Kawelke, J. Luciani, L. Beckmann, J. Zachow, M. Schuette, O. Thiele, T. Berg:**

In-cylinder LIF imaging, IR-absorption point measurements, and a CFD simulation to evaluate mixture formation in a CNG-fueled engine, *SAE Technical Paper* 2018, 2018-01-0633 (2018)

# Publikationen

## Publications

**S. Bauke, K. Golibrzuch, H. Wackerbarth, P. Fendt, L. Zigan, S. Seefeldt, O. Thiele, T. Berg:**

Optical sensor system for time-resolved quantification of methane concentrations: validation measurements in a rapid compression machine, *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer* 210, 101-110 (2018)

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

Laser Processing of Silicon Suboxide for the Fabrication of Multilevel Fused Silica Diffractive Phase Elements, *JLMN-Journal of Laser Micro/Nanoengineering* 13, 249 (2018)

**M. Heinz, J. Meinertz, M. Dubiel, J. Ihlemann:**

Excimer laser induced spatially resolved formation and implantation of plasmonic particles in glass, *Nanomaterials* 8, 1035 (2018)

**R. Kowarsch, C. Geisler, A. Egner, C. Rembe:**

Superresolution reflection microscopy via absorbance modulation: A theoretical study, *Optics Express* 26 (5) (2018)

**B. Roubinet, M. Bischoff, S. Nizamov, S. Yan, C. Geisler, S. Stoldt, G. Y. Mitronova, V. N. Belov, M. L. Bossi, S. W. Hell:**

Photoactivatable Rhodamine Spiroamides and Diazoketones Decorated with Universal Hydrophilizer or Hydroxyl Groups, *Journal of Organic Chemistry* 83, 12 (2018)

**E. Neubert, D. Meyer, F. Rocca, G. Günay, J. Grandke, A. Egner, A. Kwaczala-Tessmann, S. Senger-Sander, C. Geisler, M. Schön, L. Erpenbeck, S. Kruss:**

Chromatin swelling drives neutrophil extracellular trap release, *Nature Communications* 9, 1:3767 (2018)

# Konferenzbeiträge

## Conference contributions

**A. Egner:**

Lichtblicke in die Nanowelt - Neue Methoden der Lichtmikroskopie überlisten die Beugung, Saturday Morning Lecture, Universität Hannover (01.2018)

**S. Lange, T. Mey, B. Schäfer, B. Keitel, M. Kuhlmann, E. Plönjes, K. Mann:**

Wavefront and coherence measurements at FLASH DESY, User Meeting 2018, Hamburg (01.2018)

**K. Mann, U. Leinhos, M. Lübbecke, B. Schäfer:**

Characterization of absorptance and thermally induced wavefront deformations in DUV lithography optics, SPIE Advanced Lithography, San Jose / USA (02.2018)

**K. Soliman, F. Rocca, R. Siegmund, C. Geisler, A. Egner:**

STED nanoscopy: imaging beyond the diffraction limit of light, 23rd Dubai International Pharmaceuticals and Technologies, Conference and Exhibition DUPHAT 2018, Dubai (02.2018)

**M. Ouillé, F. Boehle, M. Thévenet, M. Bocoum, A. Vernier, M. Lozano, J.-P. Rousseau, A. Jullien, S. Haessler, M. Kovacs, P. Simon, T. Nagy, R. Lopez-Martens:**

Relativistic-Intensity, Near-Single-Cycle kHz Laser Driver, OSA High-brightness Sources and Light-driven Interactions Congress, Strasbourg, France 26-28 March, 2018, paper 2906399 (03.2018)

**N. Khodakovskiy, M. Kalashnikov, A. Blumenstein, P. Simon, T. Nagy, M. M. Toktamis, M. Lozano, R. Lopez-Martens:**

Generation of high-fidelity few-cycle pulses via nonlinear ellipse rotation in a stretched hollow-fiber compressor, CLEO 2018, Session Title: Advanced Laser Technologies, Time: 9:45 AM to 10:00 AM

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

Laser processing of silicon suboxide for the fabrication of diffractive phase elements, DPG Frühjahrstagung, Fachverband Kurzzeit- und angewandte Laserphysik Erlangen (03.2018)

**M. Schellhorn, M. Müller, K. Mann:**

Implementation of an in situ liquid-flow unit for tabletop NEXAFS spectroscopy, SFB 755 Spring School, Kloster Drübeck (04.2018)

# Konferenzbeiträge

## Conference contributions

**J. Ihlemann:**

Laser processing of silicon suboxide ( $\text{SiO}_x$ ) - from the generation of Si-nanocrystals to the fabrication of diffractive phase elements  
International Workshop on Frontiers in Lasers and Applications  
(FLA 2018) Okinawa, Japan (04.2018)

**M. Müller, M. Schellhorn, K. Mann:**

Applications of a table-top laser-induced soft X-ray plasma source,  
SFB 755 Spring School, Kloster Drübeck (04.2018)

**S. Lange, T. Mey, B. Schäfer, B. Keitel, M. Kuhlmann, E. Plönjes, K. Mann:**

Wavefront and coherence measurements at FLASH, SFB 755  
Spring School, Kloster Drübeck (04.2018)

**C. Niklas, G. Ctistis, H. Wackerbarth:**

Non-dispersive infrared spectroscopy for in-situ gas analysis in harsh environments, “Wave shaping” Symposium, Enschede, Niederlande (06.2018)

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

Laser processing of silicon suboxide for the fabrication of multilevel fused silica diffractive phase elements, 19th International Symposium on Laser Precision Microfabrication (LPM 2018) Edinburgh, UK (06.2018)

**C. Fotso Kwamou, A. Fischer, F. Scholze, K. Mann, B. Schäfer:**

Using a wavefront sensor to optimise the alignment of beamline optics, Synchrotron Radiation Instrumentation (SRI 2018), Taipeh/Taiwan (06.2018)

**C. Niklas, S. Bauke, G. Ctistis, K. Golibrzuch, H. Wackerbarth:**

Non-dispersive IR-spectroscopy in harsh environments, 19. ITG/GMA-Fachtagung Sensoren und Messsysteme, ISBN: 978-3-8007-4683-5 (06.2018)

**M. Vergöhl, C. Britze, S. Bruns, J. Ahrens, B. Schäfer, K. Mann, V. Kirschner:**

Development of a broadband dielectric beam splitter with reduced spectral wavefront error, SPIE Optical Systems Design, Conference Advances in Optical Thin Films, Frankfurt, Deutschland (06.2018)

# Konferenzbeiträge

## Conference contributions

**P. Simon:**

Light as a tool: nanoscale photonics for production technology and life science applications, Workshop on lasers in medicine and life sciences-LAMELIS 2018, Szeged, Hungary, invited talk (07.2018)

**J.-R. Krüger, B. Vinçon, C. Geisler, A. Egner:**

Overcoming the resolution barrier by STED microscopy, SPIE Optics + Photonics, Nanoscience + Engineering, Nanoimaging and Nanospectroscopy VI, San Diego, CA, USA (08.2018)

**D. Köhne, C. Geisler, P. Simon, A. Egner:**

Novel STED-assisted nanostructuring method for subtractive sub-diffraction writing, SPIE Optics + Photonics, Nanoscience + Engineering, Nanoimaging and Nanospectroscopy VI, San Diego, CA, USA (08.2018)

**R. Kowarsch, C. Geisler, A. Egner, C. Rembe:**

Modeling superresolution reflection microscopy via absorbance modulation, SPIE Optics + Photonics, Nanoscience + Engineering, Nanoimaging and Nanospectroscopy VI, San Diego, CA, USA (08.2018)

**F. Wieduwilt, S. Göllner, G. Ctistis, C. Lenth, H. Wackerbarth:**

Evaluation von plasmonischen Strukturen für die Detektion von Arzneimittelrückständen; Umwelt 2018, Münster (09.2018)

**F. Wieduwilt, C. Lenth, U. Plachetka, H. Wackerbarth:**

Herstellung und Charakterisierung von funktionellen Oberflächen für die Bioanalytik, 19. Heiligenstädter Kolloquium, Heilbad Heiligenstadt (09.2018)

**S. Lange, T. Mey, B. Schäfer, B. Keitel, M. Kuhlmann, E. Plönjes, K. Mann:**

FEL beam characterization from measurements of the Wigner distribution function, PhotonDiag 2018, Hamburg (09.2018)

**V. Schalles, S. Göllner, C. Lenth, H. Wackerbarth:**

Entwicklung einer hochsensitiven Auswerteeinheit und chemometrischer Verfahren für das Lesen von Lateral-Flow-Tests unter Nutzung des "Surface-Enhanced Resonance Raman Scattering"-Effektes, 19. Heiligenstädter Kolloquium, Heilbad Heiligenstadt (09.2018)

**K. Mann:**

Strahlpropagation und Optik-Charakterisierung im DUV und EUV-Bereich, Laser Zentrum Hannover (09.2018)

# Konferenzbeiträge

## Conference contributions

**F. Müller, C. Lenth, U. Plachetka, M. Rothermann, B. Ungethüm,  
A. Walte, H. Wackerbarth:**

Oberflächenverstärkte Raman-Spektroskopie in Kombination mit Kryofokussierung zur Explosivstoffdetektion, Kaiser-Friedrich-Forschungspreis 2018, Goslar (10.2018)

**A. Egner:**

Subdiffraction-resolution fluorescence imaging, SFB 1286 Symposium 'Advanced microscopy & biomedicine meets NanoSIMS', Göttingen (10.2018)

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

Modelling of short laser pulse nanostructuring of metals in different media  
International Conference on Ultrafast Optical Science (UltrafastLight-2018)  
Moscow (10.2018)

**P. Neek, C. Lenth, S. Steinhauer, U. Plachetka, A. Walte, B. Ungethüm,  
H. Thole, L. Fink, G. Pelzer:**

VAMINAP: Vor-Ort Überwachung von Arzneirückständen, Mikro- und Nanopartikeln im Ablauf städtischer Kläranlagen mittels photonischer Verfahren, Statusseminar "Photonik in den Lebenswissenschaften", Hamburg (11.2018)

**K. Mann, B. Schäfer:**

Non-linear wavefront distortion in high power laser optics,  
COST Action CA17126, 1st General Meeting, Madrid / Spanien (11.2018)

**M. Müller, J. Holburg, K. Mann:**

Soft X-ray spectroscopy and microscopy using a table-top laser-induced plasma source, EUV Source Workshop, HiLASE, Prag, Tschechien (11.2018)

**C. Liberatore, M. Müller, J. Holburg, K. Mann, M. Chyla, S. Hutchinson,  
A. Endo, A. Bulgakov, N. Bulgakova, T. Mocek:**

EUV source at HiLASE, EUV Source Workshop, HiLASE, Prag, Tschechien (11.2018)

# Abschlussarbeiten

## Final Thesis

### **Simon Göllner:**

Entwicklung und Evaluation von Verfahren basierend auf der oberflächenverstärkten Raman-Spektroskopie zur quantitativen Stoffdetektion.

**Bachelorarbeit**, HAWK - Hochschule für angewandte Wissenschaft und Kunst Hildesheim/Holzminde/Göttingen, Fakultät Naturwissenschaften und Technik, Göttingen (2018)

### **Till Schröder:**

Dynamische Strahlformung durch Mikrospiegel-Arrays für die Laser-Materialbearbeitung.

**Bachelorarbeit**, HAWK - Hochschule für angewandte Wissenschaft und Kunst Hildesheim/Holzminde/Göttingen, Fakultät Naturwissenschaften und Technik (2018)

### **Christian Niklas:**

Quantification of CO<sub>2</sub> and CO concentrations via non-dispersive infrared spectroscopy.

**Masterarbeit**, Georg-August-Universität Göttingen (2018)

### **Lukas Janos Richter:**

Laserstrukturierung von Siliziumsuboxid zur Herstellung von mehrstufigen diffraktiven Phasenelementen.

**Masterarbeit**, Georg-August-Universität Göttingen (2018)

### **Oskar Laitenberger:**

Statistical analysis methods for time varying nanoscale imaging problems.

**Dissertation**, Georg-August-Universität Göttingen (2018)

### **Haugen Mittelstädt:**

Stereo 3D-SMS microscopy of large sample volume.

**Dissertation**, Georg-August-Universität Göttingen (2018)

### **Matthias Müller:**

Hochauflösende Bildgebung und NEXAFS-Spektroskopie mit weicher Röntgenstrahlung aus laserinduzierten Plasmen.

**Dissertation**, Georg-August-Universität Göttingen (2018)

# Ausgewählte Kooperationspartner

## Selected Cooperation Partners

### International



### National



### Lokal



# WISSENSCHAFT IDEEN



ZUSE-GEMEINSCHAFT  
FORSCHUNG, DIE ANKOMMT.

## ZUSE-GEMEINSCHAFT VERSCHAFFT SICH GEHÖR IN POLITIK UND MEDIEN

Unser Institut ist Mitglied der 2015 gegründeten Deutschen Industrieforschungsgemeinschaft Konrad Zuse e.V., die mehr als 70 privatwirtschaftlich organisierte Forschungseinrichtungen vereint.

Zentrale politische Forderungen der Zuse-Gemeinschaft sind die Schaffung eines eigenen Haushaltstitels für die privatwirtschaftlich organisierten Institute und mehr Fairness in der Forschungsförderung.

In Berlin setzt die Zuse-Gemeinschaft durch die aktive Ansprache der Politik Akzente, so durch Veranstaltungen in den Hauptstadt-Vertretungen ausgewählter Bundesländer. Sie sind ein Beispiel dafür, wie der Verband die Abgeordneten des Bundestages gezielt auf seine politischen Anliegen aufmerksam macht.

Ihren Forderungen verlieh die Zuse-Gemeinschaft 2018 auch mit dem erstmals ausgerichteten Zuse-Tag Regional Nachdruck, der bundesweit mit verschiedenen Veranstaltungsformaten starken Anklang fand.

Die Zuse-Gemeinschaft intensivierte im zweiten Halbjahr 2018 zudem ihre Pressearbeit. Dies fand durch Beiträge in reichweitenstarken Print-Medien ebenso wie durch ausführliche Berichterstattung in der Fachpresse seinen Niederschlag.

Digital entfaltet sich die Öffentlichkeitsarbeit der Zuse-Gemeinschaft auf ihrer Homepage und seit Mitte 2018 unter @Zuse\_Forschung auch im Social Media-Kanal Twitter - mit immer stärkerem Zulauf.

[www.zuse-gemeinschaft.de](http://www.zuse-gemeinschaft.de)

 @Zuse\_Forschung



*Oben: Zuse-Tag regional in Halle: Prof. Steffen Keitel (SLV Halle) im Gespräch mit Ministerpräsident Dr. Reiner Haseloff und FuE-Abteilungsleiter Dr. Thomas Krüssel (v.l.n.r.).*

*Mitte: Infos rund um Innovationen mit Kunststoffen bei den Führungen am SKZ.*

*Unten: Bundestagsabgeordneter Volkmar Vogel (CDU), Dr. Uwe Möhring (TITV), Staatssekretär und Ostbeauftragter der Bundesregierung, Christian Hirte (CDU), Mitglied des Thüringer Landtags Christian Tischer (CDU), 2. Beigeordneter des Bürgermeisters Griez, Ulrich Zeschner (v.li.).*

# Messen und Veranstaltungen

## Exhibitions and Events

### Zukunftstag im Laser-Laboratorium Göttingen

Seit 2001 haben interessierte Mädchen und Jungen der Jahrgangsstufen 5 bis 10 jedes Jahr am Zukunftstag die Möglichkeit, geschlechteruntypische Berufe hautnah kennenzulernen. Eine wichtige Veranstaltung nicht nur für die Jugendlichen, denn gerade im Bereich Mathematik, Informatik, Naturwissenschaften und Technik und vor dem Hintergrund des demographisch bedingten zunehmenden Fachkräftemangels ist die Förderung des Nachwuchses - insbesondere des weiblichen - wichtiger denn je.

Am 27. April 2018 war eine Gruppe von 13 Jungen und Mädchen im Alter von 11 bis 15 Jahren zu Gast im Laser-Laboratorium Göttingen. Im Rahmen einer ausführlichen Führung besichtigten sie das Institut. Danach hatten die Schülerinnen und Schüler die Gelegenheit, unter fachkundiger Anleitung selbst einmal als Forscher aktiv zu werden: Mit höchster Konzentration und großem Interesse erkundeten sie einige praktische technische Bereiche der (Laser-) Physik und lernten dabei, wie ein Gravurlaser funktioniert, wie Rosen zu Eis werden und noch vieles andere Spannende mehr. Die rundweg positive Resonanz aller Teilnehmer bestätigte einmal mehr die positive Wirkung der Initiative.



Teilnehmer und Betreuer des Zukunftstages.

*Participants and a supervision of the Future Day.*

# Messen und Veranstaltungen

## Exhibitions and Events

### Zukunftstag at the Laser Laboratorium Göttingen

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

On 27 April 2017, a group of 13 boys and girls aged 11 to 15 years visited the Laser Laboratorium Göttingen. They were given an extensive guided tour of the institute. The pupils had the opportunity to take part, under expert guidance, as researchers. With great concentration and much interest they explored some practical aspects of (laser-) physics and learned, for example, how an engraving laser works, how roses turn to ice and many other exciting things. The altogether positive response from all participants once again confirmed the positive impact of the initiative.



▲  
Ein Versuch mit Flüssigstickstoff.  
An experiment with liquid nitrogen.

# Messen und Veranstaltungen

## Exhibitions and Events



### Analytica 2018

Die Analytica in München gilt als internationale Leitmesse für Labortechnik, Analytik und Biotechnologie. Mit 1.164 Ausstellern aus 49 Ländern zog sie vom 10. bis 13. April dieses Jahres mehr als 35.800 Fachbesucher an.

Das Laser-Laboratorium zeigte sein Forschungsportfolio in den Bereichen **"nanoskaliges Analysieren und Abbilden mit Licht"**.

Dazu gehörte unter anderem ein Analysegerät, das Gaschromatographie und Ionenmobilitätsspektrometrie kombiniert und somit Analyte aus der Gasphase schnell und in sehr niedrigen Mengen bestimmen kann. Die Aufnahme der Analyte erfolgt hierbei über eine Festphasenmikroextraktionsfaser. Das Forschungsteam des LLG zeigte zudem, wie sich mittels des STED-Prinzips mikroskopische Aufnahmen mit einer Auflösung von nur wenigen zehn Nanometern erstellen lassen. Die Detailschärfe der Bilder ist damit bis zu zehnmal höher als bei der herkömmlichen Fluoreszenzmikroskopie.



Der Messe-Stand des Laser-Laboratorium Göttingen.  
*The Stand of the Laser Laboratorium Göttingen.*

# Messen und Veranstaltungen

## Exhibitions and Events

### Analytica 2018

The Analytica in Munich is considered the leading international trade fair for laboratory technology, analytics and biotechnology. With 1,164 exhibitors from 49 countries, it attracted more than 35,800 trade visitors from 10 to 13 April this year.

The Laser Laboratorium showed its research portfolio in the areas of **"nanoscale analysis and imaging with light"**.

These included an analyzer that combines gas chromatography and ion mobility spectrometry to rapidly determine analytes from the gas phase in very low quantities. The uptake of the analytes takes place via a solid phase micro fiber extraction. The LLG research team also showed how microscopic images with a resolution of just a few tens of nanometers can be created using the STED principle. The detail sharpness of the images is thus up to ten times higher than with conventional fluorescence microscopy.



Teilnehmer und Betreuer am Stand des Laser-Laboratoriums Göttingen.

*A visitor and staff members at the stand of the Laser Laboratorium Göttingen.*

# Messen und Veranstaltungen

## Exhibitions and Events

### Das Laser-Laboratorium Göttingen öffnet Türen für das HAWK plus -Seminar

Die Dozentin des HAWK plus-Seminars „Kreativität im Business“, Beatris Uhlig, verfolgte mit der am LLG durchgeführten Lehrveranstaltung das Ziel, dass bereits mehrmals angebotene Seminar diesmal näher an die unternehmerische Praxis zu bringen. Als win-win-Situation für die Studierenden, aber eben auch für Unternehmen, sollte das Seminar doppelten Nutzen schaffen: Intensives methodisches Lernen und Reflektieren vor realem Kontext einerseits, Vernetzung der unternehmerischen Praxis mit Studierenden und potenziellen Nachwuchskräften andererseits. Damit stand auch schon die Leitfrage für das Seminar fest:

#### **„Wie kann das Laser-Laboratorium Göttingen Physikstudierende für eine Zusammenarbeit begeistern?“**

Mit elf Studierenden aus vier HAWK-Fakultäten startete das Seminar in den Räumlichkeiten des Laser-Laboratoriums. Mit dem Pool von Kreativmethoden, den Uhlig den Studierenden anwendungsorientiert vermittelte, wurde die vereinbarte Fragestellung während des dreitägigen Seminars bearbeitet und realistische Handlungsoptionen wurden entwickelt.

Am 23. Mai wurde das Seminar der HAWK mit einer Präsentation der Arbeitsergebnisse im LLG erfolgreich abgeschlossen, was zugleich der Auftakt für eine weitere interdisziplinäre Zusammenarbeit zwischen LLG und HAWK-Studierenden war.



▲ Die Dozentin des HAWK Plus Seminars Frau Uhlig mit Ihren Kursteilnehmern.  
*The lecturer of HAWK plus seminar Mrs. Uhlig with her students.*

# Messen und Veranstaltungen

## Exhibitions and Events

### The Laser-Laboratorium Göttingen opens doors for the HAWK plus-Seminar

The lecturer of the HAWK plus-seminar creativity in business Beatris Uhlig, followed the need to bring the already often offered seminar closer to entrepreneurial practice by confronting her students with real entrepreneurial issues. As a win-win situation for both students and companies, the seminar should create double benefits: intensive methodical learning and reflection against a real context on one hand, networking of entrepreneurial practice with students and potential junior staff on the other. Thus, the key question for the seminar was already fixed:

### **"How can the Laser Laboratorium Göttingen inspire physics students for a cooperation?"**

With eleven students coming from four HAWK faculties, the seminar started in the premises of the Laser Laboratorium. With the pool of creative methods which Uhlig imparted to the students in an application-oriented manner, the agreed questions were worked on during the three-day seminar and realistic options for action were developed.

On May 23, the seminar was successfully concluded with a presentation of the results in the LLG and was the prelude for further interdisciplinary cooperation between the LLG and HAWK students.



Christian Niklas und Teilnehmer des HAWK Plus Seminars im Labor.

*Christian Niklas and participants of the HAWK Plus seminar in the laboratory.*

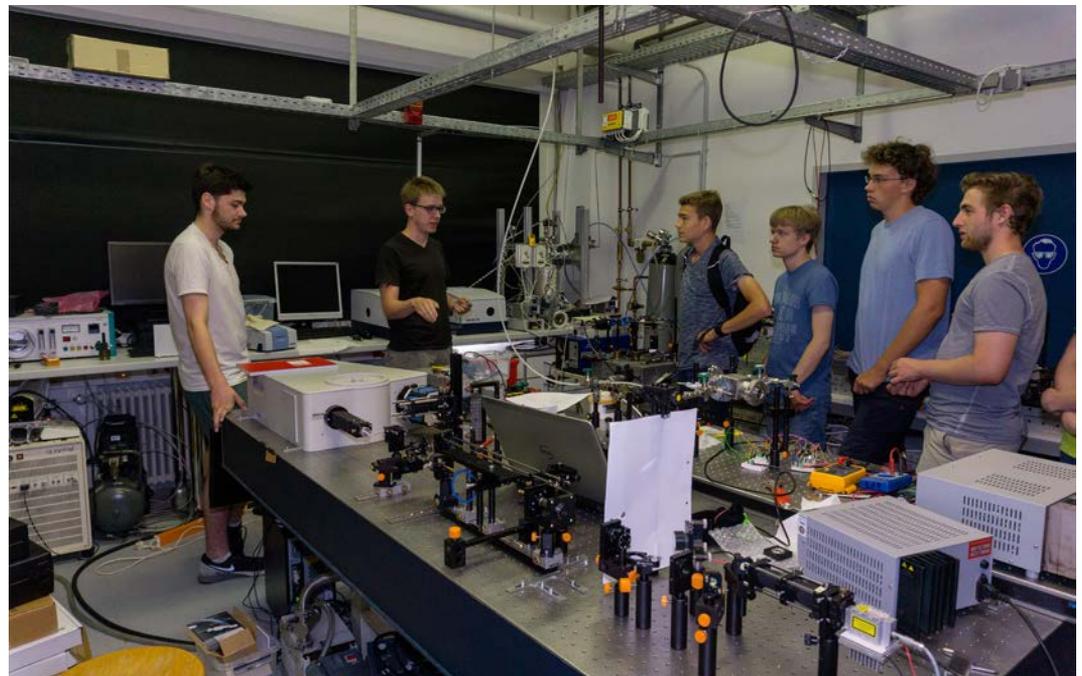
# Messen und Veranstaltungen

## Exhibitions and Events

### Treffen der Preisträger des DPG-Abiturpreises im LLG

Am 2. Juli besuchten ca. 20 Schülerinnen und Schüler, die den Abiturpreis der Deutschen Physikalischen Gesellschaft 2018 erhielten, das LLG und die Physikalischen Fakultät der Georg-August-Universität.

Die Veranstaltung "Abiturpreisträgertreffen" wird von der Jungen Deutschen Physikalischen Gesellschaft organisiert. Mit dem Besuch soll u.a. das Interesse an einem Physikstudium in Göttingen geweckt werden. Herr Dr. Ctistis gab nach einer kurzen Vorstellung des Instituts den Preisträgern eine Einführung in spektroskopische Messverfahren welche im Bereich der Umweltanalytik und Lebenswissenschaften eingesetzt werden. Junge Masteranden und Bacheloranden des LLG stellten anschließend im Rahmen einer Führung Experimente zur nicht-dispersiven IR Absorption an klimaschädlichen Gasen, zur Charakterisierung von Nanoemulsionen und zur Erkennung von Infektionsmarkern mittels oberflächenverstärkter Raman-Spektroskopie mit anschließender Datenanalyse vor. Insbesondere diese Einblicke in die experimentelle Arbeit von angewandt forschenden Physikern stießen bei den Abiturienten auf besonders großes Interesse.



Die Preisträger im Labor.

*The winners of the prize in the laboratory.*

# Messen und Veranstaltungen

## Exhibitions and Events

### Meeting of the winners of the DPG-Abitur Prize in the LLG

On 2nd of July, about 20 students who had received the Abitur Prize of the German Physical Society in 2018 visited the LLG and the Faculty of Physics of the Georg August Universität.

The event "Abiturprice winners meeting" is organized by the young members of the Deutsche Physikalische Gesellschaft. The visit should awaken the interest in studying physics in Göttingen. After a brief presentation of the institute, the award winners learnt about three selected experiments at the LLG. Dr. Ctistis gave a brief introduction to spectroscopic measurement methods in the field of environmental analysis and life sciences. Young masters and undergraduate students presented experiments on non-dispersive IR absorption in climate-damaging gases, characterization of nanoemulsions, and data analysis to detect infection markers using surface-enhanced Raman spectroscopy, which aroused particular interest among the high school graduates.



Besucher im Labor.

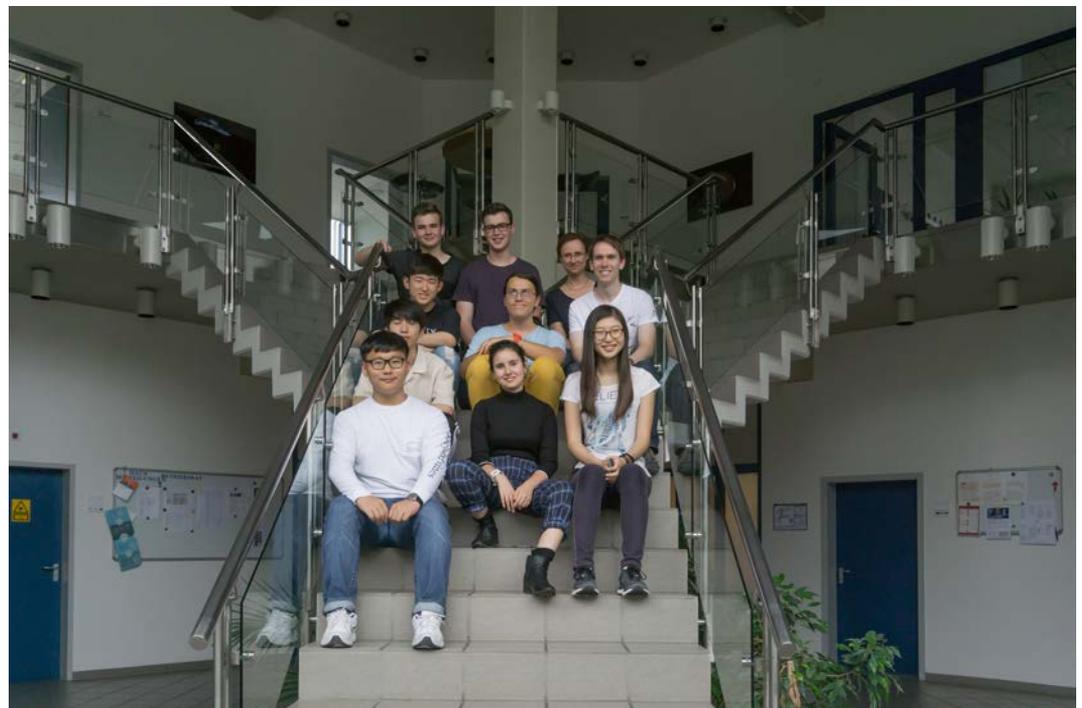
Visitors in the laboratory.

# Messen und Veranstaltungen

## Exhibitions and Events

### **XLAB International Science Camp zu Besuch am LLG**

Neun Teilnehmerinnen und Teilnehmer des XLAB International Science Camps besuchten am 15. August 2018 das LLG. Begrüßt wurde die internationale Gruppe von Matthias Müller, der in einem Vortrag zunächst das Institut vorstellte und einen Überblick über die weitreichenden Anwendungsmöglichkeiten von Laserstrahlung gab. Danach erhielten die Schülerinnen und Schüler im Alter von 16 bis 18 Jahren im Rahmen einer ausführlichen Führung durch das Institut spannende Eindrücke komplexer Messaufbauten und praktischer Laseranwendungen. So wurde u.a. anschaulich erklärt, wie hochauflösende Fluoreszenzmikroskopie (STED) funktioniert, welche Bedeutung extrem ultraviolette Strahlung für die zukünftige Fertigung von Smartphones, Tablets und Computern hat, wie Mikroplastik im Meer effizient und zuverlässig detektiert werden kann und wie durch Laserbearbeitung von Oberflächen eine fälschungssichere Kennzeichnung von Originalteilen gelingt.



▲  
Teilnehmerinnen und Teilnehmer des XLAB International Science Camps im LLG.  
*Participants of the XLAB International Science Camp in the LLG.*

# Messen und Veranstaltungen

## Exhibitions and Events

### XLAB International Science Camp visits LLG

Nine members of the XLAB International Science Camp visited the LLG on 15th August 2018. The group was welcomed by Matthias Müller with a short overview talk about the LLG and some extensive applications of laser radiation. Afterwards, the students of age 16 to 18 years could get some fascinating impressions of the complex setups and applied science performed at the institute during a behind the scene tour. Among others, the working principle of high-resolution fluorescence microscopy (STED), the impact of extreme ultraviolet radiation on the future fabrication of smartphones, tablets and computers, the detection of microplastics in water and surface structuring for labelling genuine parts with holographic security features was vividly illustrated.



▲  
Einblick in das Biologielabor im Laser-Laboratorium.  
*Insight into the biology laboratory in the Laser Laboratorium.*

## Vielfalt - eine Bereicherung für unsere Forschung

Institutsdirektor apl. Prof. Dr. Alexander Egner unterzeichnete am 5. Juni für das Laser-Laboratorium Göttingen die Charta der Vielfalt zum 6. bundesweiten "Diversity-Tag" in der Sternwarte in Göttingen.

Wir, das Laser-Laboratorium Göttingen, arbeiten und forschen in einem Umfeld, welches frei von Vorurteilen ist. Daher gehen wir respektvoll und wertschätzend mit unseren Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern sowie mit unseren Kundinnen und Kunden um.

Jeglicher Benachteiligung aus Gründen der Nationalität, der ethnischen Herkunft, des Geschlechts, der Religion oder Weltanschauung, einer Behinderung, des Alters oder der sexuellen Orientierung treten wir entschieden entgegen.

Diese Grundsätze sind Bausteine unserer Institutskultur und garantieren eine erfolgreiche Forschung und Entwicklung durch die Vielfalt und die Unterschiedlichkeit unserer Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter und deren Fähigkeiten und Talente.

Aus dieser Überzeugung heraus hat das Laser-Laboratorium Göttingen die Charta der Vielfalt unterzeichnet.

Die Charta der Vielfalt ist eine Initiative zur Förderung von Vielfalt in Unternehmen und Institutionen.



LLG Direktor Alexander Egner beim Unterzeichnen der Urkunde der Charta der Vielfalt.  
LLG Director Alexander Egner signing the document of the Charta der Vielfalt.

# Neuigkeiten

## News

### Diversity - an enrichment for our research

Institute Director apl. Prof. Dr. Alexander Egner signed on June 5 the Diversity Charter for the 6th nationwide "**Diversity Day**" for the Laser Laboratorium Göttingen in the Observatory in Göttingen.

We, the Laser Laboratorium Göttingen, work and perform research in an environment that is free of prejudice. That is why we treat our employees and our customers with respect and appreciation.

Any discrimination on the grounds of nationality, ethnic origin, gender, religion or belief, disability, age or sexual orientation is strongly opposed.

These principles are the building blocks of our institutional culture and guarantee successful research and development through the diversity and diversity of our employees and their skills and talents.

Based on this conviction, the Laser Laboratorium Göttingen has signed the Diversity Charter.

The Diversity Charter is an initiative to promote diversity in companies and institutions.



▲  
Unterzeichnerinnen und Unterzeichner der Charta der Vielfalt am 5. Juni 2018 in Göttingen.  
Signatories of the Charta der Vielfalt on 5 June 2018 in Göttingen.

## Kaltes Wasser kühlt heiße Laser

Im Rahmen der Serie „Campus-Ansichten“ berichtete das Göttinger Tageblatt über das am LLG installierte Kühlsystem. Dieses wird benötigt um die im Institut eingesetzten Hochleistungslaser unter optimalen Bedingungen betreiben zu können.

14

CAMPUS

Sonabend, 10. März 2018

### Güntzler informiert Minister

Institut für Demokratieforschung

**Göttingen.** Mit der Situation des Instituts für Demokratieforschung der Universität Göttingen soll sich Niedersächsischer Wissenschaftsminister Björn Thümler (CDU) befassen. Sein Parteikollege Fritz Güntzler, Göttinger Bundestagsabgeordneter, hat dem Minister seine Bedenken gegen die Pläne der Hochschule, das Institut möglicherweise nicht in der bisherigen Form weiterzuführen, dargestellt.

„Das Niedersächsische Ministerium für Wissenschaft und Kultur fördert das Institut in nicht unerheblichem Maße. Ich finde, zu Recht, denn das Institut ist für die Universität ein Leuchtturmprojekt, das der Göttinger Politikwissenschaft in der nationalen Debatte eine enorme Bedeutung verschafft und für die Nachwuchsförderung in diesem Studiengang von großer Bedeutung ist“, heißt es in dem Brief von Güntzler an Thümler.

### Universitätspräsidentin informiert das Team

Der Göttinger Politiker erfährt am Mittwoch von den Befürchtungen des Teams, dass es zu neuen Forschungsschwerpunkten kommt, wenn die Universitätsleitung über die Nachfolge von Politikwissenschaftler Franz Walter, der seit Oktober 2017 im vorzeitigen Ruhestand ist, entscheidet. Welche Vorgehensweise sie für notwendig erachtet, will Universitätspräsidentin Prof. Ulrike Beisiegel dem Team des Instituts am Dienstag, 13. März, vorstellen, hatte sie am Donnerstag mitgeteilt.

### SPD fordert Weiterführung der aktuellen Forschung

Güntzler spricht sich dafür aus, das Institut mit seinem bisherigen Auftrag und weiterhin mit der Unterstützung des Landes Niedersachsen zu erhalten. Eine Änderung des Zwecks, so Güntzler, könne somit auch die Landesförderung des Instituts infrage stellen.

Die niedersächsische Koalitionsregierung aus SPD und CDU sollte, die Universitätsleitung bewegen, die Ausrichtung des Instituts nicht zu verändern“, erklärte am Freitag Cornelius Schley für den SPD-Stadtvorstand Göttingen. Dann gehörte dann die entsprechende Besetzung des Lehrstuhles, die Weiterführung der aktuellen Forschung und die Weiterbeschäftigung der Mitarbeiter... jes



Die Kühlsysteme des Laser-Laboratoriums Göttingen sorgen dafür, dass die 30 Laser im Haus nicht überhitzen. Der technische Mitarbeiter Stefan Scholz (von links) nimmt im Beisein von Betriebsleiter Dirk Born und dem technischen Mitarbeiter Andreas Spata eine Probe des Kühlwassers. FOTO: HELLER

## Kaltes Wasser kühlt heiße Laser

Laser-Laboratorium Göttingen / Tageblatt-Serie „Campus-Ansichten“

Von Michael Caspar

**Göttingen.** Die elektrische Leistung der rund 30 Laser im Laser-Laboratorium Göttingen entspricht jeweils von bis zu 30 Backöfen. Mit zwei Kühlsystemen verhindert das Institut, dass sich die Geräte überhitzen. Das Tageblatt stellt die Anlagen in der Reihe Campus-Ansichten vor. Blaugrün schimmert das Kühlwasser im 1000 Liter fassenden Becken. „Das liegt an der geringen Menge an Korrosionsschutzmittel, das unter anderem die Mechanik und die Dichtungen schützen soll“, erläutert Dirk Born, der Leiter der IT, Betriebstechnik und Sicherheit. Born hat die Anlage für die außeruniversitäre Forschungseinrichtung am Hans-Adolf-Krebs-Weg 1 auf dem Nord-Campus konzipiert. Die Göttinger Firma Thälmann baute sie 2003 bei der Erweiterung des Instituts.

Auf dem Beckenrand liegt ein Kescher. „Fische gibt es hier natürlich nicht“, sagt Born. Mit dem Netz fischt er bei Wartungen Ablagerungen heraus, die auf dem Wasser treiben. UV-Strahler töten Keime ab, die durch die Luft eingetragen werden. Andererseits lagert sich zu viel Biomasse in den Rohren ab. Im Becken wird das 16 Grad kalte Wasser zum Kühlen der Laser angemischt. Eine Schaumstoffisolierung außen am Becken sorgt dafür, dass sich kein Kondenswasser bildet.

„Oben auf dem Dach des Instituts stehen fünf Kühlmotoren“, berichtet Born. Ein Motor saugt Luft so stark an, dass die Anlagen selbst bei einer Außentemperatur von 40 Grad Celsius noch Kälte produziert. In den Wintermonaten, wenn die Temperaturen unter acht Grad Celsius sinken, nutzen die Maschinen die Außenluft zum Kühlen. Leitungen führen das sechs bis acht Grad kalte

Wasser ins Becken. Dort wird es mit dem erwärmten Wasser gemischt, das nach dem Kühlen der Laser zu-



Die Laser müssen gekühlt werden, da nicht alle zugeführte Energie in Licht umgewandelt wird.

Alexander Egner, Institutsleiter

rückfließt. In Kupferrohren, die unter der Decke der 340 Meter hohen Räume hängen, wird das frische Kühlwasser in die Labore geführt.

„Die Decken sind nicht abgehängt, damit wir gegebenenfalls Lecks sofort entdecken“, sagt Born. Zudem erwärmen sich hohe Räume nicht so schnell wie niedrige.

„Die Laser müssen gekühlt werden, da nicht alle zugeführte Energie in Licht umgewandelt wird“, erklärt Institutsleiter Alexander Egner. Würde die abstrahlende Wärme nicht abgeführt, dehnten sich die zum Erzeugen des Laserstrahls notwendigen Optiken aus. Damit verändert sich die Justierung, was zu fehlerhaften Ergebnissen führe.

Die im Laboratorium eingesetzten Laser haben eine Leistung von drei bis 100 Kilowatt. Zum Vergleich: Eine Herdplatte bringt es auf eine Leistung von einem, ein Backofen von drei Kilowatt. Mit den Lasern des Instituts lassen sich Stahlplatten wie Butter zerschneiden, aber auch zusammenschweißen.

„Wir müssen zudem die Temperatur im Labor selbst konstant halten“, führt Born aus. Von der vorgegebenen Temperatur, meistens 21 Grad Celsius, darf es nur Abweichungen von plus minus einem halben Grad geben. Klimaanlage unter der Decke kühlen die Räume.

„Wir bekommen die Räume schnell kalt“, sagt Born. Das Institutgebäude ist 1990 erbaut worden. Damals gab es vier Büroräume, die sich kühlen ließen. Bei der Erweiterung 2003 kamen 50 Räume mit Anschluss an die Raumkühltechnik hinzu. Weil die Zwischenschichten in Trockenbauweise errichtet sind, lassen sie sich je nach Bedarf versetzen. „Wir nutzen die Kühltechnik nur dort, wo dies notwendig ist“, stellt Egner klar. Das Institut beschäftigt 60 Mitarbeiter.

46. Fortsetzung

„Unsere Künstler sind es gewohnt, jederzeit Eindruck zu machen“, sagt Greta. Jetzt, da ihre Finger aneinanderliegen, wirkt der dunkelrote Stein wie ein Siegel. „Sie hingegen bleiben unbefangen, das gefällt mir.“

„Ich weiß ja, dass Kunst und Kultur zu einer allseitig entwickelten Persönlichkeit gehören. Aber die heutige Malerei bereitet mir Schwierigkeiten.“ „Sehen Sie sich nicht gern Bilder an?“ „Wenn sie schön sind. Wenn nicht, sehe ich mir lieber die Menschen selbst an.“

„Es kommt aber auf das ‚Wie‘ an, wie ein Gesicht, ein Baum, ein Haus gemalt sind. Darin liegt doch das Glück!“

„Ich warte darauf, dass Greta weiter spricht.“ „Ich möchte das Besondere unserer historischen Situation in den Bildern entdecken“, sage ich dann, „etwas, das mich angeht, das mich ermutigt und motiviert, so was wie Die Freiheit führt das Volk auf die Barrikaden.“ „Das ermutigt Sie? Erinnern Sie sich des zaudernden Herrn im Zyflinder?“ „Auf den hat unser Zeichenlehrer hingewiesen und gesagt, das müsse so sein, es ist ja nur eine bürgerliche Revo-

lution. Aber der Junge, der gefällt mir! Mein Lieblingsbuch ist Wie der Stahl gehärtet wurde und unter den Filmen ist es Ernst Thälmann, Anführer seiner Klasse. Ich mag auch die Arbeiterkämpflieder! Alles das finde ich schön, weil es mir Mut macht, daraus schöpfe ich Kraft – und aus meinem Glauben natürlich.“

„Da habe ich vorhin doch richtig gehört: Sie sind Christ! Und Kommunist?“

„Alle Menschen sind meine Schwertbrüder und Brüder. Und diejenigen, die bereit sind, für eine bessere Welt zu kämpfen, sind meine Genossinnen und Genossen.“ „Haben Sie schon welche gefunden?“ „Es gibt sie, es muss sie ja geben! Sonst herrschte überall Barbarei.“ „Interessant!“ „Ich bin erst seit zwei Wochen christlich.“ „Oh! Dann ist jeder Tag für Sie voller Entdeckungen!“

„Ich muss mich noch daran gewöhnen, dass Gott alle meine Gedanken kennt, jede Lüge, jede Unaufrichtigkeit.“ „Man ist aber nicht für Gedanken, für Wünsche oder Begierden, für irgendwelche Absichten verantwortlich, nur für das, was man tut.“

„Gott legt da einen höheren Maßstab an. Er lässt einen ja nie allein. Wenn ich nicht gedankenlos bin, kann ich seine Gegenwart spüren.“

„Interessant.“ „Warum sagen Sie immer ‚interessant‘?“ „Bisher habe ich erst ein Evangelium gelesen und die Apostelgeschichte. Jetzt bin ich gerade bei den Paulus-Briefen. Leider lese ich langsam.“ „Gute zündet sich eine neue Zigarette an. Nachdem sie zum ersten Mal den Rauch hinhängen gelassen hat, fragt sie: ‚Woran denken Sie?‘“

„Sie sind keine Christin?“ „Wundert Sie das?“ „Wahrscheinlich wissen Sie viel mehr über Jesus und seine Zeit als ich. Sie müssten viel gläubiger sein als ich.“

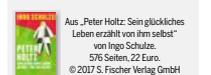
„Aber wenn ich mich einer anderen Religion zuwende, muss ich dann auch an diese glauben?“

„Das lässt sich nicht vergleichen.“ „Wirken tun sie alle!“ „Götzen können einem nicht helfen.“ „Wie unterscheiden Sie das?“ „Na, ganz einfach: Sie brauchen nur zu beten. Entweder Sie erhalten eine Antwort oder nicht.“ „Und Ihnen, Peter, wird geantwortet?“ „Ja! Ich habe es gerade vorhin wieder erfahren. Ich habe gelogen. Ich hatte Angst, dass meine Lüge rauskommt. Das hat mich geplatzt. Am liebsten hat-

te ich mich verkröchen. Gott aber hat mir klargemacht, dass ich meine Angst besiegen muss, wenn ich mich von der Lüge befreien will. Es ist etwas komplizierter gewesen, aber ungefähr so müssen Sie sich das vorstellen.“

„Dann war Ihre kleine Rede vorhin...“ „Ein Werk Gottes“, ergänze ich sie. „Zumindest hat er mich dazu ermutigt.“ „Interessant. Lügen Sie oft?“ „Nein, erst zum zweiten oder dritten Mal. Jetzt muss ich noch Olga sagen, dass ich Geschlechtsverkehr mit Betty hatte. Aber das ist kein Problem mehr für mich.“

Fortsetzung folgt



Aus „Peter Holtz: Sein glückliches Leben erzählt von ihm selbst“ von Ingo Schulze. 576 Seiten, 22 Euro. © 2017 S. Fischer Verlag GmbH

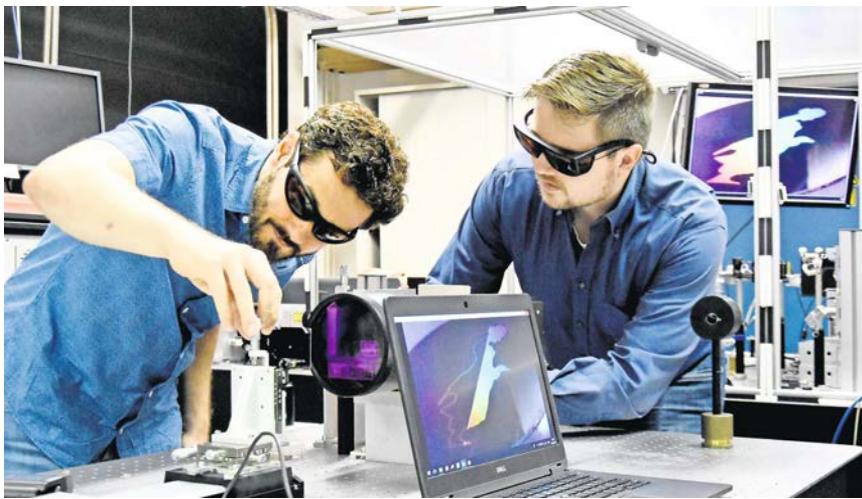
Schutz gegen Produktpiraterie entwickeln

Das Göttinger Tageblatt berichtete über das innovative Verfahren, Markenprodukte in Zukunft gegen Produktpiraterie zu schützen, welches vom Laser-Laboratorium Göttingen in Kooperation mit der Firmengruppe U-NICA entwickelt wurde.

Dienstag, 11. September 2018

REGIONALE WIRTSCHAFT

23



Jan-Hendrik Klein-Wiele (l.) und Frederik Kleinwart im Versuchslabor: Das Laser-Laboratorium hat ein Verfahren entwickelt, mit dem sich ein Hologramm direkt auf einen Verschluss aufbringen lässt.

# Schutz gegen Produktpiraterie entwickelt

Laser-Laboratorium Göttingen bringt Verfahren zur Marktreife / Relief am Werkzeug prägt schillernde Markierung

Von Michael Caspar

Göttingen. Ein innovatives Verfahren, um Markenprodukte gegen Produktpiraterie zu schützen, hat das Laser-Laboratorium Göttingen in den vergangenen drei Jahren mit der Firma U-NICA bis zur Marktreife entwickelt.

„Schillernde, schwer nachzunehmende Markierungen finden sich seit Jahren auf Produkten, die Hersteller gegen Fälschungen schützen wollen“, berichtet Peter Simon, der zuständige Abteilungsleiter beim Laser-Laboratorium. Bisher wurden die Markierungen in der Regel aufgeklebt. Beim neuen Verfahren ließen sich solche je nach Blickwinkel bunt schillernden Nanostrukturen unmittelbar auf Kunststoffteile aufbringen.

„Wir erzeugen dazu auf den Werkzeugen, mit denen Spritzgüsse gefertigt werden, ein Relief“, erläutert Projektleiter Jan-Hendrik Klein-Wiele. So würde die Struktur bereits beim Gießen entstehen. Dadurch falle der Produktionsschritt

des Aufklebens fort, was Zeit und damit Geld spare. Die Markierung sei zudem Teil des Produkts, was

„Das sind extrem kurze Zeiten“, erklärt Projektleiter Frederik Kleinwart. Zum Vergleich: Ein Lichtstrahl bewege sich innerhalb von 1,3 Sekunden vom Mond zur Erde. Innerhalb einer Picosekunde lege das Licht die Entfernung von der Dicke einer Visitenkarte zurück. Eine Femtosekunde sei 1000-Mal kürzer. „Bei längeren Laserpulsen schmilzt das Metall auf und zerstört die feinen Strukturen“, ergänzt Abteilungsleiter Simon.

„Die Reliefs auf den Werkzeugen lassen sich auch durch ein lithografisches Verfahren erzeugen“, sagt Projektleiter Klein-Wiele. Dieser chemische Aätzprozess sei aber aufwendiger und belaste die Umwelt. „Verwendung finden sollen die Markierungen auf den Behältnissen für Kosmetika, Nahrungsmittel oder Pharmazeutika“, kündigt Klein-Wiele an. Produktpiraterie erzeuge

nannten Ultrakurzlasern aufgebracht. Deren Laserpulse blitzen nur für Pico- oder Femtosekunden auf.

„Die Reliefs auf den Werkzeugen lassen sich auch durch ein lithografisches Verfahren erzeugen“, sagt Projektleiter Klein-Wiele. Dieser chemische Aätzprozess sei aber aufwendiger und belaste die Umwelt. „Verwendung finden sollen die Markierungen auf den Behältnissen für Kosmetika, Nahrungsmittel oder Pharmazeutika“, kündigt Klein-Wiele an. Produktpiraterie erzeuge



FOTO: HINZMANN

jährlich Schäden in Höhe vieler Milliarden Euro. Neben der Sicherheit stellten die auffälligen Markierungen auch ein Designelement dar.

„Wir beschäftigen uns seit mehr als zehn Jahren mit solchen Nanostrukturen“, berichtet Abteilungsleiter Simon. Seit 2010 halte das LLG auf ein Verfahren zu ihrer Herstellung ein Patent. Seit fünf Jahren befassten sie sich mit dem Aufbringen

der Markierungen auf Kunststoffteilen. Drei Jahre lang habe sie das Bundesministerium für Wissenschaft und Forschung gefördert. Mehrere Firmen, darunter die Schweizer High-Tech-Unternehmensgruppe U-NICA, die Sicherheitslösungen des Produkts und Markenschutz anbot. Das LLG arbeite mit ihr seit vielen Jahren zusammen. „Wir suchen für unsere Technik neue Anwendungsfelder“, kündigt Projektleiter Klein-Wiele an. So wollten sie solche Sicherheitsmarkierungen auf Glas aufbringen. Sie prüften, ob sich die Oberflächen von Implantaten so verändern ließen, dass Gewebe besser oder auch schlechter anwachsen. Oberflächen könnten wasserabweisend oder wasseranziehend gemacht werden. Auch die Reibungseigenschaften ließen sich durch die Nanostrukturen verändern. Bei Maschinen sollten bewegliche Teile möglichst wenig Reibung erzeugen, um die Energieeffizienz zu verbessern. Bei Teilen, die verformt würden, sei Reibung dagegen erwünscht.

# Hohe Eigenmotivation mitgebracht

Vivian Hildebrand von der Volkshemstätte Göttingen holt sich beim Projekt „Leuchtturm 2018“ Platz zwei

Von Vicki Schwarze

Göttingen. Eine Draufgängerin ist Vivian Hildebrand nicht. Sie wagt nur etwas, wenn sie das Risiko einschätzen kann. Wie im Fall ihrer vorangegangenen Abschlussprüfung zur Immobilienkauffrau, die sie ein halbes Jahr früher als eigentlich vorgesehen ablegte und mit Bravour, nämlich der Note 1,3 bestand. Nicht zuletzt aus diesem Grund schlug ihr Arbeitgeber, die Volkshemstätte Wohnbau Genossenschaft Göttingen, sie für das Projekt „Leuchtturm 2018“ vor, in dem herausragende Auszubildende von der ... ausgezeichnet werden.

Platz 2 und 500 Euro gab es für die in Kassel lebende Preisträgerin. „Das Geld habe ich noch nicht ausgegeben, es liegt noch auf dem Konto“, erzählt Hildebrand. Wünsche materieller Art hat sie eigentlich keine, wie sie sagt. „Aus beruflicher Sicht möchte ich mich einfach weiterentwickeln. Und ansonsten wünsche ich mir, dass meiner Familie und meinen engsten Freunden gut geht.“

Was denkt sie, warum ausgezeichnete sie von ihren Chefs für das Projekt empfohlen worden ist? „Ich

glaube, es liegt mir daran, dass ich eine hohe Eigenmotivation mitbringe und auch großen Einsatz mitbringe“, beschreibt Hildebrand. Und ihre guten Schulnoten machten das Gesamtpaket perfekt.

„Ich arbeite einfach gern“, erzählt sie. Von Beginn an durchfiele sie alle Bereiche innerhalb der Genossenschaft. Besonderen Spaß hat sie im Umgang mit Kunden. Ihre freundliche, aufgeschlossene Art kommt an.

Sie genosse ihre Ausbildung sehr, denn anders als in anderen Berufszweigen gehörte für Hildebrand einmal pro Monat ein einwöchiger Aufenthalt in einem Internat für Immobilienkauffleute in Bochum dazu. Relativ mühselos durch das Abitur gekommen, musste sie jetzt doch viel lernen, entwickelte den Ehrgeiz, eine Top-Prüfung abzulegen. „Ja, ich bin vielleicht eine kleine Streberin“, sagt Hildebrand selbstkritisch. Aber eine sehr sozial eingestellte, denn sie behielt ihr Wissen keineswegs für sich, sondern half, wann immer sie gefragt wurde. „Es ist mir leichtgefallen, weil es mir Spaß gemacht hat.“

Bei der Wahl ihres Ausbildungsberufes kam ihr ein Zufall zu Hilfe,



Vivian Hildebrand.

FOTO: SCHWARZE

denn nach 13 Schuljahren war für sie keineswegs klar, welchen Weg sie einschlagen würde. Wirtschaftsrecht hatte sie sich ausgesucht, viel leicht aus Gernastisch. „Ich habe einfach gemerkt, dass ich so richtig gar nicht wusste, was ich nach dem Abitur anfangen wollte.“

Der Naturfan gönnte sich eine einjährige Auszeit, was in ihrem Fall nicht Nichtstun bedeutete. „Wir haben Freunde und Bekannte, die ha-

ben ihr den Ausbildungsplatz und die Chance, sich zu beweisen.“

Nach „bravouröser“ bestandener Prüfung folgte die Festanstellung. „Ich wollte sehr gern hierbleiben“, erzählt sie. Und auch die zwei Stunden Fahrzeit täglich über die A 7 nimmt sie gern in Kauf, obwohl sie auf den einen oder anderen Stau gern verzichten würde. Verzichten muss sie auf die aktive Teilnahme am Göttinger Entenrennen, bei dem die Volkshemstätte alljährlich mit einem phantasievoll gestalteten Plastiktier dabei war. „Das Amt verliert man sofort, wenn man nicht mehr in der Ausbildung ist“, erklärt sie. Und auch die Dankeschön-Mappe mit sinnvollen Tipps, die jeder Mieter bei Beendigung des Mietverhältnisses bekommt, fällt ihm nicht mehr in ihren Aufgabenbereich.

Dafür warten neue Herausforderungen auf sie, denen sie sich gern stellt, denn sie ist Neuemgegebener sehr aufgeschlossen. Doch es gibt auch Dinge, die möchte sie gar nicht ändern. Ernährt sie sich größtenteils sehr gesund, ist viel Gemüse und Salat, kann sie bei einem Gericht nicht widerstehen. „Ich esse sehr gern Schmitzel.“

# Sieverdings Modelabel Dörpwich

Innovationspreis Göttingen



Stefanie Sieverdings

Göttingen. „Mehr als eine Idee!“ – unter diesem Motto steht der Innovationspreis 2018 des Landkreises. Das Tageblatt stellt die Teilnehmer und deren Innovationen vor. Heute: Stefanie Sieverdings Modelabel.

Dörpwich stellt das Label, das die Modedesignerin Mitte 2017 in Hannover gegründet hat. Der Name, plattdeutsch für „Dorfmaiden“, steht für möglichst kurze Transportwege der Materialien sowie eine nachhaltige und transparente Produktion der Gewebe und des Leders in Deutschland, erklärt Sieverdings. Mehr als zehn Outfits für Frauen und Männer habe sie bisher geschaffen. Sie seien anfällig und ein wenig verrückt. Produziert werde bisher auf Bestellung.

Sieverdings hat in Bremerhaven eine dreijährige schulische Ausbildung zur Assistentin in Gestaltungstechnik für Mode und Design absolviert und dann ihren Bachelor an die Universität Hannover erworben. Schockiert hätten sie die Produktionsbedingungen und die langen, häufig nicht rückverfolgbaren Lieferketten von Textilien, berichtet sie. Dem wolle sie mit ihrem Modelabel etwas entgegensetzen. Ein Jahr lang habe sie die Gründung vorbereitet, habe deutsche Produzenten von Woll-, Baumwoll- und Seidenstoffen sowie von Leder gesucht. mic

# FKG kooperiert mit Phywe

Göttingen. Das Felix-Klein-Gymnasium (FKG) hat eine Kooperation mit dem Unternehmen Phywe Systeme geschlossen. Das Unternehmen, das seit mehr als 100 Jahren naturwissenschaftliche Geräte und Experimentierkästen herstellt, stellt den Schülern des FKG seine digitale Lernplattform zur Verfügung, damit diese „neue Optionen im digitalen Unterricht“ nutzen können, teilt Phywe-Systeme mit. Zudem können die Schüler digitale Messgeräte im Schulunterricht ausprobieren. Die eingesetzten Sensoren des Unternehmens seien gerade erst auf den Markt gekommen. So erhielten die Gymnasiasten Zugang zu moderner Technik im Bereich der Messwertfassung und digitalen Lerninhalten in naturwissenschaftlichen Unterricht. Ihre Eindrücke von Soft- und Hardware teilen die Schüler dem Unternehmen anschließend mit. Dadurch könne der digitale Unterricht verbessert werden. nsg

# Piller besonders demografiefest

Osterode. Niedersachsens Wirtschaftsminister Bernd Althusmann hat die Osteröder Firma Piller Power Systems erneut als „Demografiefestes Unternehmen“ ausgezeichnet. Seit 2013 führt sie bereits das Prädikat „Top-Arbeitgeber in Südniedersachsen“. Im Auditoren-Verfahren zur „Demografiefestigkeit“ sei Piller besonders für seine sozialpartnerschaftliche Kooperation zwischen Betrieb und Unternehmensleitung gewürdigt worden, teilte das Unternehmen mit. Das Zertifikat sei jetzt von Althusmann in Hannover überreicht worden. us

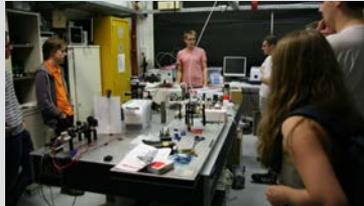
# Pressemitteilungen und Neuigkeiten

## Press releases



**Laser-Laboratorium Göttingen an Aeolus-Mission der ESA beteiligt**  
Der Satellit ermöglicht es erstmals, globale Windprofile zu erstellen und so die Wettervorhersage zu verbessern.

[Den aktuellen Bericht entnehmen Sie bitte unserer Webseite.](#)



### **O-Phase im Laser-Laboratrium Göttingen**

Im Rahmen der Institutsbesichtigungen war auch das LLG wieder ein fester Anlaufpunkt.

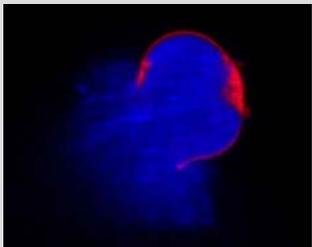
[Den aktuellen Bericht entnehmen Sie bitte unserer Webseite.](#)



### **Kaiser-Friedrich-Forschungspreis 2018 verliehen!**

Das Laser-Laboratorium Göttingen gratuliert seinem Mitarbeiter Herrn Florian Wieduwilt zum Posterpreis 2018.

[Den aktuellen Bericht entnehmen Sie bitte unserer Webseite.](#)



### **Popcorn im Blut**

Göttinger Forscherteam untersucht biophysikalische Grundlagen von weißen Blutkörperchen.

[Den aktuellen Bericht entnehmen Sie bitte unserer Webseite.](#)



### **Innovatives Verfahren schützt Spritzgussteile aus Kunststoff gegen Produktpiraterie**

Göttingen (D), Landquart (CH). Das Laser-Laboratorium Göttingen und U-NICA haben gemeinsam ein neuartiges Verfahren entwickelt, um Original-Produkte gegen Fälschungen zu schützen.

[Den aktuellen Bericht entnehmen Sie bitte unserer Webseite.](#)



### **XLAB International Science Camp zu Besuch im LLG**

9 Teilnehmerinnen und Teilnehmer des XLAB International Science Camp besuchten am 15. August 2018 das LLG.

[Den aktuellen Bericht entnehmen Sie bitte unserer Webseite.](#)

# Pressemitteilungen

## Press releases

### **20 Jahre Measurement Valley**

Als Gründungsmitglied begleitet das LLG Measurement Valley seit 20 Jahren und gratuliert herzlich.

[Den aktuellen Bericht entnehmen Sie bitte unserer Webseite.](#)

### **Treffen der Preisträger des DPG-Abiturpreises im LLG**

Am 2. Juli besuchten ca. 20 Schülerinnen und Schüler, die den Abiturpreis der Deutschen Physikalischen Gesellschaft 2018 erhielten, das LLG

[Den aktuellen Bericht entnehmen Sie bitte unserer Webseite.](#)

### **Vielfalt - eine Bereicherung für unsere Forschung**

Institutsdirektor Prof. Dr. Alexander Egnér unterzeichnet für das Laser-Laboratorium Göttingen die Charta der Vielfalt

[Den aktuellen Bericht entnehmen Sie bitte unserer Webseite.](#)

### **Das Laser-Laboratorium Göttingen präsentiert sich auf der Analytica**

Die Messe Analytica in München gilt als internationale Leitmesse für Labortechnik, Analytik und Biotechnologie.

[Den aktuellen Bericht entnehmen Sie bitte unserer Webseite.](#)

### **Kreativ im Business**

Das Laser-Laboratorium Göttingen (LLG) öffnet Türen für HAWK plus-Seminar

[Den aktuellen Bericht entnehmen Sie bitte unserer Webseite.](#)

### **Kaltes Wasser kühlt heiße Laser**

Im Rahmen der Serie: „Campus-Ansichten“ berichtete das Göttinger Tageblatt über das, am LLG installierte Kühlsystem.

[Den aktuellen Bericht entnehmen Sie bitte unserer Webseite.](#)

### **LLG startet WIPANO-Projekt**

Das Laser-Laboratorium Göttingen startet zum 01.01.2018 das WIPANO-Projekt „DIMAPRO“.

[Den aktuellen Bericht entnehmen Sie bitte unserer Webseite.](#)

