

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
www.llg-ev.de

Impressum

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

Redaktion: PD Dr. Alexander Egner (verantwortlich)

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

Koordination, Gestaltung und Layout: Tatjana Kasten

Bei Abdruck ist die Einwilligung der Redaktion erforderlich.

© 2017. Alle Rechte vorbehalten.

Bildquellen:

Seite 70: Fotalia

Seite 74/75 : Quelle: Christian Waltermann

Seite 76/77: Quelle: B. Al-Qargholi

Seite 79: Fotalia

Seite 80: Moser Curr Opin in Neurobiol 2015

Alle übrigen Abbildungen
Laser-Laboratorium Göttingen e.V.
Photonik Inkubator GmbH

Inhaltsverzeichnis

Contens

Inhalt

Contents

Vorwort	4	Preface	4
Leitbild	8	Mission Statement	8
Das Institut im Profil	9	The LLG Profile	9
Institutsstruktur	10	Institute Structure	10
Das Institut in Zahlen	12	Statistics of the Institute	12
Die Abteilungen	15	The Departments	15
Optische Nanoskopie	16	Optical Nanoscopy	16
Kurze Pulse / Nanostrukturen	34	Short Pulses / Nanostructures	34
Optik / Kurze Wellenlängen	50	Optics / Short Wavelengths	50
Photonische Sensorik	64	Photonic Sensor Technologies	64
Projekte	74	Projects	74
Patente	85	Patents	85
Publikationen	86	Publications	86
Konferenzbeiträge	88	Conference Contributions	88
Abschlussarbeiten	92	Final Thesis	92
Ausgewählte Kooperationspartner	93	Selected Cooperation Partners	93
Messen und Veranstaltungen	94	Press Releases and News	94

Vorwort

Preface

Liebe Leserin, lieber Leser,

im Bereich der Photonik werden weltweit jährlich rund 400 Milliarden Euro erwirtschaftet, laut Spectaris, dem Verband der Hightech-Industrie. Spectaris rechnet auch künftig mit jährlichen Wachstumsraten von 7 Prozent. Während die asiatische Photonik-Industrie hauptsächlich für den Massenmarkt produziert, konzentrieren sich die deutschen Firmen auf innovative Produkte und Hightech-Anwendungen. Damit setzte die Branche, die zu 90 Prozent mittelständisch geprägt ist, im vergangenen Jahr mehr als 30 Milliarden Euro um. Das entspricht einem Weltmarktanteil von 8 Prozent. Bezogen auf die Europäische Union liegt der Marktanteil der deutschen Photonik-Firmen sogar bei 43 Prozent. Die Unternehmen in der Bundesrepublik exportieren zwei Drittel ihrer Produktion. Niedersachsen besitzt im Bereich Photonik mit Göttingen einen starken Forschungs- und Wirtschaftsstandort.

Das Laser-Laboratorium Göttingen, das in den ersten Jahren nach seiner Gründung 1987 hauptsächlich auf Forschung im Bereich der Excimerlaser fokussiert war, hat sich seither breit aufgestellt. Heute zählen wir zu den führenden Experten für nanoskaliges Strukturieren, Analysieren und Abbilden mit Licht. Das LLG entwickelt vorhandene Techniken zur Nanostrukturierung weiter und erforscht auf diesem Feld zudem neue Ansätze. Es arbeitet an Messtechniken, bei denen es um die Propagation von Licht, aber auch um den Einsatz von Licht in der Prozess- und Materialanalytik geht. Es befasst sich mit Verfahren, welche im Labor mit einer Auflösung von deutlich unterhalb von 100 Nanometern abbilden – sowohl im sichtbaren Bereich durch den Einsatz von schaltbaren Markern als auch durch den Einsatz kurzer Wellenlängen im EUV- beziehungsweise im Röntgenbereich. Durch die Verknüpfung des Fachwissens aus den genannten Bereichen erzielt das LLG Synergien, die für gesellschaftlich wichtige Themen wie Produktion, Leben und Gesundheit von Bedeutung sind.

Grundlage des Technologietransfers, den das LLG leistet, ist die Forschung. Sie beweist die Umsetzbarkeit von neuen Ideen und Konzepten und entwickelt sie bis zur Produktionsreife weiter. Dieser Prozess dauert in der Photonik meistens mehrere Jahre. Die notwendigen Fördergelder kommen unter anderem von der Deutschen Forschungsgemeinschaft, dem Bundesministerium für Bildung und Forschung sowie dem Bundesministerium für Wirtschaft und Energie.

Erfolge im Technologietransfer konnten wir unter anderem durch Auslizenzierungen an die ProOpto GmbH und die U-NICA Gruppe erzielen. ProOpto ist ein Göttinger Unternehmen, das als Spin-off der LLG-Abteilung Optik / Kurze Wellenlängen entstand. Es entwickelt und vertreibt kamerabasierte Metrologiesysteme. Vom LLG erwarb es Lizenzen für Laserstrahlcharakterisierung (Laser beam profiler), Wellenfront-Sensoren inklusive Harmann-Schack-Sensoren, einen photothermischen Absorptionsmessplatz sowie die Strahldiagnose-Software "MrBeam".



PD Dr. Alexander Egner
Institutsdirektor

Vorwort

Preface

Dear Readers,

The photonics industry generates a total revenue around EUR 400 billion per year according to Spectaris, the association for the high-tech industry. Spectaris also anticipates an annual growth rate of seven percent in the future. While the Asian photonics industry mainly serves the mass market, German companies focus on innovative products for small and medium and high-tech applications. The industry, 90 percent of which is made up of medium-sized companies, generated over EUR 30 billion last year. This corresponds to a global market share of eight percent. Within the European Union, the market share of German photonics companies is as high as 43 percent. Companies based in Germany export two thirds of their production volume. With Göttingen, Lower Saxony has a strong research and business location for photonics.

Laser-Laboratorium Göttingen, which primarily focused its research on excimer lasers in the initial years after its foundation, has since adopted a broader focus. We are now one of the leading experts in nanoscale structuring, analysis, and imaging with light. LLG enhances existing technologies for nanostructures and also researches new approaches in this field. It works on measurement techniques dealing with the propagation of light as well as the use of light in process and material analysis. It deals with procedures that offer imaging with a resolution of well below 100 nanometers in the laboratory, both in the visible range through the use of switchable markers and through the use of short wavelengths in the EUV or X-ray range. By combining expertise from the areas mentioned, LLG achieves synergies that are relevant for socially important issues such as production, life, and health.

The basis of the technology transfer conducted by LLG is research. It demonstrates the feasibility of new ideas and concepts and makes them ready for production. In photonics this process typically takes several years. The necessary funding comes from establishments such as the German Research Foundation, the Federal Ministry of Education and Research, and the Federal Ministry for Economic Affairs and Energy.

Some of our successes in technology transfer came in the form of outlicensing to the ProOpto GmbH and the U-NICA Group. ProOpto is a Göttingen-based company that was created as a spin-off from the LLG department Optics/Short Wavelengths. It develops and markets camera-based metrological systems. It acquired licenses from LLG for laser beam profiling, wave-front sensors including Shack-Hartmann sensors, a photothermal absorption-measuring station, and the beam diagnosis software "MrBeam".

Vorwort

Preface

Die U-NICA Gruppe ist ein Schweizer Hightech-Unternehmen. Die Gruppe, die zu den führenden Anbietern innovativer und ganzheitlicher Sicherheitslösungen beim Produkt- und Markenschutz zählt, hat vom LLG ein Verfahren zum Einprägen von schillernden, schwer nachzuahmenden Markierungen (diffraktive Strukturen) in Kunststoff-Spritzgussteile auslizenzsiert und vermarktet es weltweit.

Sechs Projekte betreut der vom LLG mitgegründete und seit 2014 aktive Photonic Inkubator (PI) derzeit. Die von Bund und Land finanzierte GmbH ermöglicht es Gründerteams aus der Wissenschaft, innovative Forschung in marktfähige Produkte umzusetzen. Die Teams erwerben zeitgleich das nötige betriebswirtschaftliche Know-how.

Das LLG hat in 2017 den Trend der Vorjahre fortgesetzt und erneut das beste Ergebnis seit Bestehen des Instituts erwirtschaftet. Dazu trägt eine erneute Steigerung der Drittmittel bei. Insbesondere bei den direkten Auftragseinnahmen aus dem Ausland konnten wir noch einmal deutlich zulegen.

Diese hervorragende Leistung spiegelt das Engagement und den Ideenreichtum unserer Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern. Ihnen gilt mein herzlicher Dank.

Ihnen als Leserinnen und Lesern unseres Jahresberichts wünschen wir eine anregende Lektüre. Gerne unterstützt Sie das LLG beim Einsatz innovativer optischer Technologien in Ihrem Unternehmen.

Ich wünsche Ihnen viel Freude bei der Lektüre!

Ihr



Vorwort

Preface

The U-NICA Group is a high-tech company from Switzerland. The group, which is one of the leading providers of innovative and comprehensive security solutions in product and brand protection, has licensed a procedure from LLG for embossing iridescent, difficult-to-imitate markings (diffractive structures) into plastic injection-molded parts and markets this worldwide.

Six projects are currently in progress at the Photonik Inkubator, which was co-founded by LLG and has been in existence since 2014. The limited liability company, which is funded by the Federal and State Governments, enables founding teams from the world of science to turn innovative research into marketable products. The teams also acquire the necessary business expertise.

LLG continued in 2017 the trend of previous years and once again achieved the best result in the history of the institute. A further increase in external funding was responsible for this. In particular, we once again made significant gains in direct order revenue from abroad.

This outstanding result reflects the commitment and resourcefulness of our employees. I would like to express my gratitude to them.

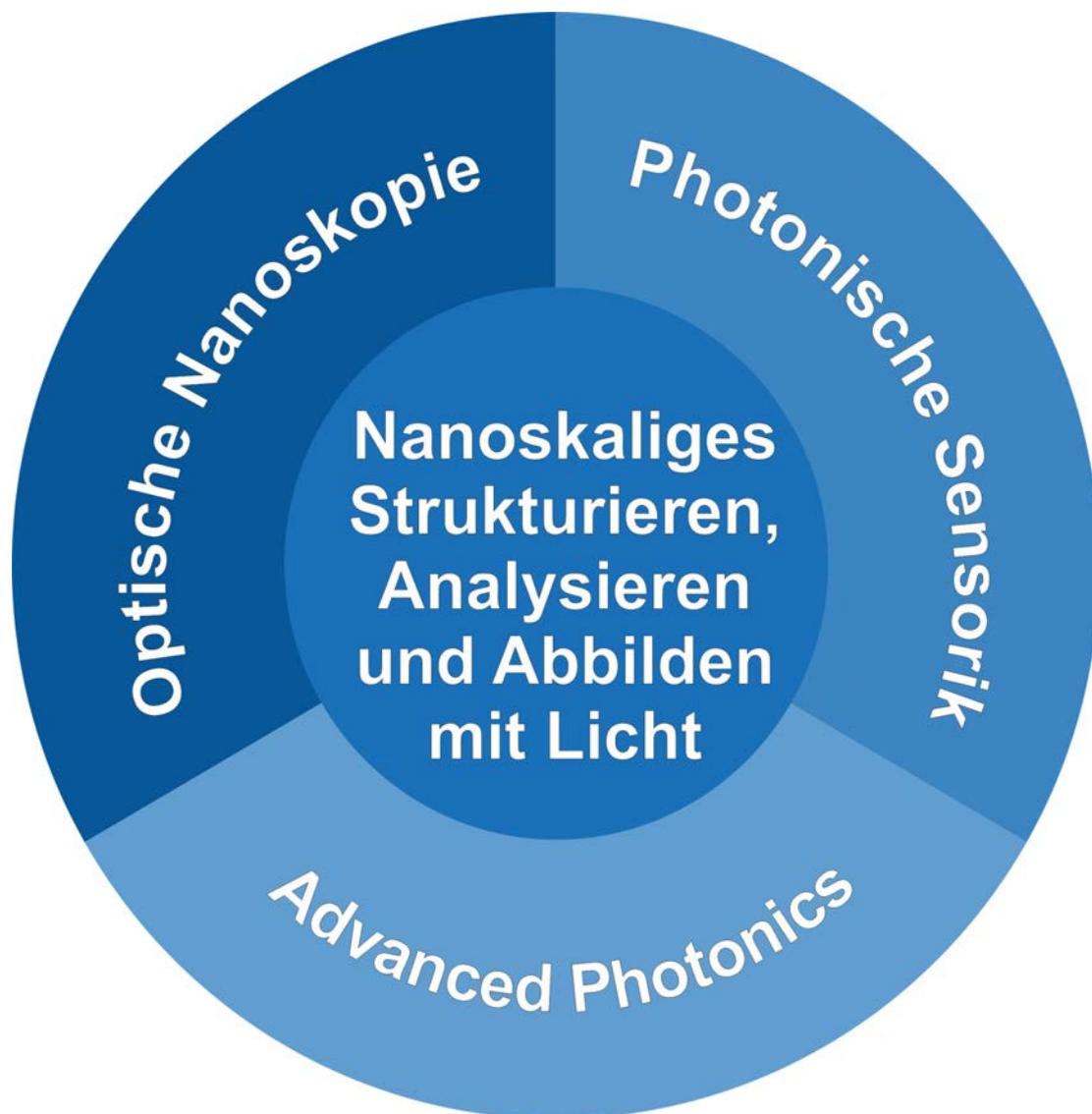
I hope you will enjoy reading our annual report. The LLG would be happy to support you in the use of innovative optical technologies in your company.

Happy reading!

Yours



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 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 Laboratory 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, quickly 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



PD Dr. Alexander Egner
Institutsdirektor



Birgit Sterr
Verwaltungsleiterin

Kompetenzfelder



PD 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. Die wirtschaftliche Entwicklung hat sich auch im Jahr 2017 im erfreulichen positiven Trend der vergangenen Jahre fortgesetzt und führte zum besten Jahresergebnis seit Bestehen des LLG.

Das Laser-Laboratorium erhält einen wichtigen Anteil zur Grundfinanzierung in Form einer institutionellen 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 Drittmittelanteil aus Auftragsforschung in Zusammenarbeit mit der Industrie sowie aus Projekten des Bundes und der DFG.

Personalentwicklung

Das Laser Laboratorium Göttingen beschäftigte am Ende des Jahres 2017 insgesamt 50 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 hochqualifizierten Fachkräften hervorragende Chancen am Arbeitsmarkt. So haben 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

Drei Promotionen wurden im LLG 2017 in Kooperation mit der Georg-August-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 bietet es regelmäßig Praktikanten Einblicke in die moderne Laserforschung.

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.

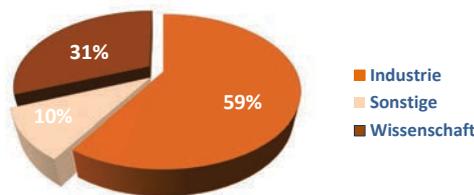


Birgit Sterr
Verwaltungsleiterin

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

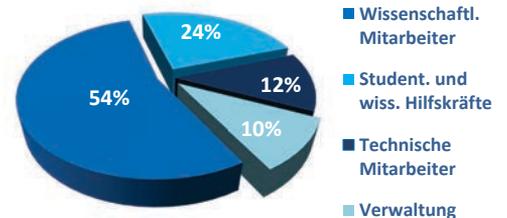
Mitarbeiter Staff members

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



▲ Anschlussbeschäftigungen

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



▲ Personalstruktur

Personalstruktur in Beschäftigtkategorien.
Personnel structure in occupational categories.

Das Institut in Zahlen

Statistics of the Institute

Economic development remains

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. In 2017 as well, economic development continued in the positive trend of recent years and led to the best annual result in the history of the LLG.

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 remains

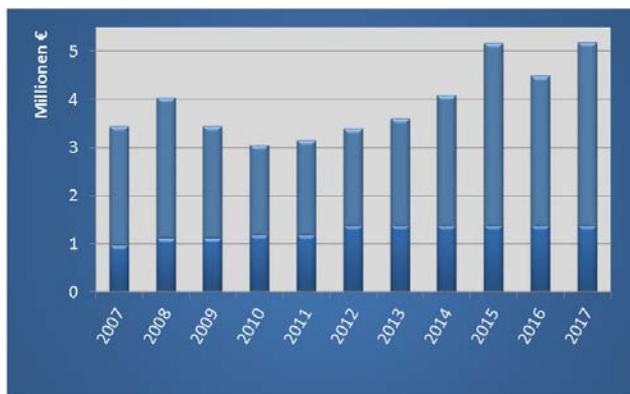
At the end of 2017, Laser-Laboratorium Göttingen employed a total of 50 staff members, of which the majority were in temporary training and work models. As highly qualified technical staff, all employees of the institute are afforded excellent opportunities on the labour market due to the close-knit 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 remains

In 2017, 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's and master's 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 remains

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 are supported by well-trained technical staff as well as reliable administration under the leadership of Birgit Sterr, who is also the Deputy Chairwoman of the LLG.

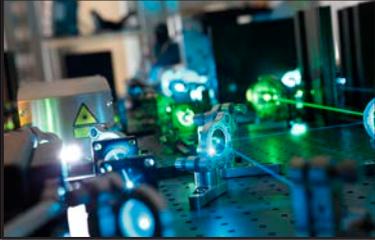


Betriebshaushalt: Grundfinanzierung durch das Land Niedersachsen. Eigene Einnahmen durch Projekte und Industrieaufträge.

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

Die Abteilungen

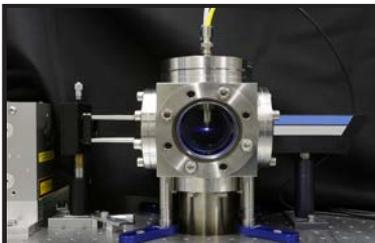
The Departments



Optische Nanoskopie
Optical Nanoscopy



Kurze Pulse / Nanostrukturen
Short Pulses / Nanostructures

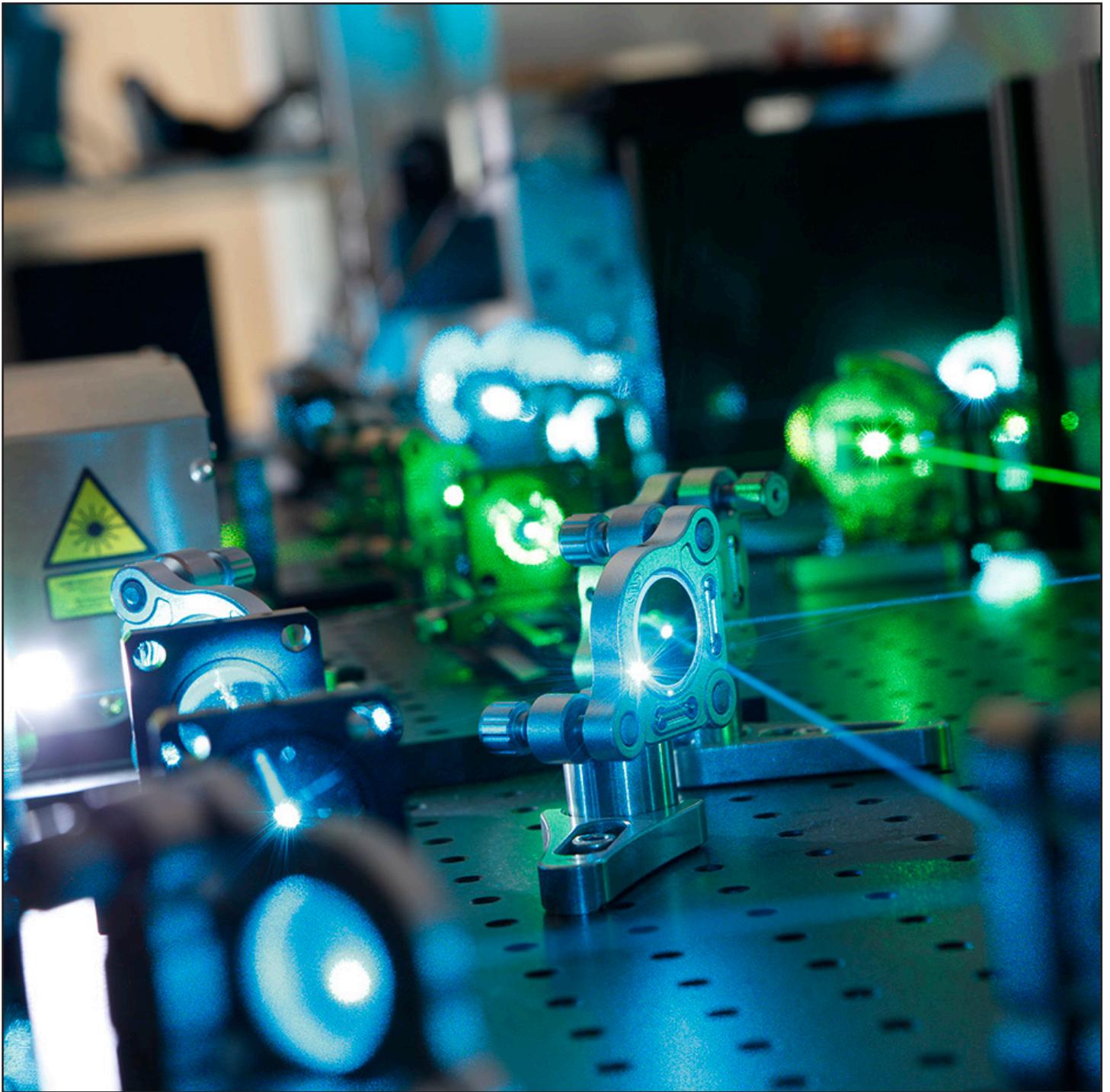


Optik / Kurze Wellenlängen
Optics / Short Wavelengths



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, sequentiell 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.



PD Dr. Alexander Egner
Institutsdirektor
Abteilungsleiter

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

Mitarbeiter Staff members

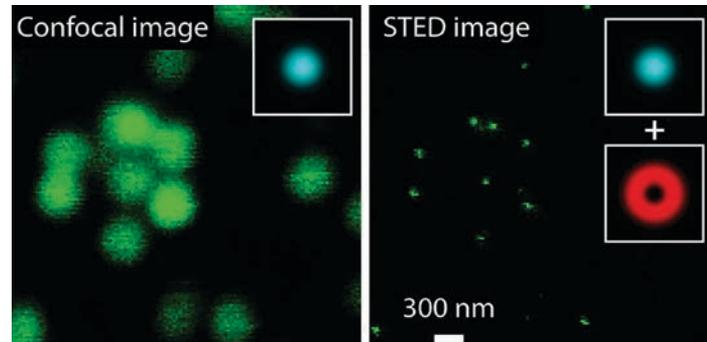
Dr. Thomas Fricke-Begemann
Dr. Claudia Geisler
Parul Jain
Oskar Laitenberger
Julia Kratz
Jennifer-Rose Krüger
Dr. Francesco Rocca
René Siegmund
Dr. Kareem Soliman
Britta Vinçon

Optische Nanoskopie

Optical Nanoscopy

STED-Mikroskopie

Der Schlüssel zur Umgehung der Beugungsgrenze mit frei propagierenden Lichtstrahlen liegt darin, die Eigenschaften der verwendeten Markermoleküle auszunutzen. Die STED-Mikroskopie (Stimulated Emission Depletion, stimulierte Fluoreszenzlöschung) beispielsweise nutzt den Prozess der stimulierten Emission, um Fluoreszenzmarker vom (hellen) angeregten elektronischen Zustand in den (dunklen) elektronischen Grundzustand zu überführen. Hierzu wird ein gaussförmiger Anregungsfokus mit einem typischerweise donutförmigen STED-Fokus überlagert. Mit dem Ersten werden Markermoleküle angeregt. Mit dem Zweiten werden diese angeregten Moleküle schnell wieder ausgeschaltet, noch bevor sie Fluoreszenzphotonen aussenden. Nur in der Mitte des STED-Donuts, in der die STED-Intensität gleich null ist, können die Moleküle noch fluoreszieren. Zur Bildaufnahme wird diese Nullstelle pixelweise durch das Bildfeld gerastert. Die Auflösung des STED-Bildes, die durch die Ausdehnung des fluoreszierenden Spots bestimmt wird, hängt von der Intensität des STED-Strahls und den photophysikalischen Eigenschaften der verwendeten Fluoreszenzmarker ab. Sie ist theoretisch unbegrenzt. Experimentell werden derzeit problemlos wenige 10 Nanometer erreicht, was einer Auflösungsverbesserung um über eine Größenordnung entspricht.



◀ Konfokale (links) und STED-Aufnahme (rechts). Die Einsatzbilder zeigen die jeweils verwendeten fokalen Intensitätsverteilungen. Confocal (left) and STED image (right). The insets show the focal intensity distributions used in each case.

Für viele biologische Fragestellungen ist es interessant, die relative räumliche Verteilung zweier unterschiedlicher Molekülsorten in hoher Auflösung zu untersuchen. Beispielsweise lassen sich aus der farbcodierten Ortsdarstellung zweier Proteinsorten Rückschlüsse hinsichtlich ihrer Interaktion oder ihrer Funktion ziehen. Unsere technische Umsetzung eines solchen STED-Mikroskops erreicht Hochauflösung in zwei Farben mit nur einem STED-Laser. Die Überlagerung der zwei Kanäle ist dadurch unabhängig von Justage und chromatischen Aberrationen. Zudem profitieren die Bildqualität und die Nutzerfreundlichkeit des Mikroskops davon, dass beide Kanäle quasisimultan bei minimalem Übersprechen aufgenommen werden. Zusammen mit unseren Kooperationspartnern an der Universität Tel Aviv untersuchten wir mit diesem System beispielsweise die Verteilung von zwei Proteinen, die eine wichtige Rolle für die Resistenz von Krebszellen gegenüber körpereigenen Abwehrmaßnahmen spielen. Die hohe räumliche Auflösung der Zweifarben-STED-Bilder ermöglichte es, sowohl das Clusterverhalten der Proteine Mortalin und C9 als auch die Kolokalisation beider an der Zellmembran zu analysieren.

Optische Nanoskopie

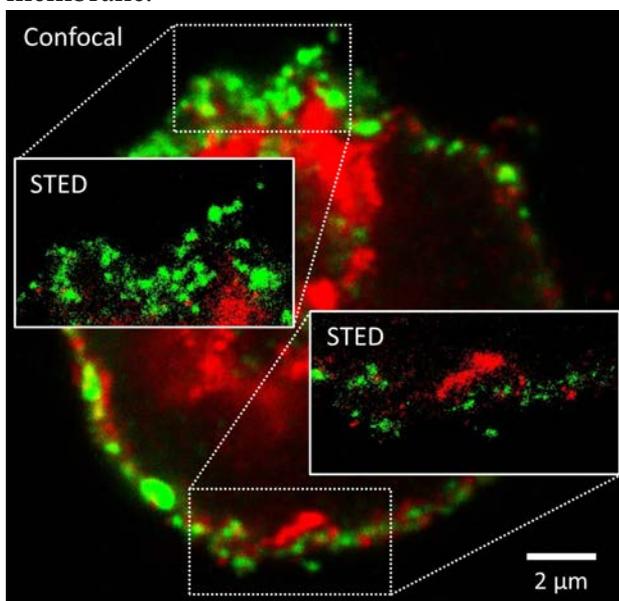
Optical Nanoscopy

STED microscopy

The key to overcoming the diffraction barrier with freely propagating light waves is to exploit the properties of the fluorescent markers used. STED (Stimulated Emission Depletion) microscopy, for example, uses stimulated emission to "switch" fluorescent markers from their (bright) excited electronic state to their (dark) electronic ground state. For this purpose, a Gaussian-shaped excitation focus is superposed with a typically doughnut-shaped STED focus. The first excites the markers, while the second switches these molecules rapidly off before the fluorescence emission takes place. Hence, only in the very center of the doughnut, where the STED intensity is zero, fluorescence emission is allowed. The STED image is recorded by scanning the zero intensity point through the field of view pixel by pixel. The resolution of the STED image is given by the extent of the fluorescent spot, which depends on the applied STED intensity and the photophysical properties of the fluorophore. Currently, a few 10 nanometers can be reached experimentally without any problems. This represents a resolution enhancement by more than one order of magnitude.

For many biological questions, it is of interest to investigate the relative spatial distribution of two different types of molecules at high resolution. This provides decisive new information, for example, a color-coded image of protein locations allows conclusions about the protein's interactions or functions. Our implementation of such a STED microscope achieves super-resolution in two color channels using only a single STED beam. Hereby, the overlap of both channels is independent of alignment and chromatic aberrations. Another feature of our microscope design, from which image quality and user friendliness benefit greatly, is that both channels are acquired quasi-simultaneously with minimal crosstalk.

In cooperation with Tel Aviv University, we used this microscope to study the distribution of two types of proteins, which play a key role in the high resistance of cancer cells against the body's own defenses. The sub-diffraction resolution of the two-color STED images enabled us to analyze not only the clustering of mortalin and C9, but also the colocalization of both proteins at the cell membrane.



◀ Zweifarbiges Konfokalbild mit Ausschnittsvergrößerungen in Hochauflösung (STED) der Verteilungen der Proteine Mortalin (rot) und C9 (grün) in einer suspendierten K562-Zelle.

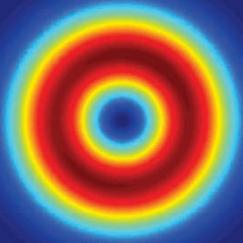
Two-color confocal image with high-resolution STED insets of the distribution of the protein's mortalin (red) and C9 (green) in a suspended K562 cell.



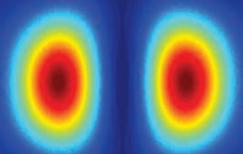
Optische Nanoskopie

Optical Nanoscopy

Doughnut-shaped focus



1D focus



Tomographische STED-Mikroskopie

Die STED-Mikroskopie basiert auf der gezielten Eingrenzung des fluoreszenz-emittierenden Bereichs, die durch die Überlagerung des Anregungsfokus mit einem typischerweise donutförmigen STED-Fokus realisiert wird. Die erreichbare Auflösung hängt von der STED-Leistung ab und ist theoretisch unbegrenzt. Jedoch ergeben sich praktische Limitierungen, zum Beispiel durch die verfügbare Laserleistung oder durch die Photostabilität der verwendeten Fluoreszenzfarbstoffe.

Eine von uns entwickelte Variante der STED-Mikroskopie erzielt eine identische Auflösungserhöhung wie die klassische Implementierung, verwendet dafür aber im Vergleich niedrigere Laserleistungen und geringere Belichtungszeiten. Die geringere Lichtdosis ist nicht nur in Experimenten von Vorteil, welche über eine begrenzte Laserleistung verfügen, sondern reduziert auch 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. Somit werden hellere und besser aufgelöste Bilder ermöglicht.

Das Grundprinzip der neuen Methode ist, dass der fluoreszierende Bereich nicht in zwei Dimensionen, sondern nur in einer Dimension eingeschränkt wird. Ein zweidimensionales, hochaufgelöstes Bild lässt sich dann aus einer Sequenz von Einzelbildern, die eine hohe Auflösung in nur einer, aber jeweils unterschiedlicher Richtung zeigen, rekonstruieren. Da diese Verfahrensweise Analogien zu tomographischen Methoden aufzeigt, bezeichnen wir die neue STED-Variante als tomographische STED-Mikroskopie (tomoSTED-Mikroskopie).



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.

Optische Nanoskopie

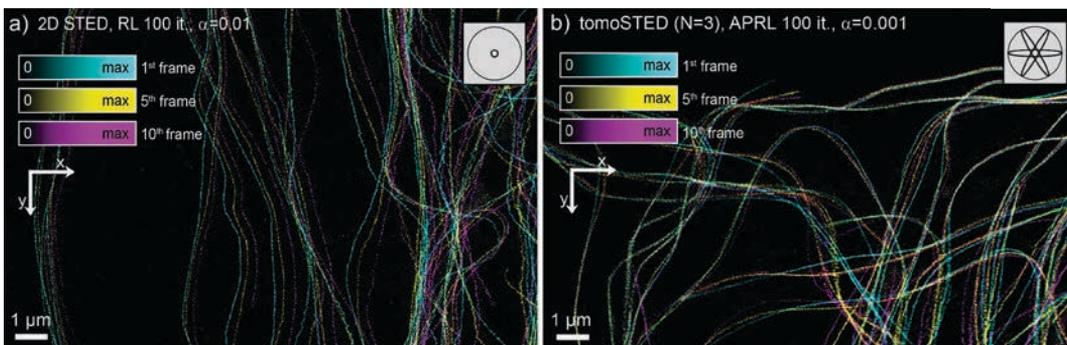
Optical Nanoscopy

Tomographic STED microscopy

The resolution enhancement in STED microscopy is based on narrowing the effective fluorescent area by superposition of an excitation focus with a, typically doughnut shaped STED focus. The attainable resolution increase is theoretically unlimited, but may inter alia be practically restricted by the available STED laser power or by the stability of the fluorophores used.

We have developed a novel STED microscopy variant that achieves the same resolution enhancement as the conventional implementation, but uses comparatively lower STED laser powers and shorter exposure times. The lower light dose is not only beneficial for intensity-limited experiments, but also reduces the sample's exposure to laser radiation and therefore relaxes the requirements on the fluorophore's photostability. In turn, this increases the fluorescence photon yield per dye molecule, which is especially beneficial under signal-limited imaging conditions as it allows brighter and higher resolved images.

The key principle of this method is that the fluorescence area is not narrowed in two, but only in one direction. A two-dimensionally super-resolved image can then be reconstructed from a series of single images with a high resolution in only one direction, but with different orientations. Since this method exhibits similarities to tomographic imaging, it is referred to as tomographic STED microscopy (tomoSTED microscopy).



▲
Visualisierung des Mikrotubulinetzwerkes in einer lebenden Zelle zu unterschiedlichen Zeitpunkten mittels konventioneller STED-Mikroskopie (a) und tomoSTED-Mikroskopie (b). Gezeigt sind jeweils das erste (cyan), das fünfte (gelb) und das zehnte Bild (magenta) einer Zeitserie. Das tomoSTED-Bild weist im Vergleich die gleiche Qualität auf, obwohl es mit der halben STED-Laserleistung und der halben Aufnahmezeit erfasst worden ist.

Visualization of the microtubule network in a living cell at different time points with conventional STED microscopy (a) and tomoSTED microscopy (b). The first (cyan), the fifth (yellow), and the tenth (magenta) frame of a time series are shown. Although the tomoSTED image was taken with half the STED power and half the acquisition time, it features the same image quality as the conventional STED image.

Optische Nanoskopie

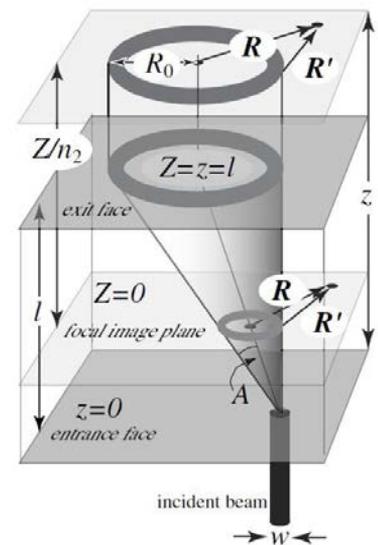
Optical Nanoscopy

Ultraschnell umschaltbare Abregungsverteilungen für die tomoSTED-Mikroskopie

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

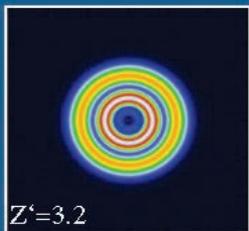
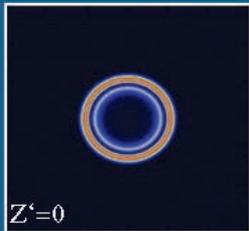
Skizze des divergierenden Strahlkegels, der sich in einem biaxialen Kristall ausbildet. (Aus J. Berry, Opt. A: Pure Appl. Opt. 6, 2004)

Sketch of the divergent ray cone that forms inside a biaxial crystal. (From J. Berry, Opt. A: Pure Appl. Opt. 6, 2004)

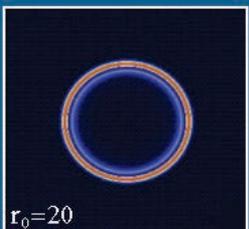
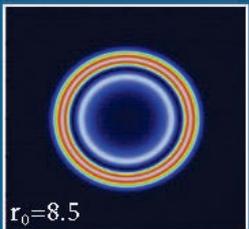
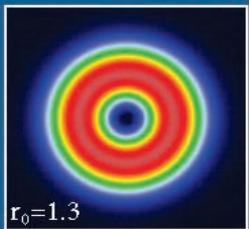


Beispielsweise können für sehr kleine Distanzen zwei Intensitätsringe beobachtet werden, die mit größerer Distanz breiter werden. Zudem bildet sich eine axiale Intensitätsspitze aus. Der Radius des innersten Rings hängt von r_0 ab und nimmt mit zunehmendem r_0 zu. Durch Variation dieser Parameter in 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 von r_0 und Z 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 100 kHz umgeschaltet werden. Dies verbessert die Stabilität des tomoSTED-Mikroskops gegenüber Probenbewegungen und macht es somit zu einem vielversprechenden Kandidaten für Lebendzellmessungen.

Variation of Z'



Variation of r_0



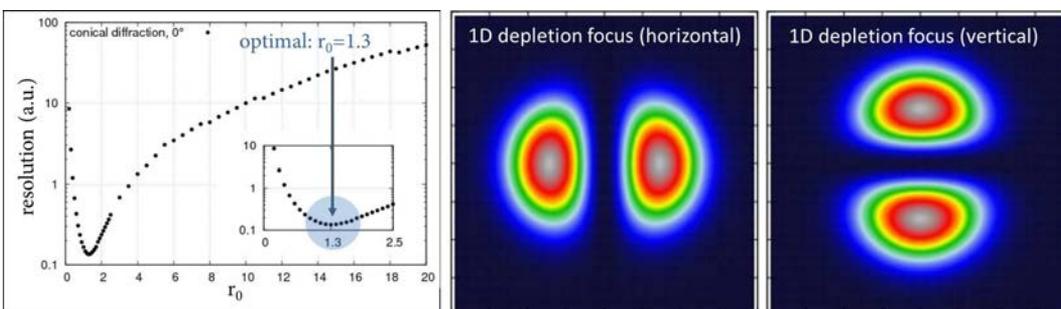
Optische Nanoskopie

Optical Nanoscopy

Ultrafast switchable depletion patterns for tomoSTED microscopy

TomoSTED microscopy benefits from fast, ideally pixelwise, rotation of the depletion pattern orientation, since a two-dimensionally resolved image is reconstructed using multiple single images with a high resolution in only one direction, but with different orientations. 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 example, two intensity rings can be observed for very small distances, which become wider with greater distance. In addition, an axial spike forms. The radius of the innermost ring depends on r_0 and increases with increasing r_0 . By varying those parameters in both simulations and experiments, the intensity distribution was optimized to yield the best resolution using these depletion patterns for tomo-STED microscopy. It was shown that for the optimal choice of r_0 and Z , 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 make it a promising candidate for live-cell imaging.



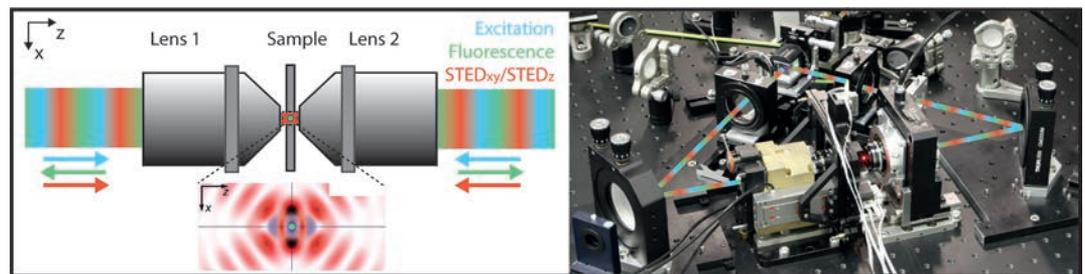
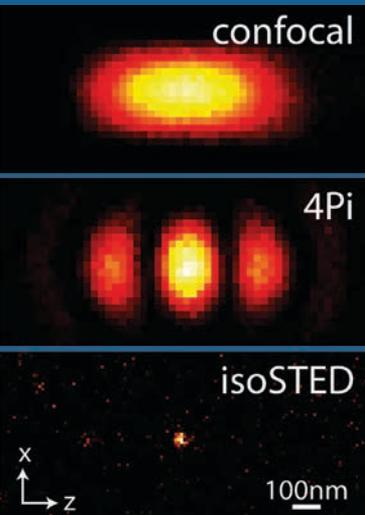
▲
Links: Optimierung der Auflösung für $r_0 = 1,3$ und $Z' = 0$. Rechts: Optimale simulierte Intensitätsverteilungen (nach einem zusätzlichen Polarisator) für lineare Eingangspolarisation. Durch Rotation der Eingangspolarisation kann die Verteilung beliebig gedreht werden.
Left: Optimization of the resolution for $r_0 = 1.3$ and $Z' = 0$. Right: Optimum simulated intensity distributions (after an additional polarizer) for linear polarization of the incident beam. By rotating the polarization of the incident beam, the pattern can be rotated by arbitrary angles.

Optische Nanoskopie

Optical Nanoscopy

Isotrope Hochauflösung im isoSTED-Mikroskop

Um eine isotrope Auflösung in allen drei Raumrichtungen zu erreichen, kombiniert die isoSTED-Mikroskopie die 4Pi- mit der STED-Mikroskopie. Bereits die gleichzeitige kohärente Verwendung von zwei sich gegenüberstehenden Objektiven (4Pi-Konfiguration) verringert - im Vergleich zum Konfokalmikroskop - die axiale Ausdehnung des Fokus um einen Faktor von drei bis fünf. Eine weitere Reduktion des fluoreszierenden Bereichs wird durch die geschickte inkohärente Überlagerung des Anregungsfokus mit zwei zusätzlichen STED-Fokussen (STED_{xy} und STED_z), deren Intensitätsverteilungen eine gemeinsame Nullstelle besitzen, erreicht. 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 (rechts).

Two objective lenses in 4Pi configuration (left). One excitation and two STED beams are superimposed between the lenses and create an isoSTED focus in the sample plane. Experimental implementation of the 4Pi configuration (right).

Mit diesem "3D-Nanoskop" ist es möglich, rein optisch und demzufolge nicht-invasiv beliebige laterale Ebenen mit einer Dicke von 30 nm in einer intakten Zelle zu adressieren. Die Verwendung eines Strahlscanners und eines axialen Piezo-scanners 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.

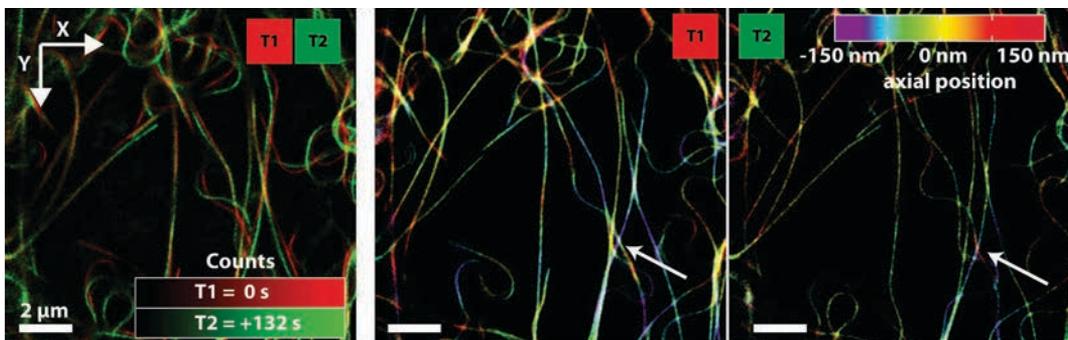
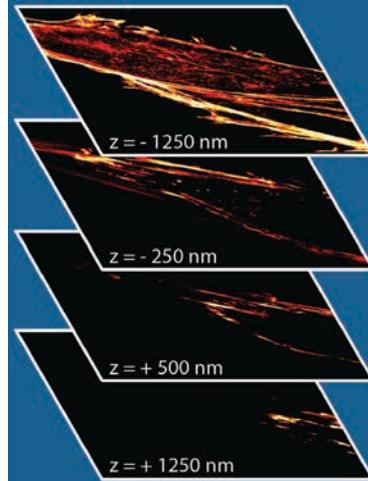
Optische Nanoskopie

Optical Nanoscopy

Isotropic super-resolution with the isoSTED microscope

In order to achieve an isotropic resolution in all three spatial dimensions isoSTED microscopy combines 4Pi and STED microscopy. The coherent use of two opposing objective lenses (4Pi configuration) reduces the axial dimension of the excitation focus by a factor of 3–5 as compared to the confocal (single lens) implementation. The ingenious superposition of the excitation focus with two depletion foci (STED_{xy} and STED_z) that feature a common zero further reduces the fluorescent volume. 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 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 Mikrotubulinnetzwerkes in einer lebenden Zelle zum Zeitpunkt T1 und 132 Sekunden später (T2). Links: Die Überlagerung beider Aufnahmen zeigt die laterale Bewegung des Netzwerkes. 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).

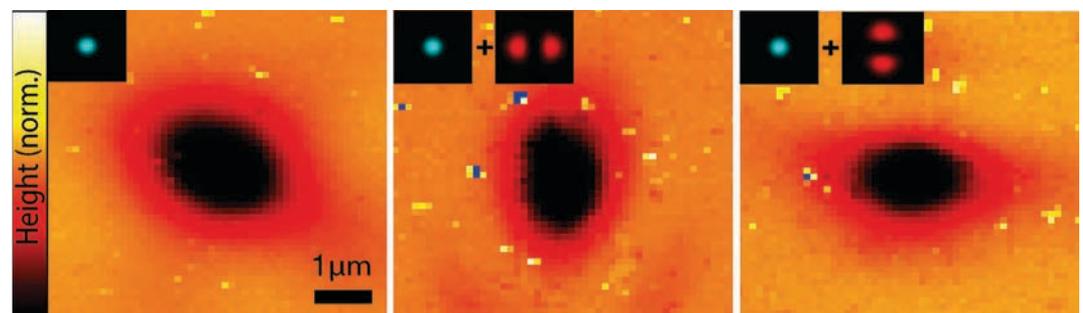
Optische Nanoskopie

Optical Nanoscopy

Neues STED-unterstütztes Nanostrukturierungsverfahren

Das direkte Schreiben von Nanostrukturen mit einem fokussierten Laser hat in den letzten Jahren 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.

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 laserinduzierten 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 zeigten, 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 Potential, selbst harte Materialien wie Quarz oder Saphir mit Strukturgrößen deutlich unterhalb des Beugungslimits zu strukturieren.



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.

Ablation of a PMMA surface without (left) and with STED light (middle, right). For both orientations of the STED mode (see insets), the extent of the ablated region is clearly reduced in the respective direction.

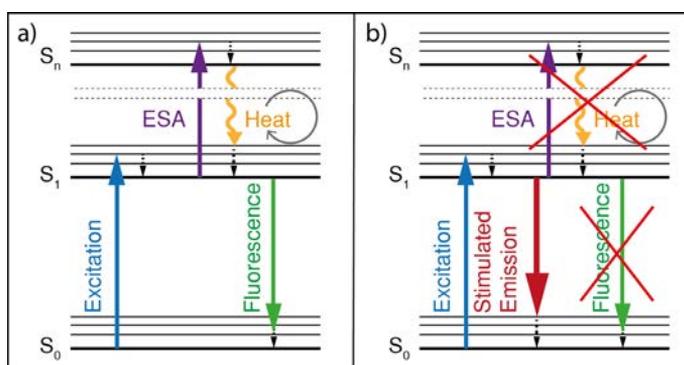
Optische Nanoskopie

Optical Nanoscopy

Novel STED-assisted nanostructuring method

Direct laser writing techniques have gained considerable significance for writing nanostructures in the last years. However, since light cannot be focused to an arbitrarily small spot due to its wave nature, the attainable resolution is diffraction-limited. This limit has been overcome in STED microscopy by transferring molecules to their (dark) ground state 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 additive.

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 material surface 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.



Kontrolle der Wärmeerzeugung mittels STED. a) Wärme wird generiert, indem Moleküle wiederholt vom ersten angeregten elektronischen Zustand S_1 in höhere angeregte Zustände S_n (excited state absorption, ESA) überführt werden und von dort strahlungslos nach S_1 zurückfallen.

b) STED-Licht entvölkert den Zustand S_1 durch stimulierte Emission und unterbindet die Wärmeerzeugung und damit auch den Materialabtrag.

Controlling heat generation with STED. a) Heat is generated when molecules repeatedly undergo a cycle of excitation from the first excited electronic state S_1 to higher electronic states S_n (ESA, excited state absorption) and radiationless decay back to S_1 . b) STED light depletes the S_1 state by stimulated emission and therefore prevents heat generation and thus material ablation.

Optische Nanoskopie

Optical Nanoscopy

SMS-Mikroskopie

Die SMS (Single Marker Switching)-Mikroskopie umfasst viele moderne Nanoskopievarianten (zum Beispiel PALM, STORM, FPALM, PALMIRA, GSDIM, dSTORM), die alle auf dem gleichen Prinzip beruhen: Sie nutzen die photophysikalischen Eigenschaften fluoreszierender Markermoleküle, um die Beugungsgrenze zu umgehen. Anders als beim ensemblebasierten Ansatz (zum Beispiel bei der STED-Mikroskopie) geschieht dies bei der SMS-Mikroskopie auf Einzelmolekülbasis. Einzelne Marker werden 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. Die räumlich und zeitlich getrennten beugungsbegrenzten Fluoreszenzbilder der aktivierten Moleküle erlauben die Bestimmung ihrer Position. Die Lokalisationsgenauigkeit ist hierbei besser als das Beugungslimit und skaliert mit \sqrt{N} , wobei N die Anzahl der detektierten Photonen ist. Nachdem die 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 bestimmten Markerpositionen ergibt dann das hochaufgelöste SMS-Bild.

Prinzip der SMS-Mikroskopie. Links: Nur einige wenige Marker befinden sich in ihrem hellen Zustand, so dass ihre beugungsbegrenzten Bilder auf dem Detektor nicht überlappen. Ihre lokalisierten Positionen werden in ein Positionshistogramm eingetragen. Mitte: Nachdem die Marker im ersten Zyklus ausgelesen und ausgeschaltet worden sind, werden neue Marker eingeschaltet. Rechts: Dieser Vorgang wird genügend oft wiederholt, um das Objekt zu rekonstruieren. ▶

Principle of SMS microscopy. Left: Only a few markers reside in their bright state so that their diffraction-limited patterns do not overlap on the detector. Their determined positions are registered in a histogram. Center: After the markers have been read out and switched off in the first cycle, new markers are switched on. Right: This is repeated until enough marker positions have been registered to reconstruct the object.

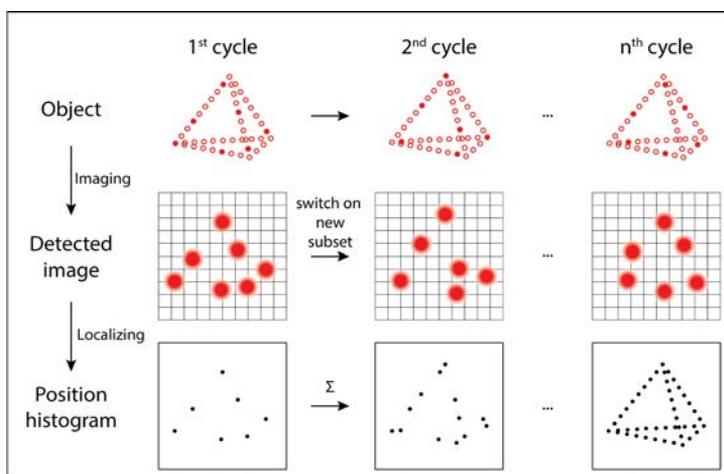
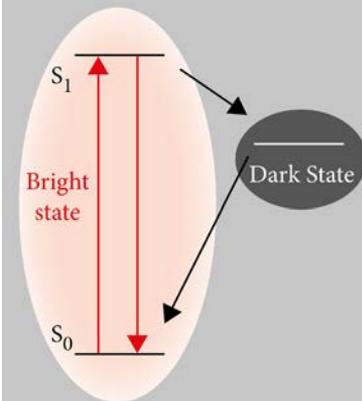
Die verwendeten molekularen Schaltprozesse sind vielfältig und hängen von der Wahl der Markermoleküle ab. PALM schaltete in seiner ersten Implementierung beispielsweise photoaktivierbare fluoreszierende Proteine irreversibel an. STORM nutzt als photoinduzierten Schaltvorgang die reversible Cis-trans-Isomerisierung von Paaren von Cyaninfarbstoffen. Weitere Beispiele eines lichtinduzierten Schaltprozesses sind die reversible Ringöffnung bei Rhodaminspiroamiden und das irreversible Abspalten einer Molekülgruppe (uncaging) bei Rhodamin-NN-Farbstoffen. Von diesen Ausführungsarten setzen sich Varianten wie GSDIM und dSTORM ab, die so genannte konventionelle (nicht schaltbare) Fluorophore benutzen. Die Moleküle befinden sich hierbei anfänglich im elektronischen Grundzustand S_0 , aus dem sie in einen langlebigen (metastabilen) Dunkelzustand gepumpt werden. Von hier aus ist der Schaltprozess durch die spontane Rückkehr in den Grundzustand gegeben, welcher typischerweise durch zusätzliche Beleuchtung mit UV-Licht unterstützt werden kann. Da die letzteren Methoden im Prinzip mit einem einzelnen Laser auskommen, sind sie apparativ einfach zu implementieren.

Optische Nanoskopie

Optical Nanoscopy

SMS microscopy

The term SMS (Single Marker Switching) microscopy encompasses many state-of-the-art nanoscopy schemes (e.g. PALM, STORM, FPALM, PALMIRA, GSDIM, dSTORM), which all rely on the same principle. They use the photophysical properties of fluorescent markers to overcome the diffraction limit. In contrast to ensemble-based methods (e.g. STED microscopy), the molecules are manipulated individually. In the SMS scheme, single markers are randomly selected from a large number of markers being in a dark state and transferred to a bright, detectable state by a stochastic on-switching process. The position of each molecule is determined from its diffraction-limited fluorescence image, which is separated spatially and temporally from the spots of other molecules. 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 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.



The utilized molecular processes are manifold and depend on the choice of the marker molecule. For instance, in its first implementation, PALM used irreversible on-switching of photo-activable fluorescent proteins. STORM exploits the photo-induced reversible cis-trans isomerization of pairs of cyanine dyes. Further examples for light-induced switching mechanisms are the reversible ring-opening of rhodamine spiroadmides and the irreversible cleavage of molecular groups (uncaging) in rhodamine-NN dyes. Methods like GSDIM and dSTORM set themselves apart since they operate with conventional (not switchable) fluorophores. The molecules initially reside in their electronic ground state S_0 , from which they are pumped into a long-living (metastable) dark state. The activation process is given by the spontaneous return to the ground state, which can typically be enhanced by additional UV light illumination. The latter methods are very easy to implement since they basically require only a single laser.

Optische Nanoskopie

Optical Nanoscopy

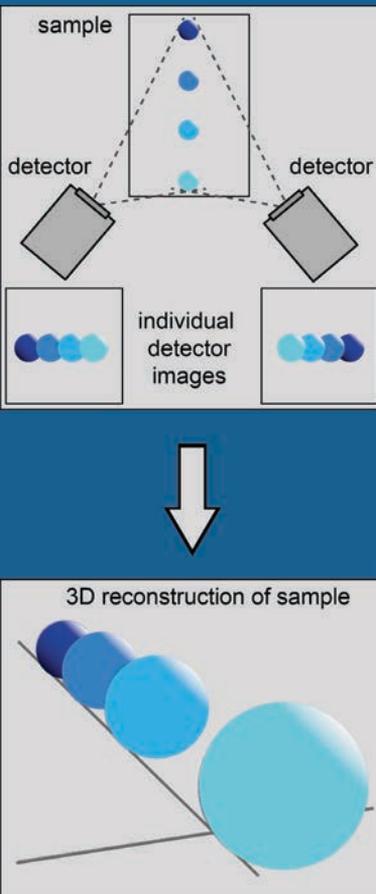
TetraSMS-Mikroskopie: isotrope Auflösung in einem großen axialen Bereich

Während die Erweiterung der STED-Mikroskopie in die dritte Dimension (3D-STED, isoSTED) auf dem gleichen Prinzip beruht wie die zweidimensionale Auflösungs-erhöhung, stehen in der SMS-Mikroskopie mehrere Methoden zur Verfügung, um die axiale Position eines Emitters zu bestimmen. In der Regel wird hierzu die axiale Symmetrie der Punktverteilungsfunktion (engl.: point spread function (PSF)) in der Detektion gebrochen: Die Form der PSF wird beispielsweise mit Hilfe von Astigmatismus oder unter Verwendung einer Doppelhelixstruktur so geändert, dass sie für jede axiale Emitterposition eindeutig ist. Ebenso kann über eine Detektion in zwei axial versetzten Ebenen eine Zuordnung zu einer eindeutigen axialen Position erreicht werden. Verwendet man zwei sich gegenüberstehende, Objektive (4Pi-Konfiguration), so kann die Detektionseffizienz verdoppelt werden, womit die Lokalisationsgenauigkeit um den Faktor $\sqrt{2}$ gesteigert wird. Interferenz des durch beide Objektive detektierten Signals verbessert die axiale Lokalisierung weiter, so dass Auflösungen von 6 nm in der axialen und 8–22 nm in der lateralen Richtung gezeigt werden konnten. Jedoch sind diese Interferenztechniken auf dünne Schichten beschränkt.

Links: Die 3D-Ansicht von Mitochondrien in einer HeLa-Zelle zeigt die isotrope Auflösung des TetraSMS-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 TetraSMS microscope over a large axial range. Right: Cross-sections of single mitochondria. Scale bar: 250 nm.

Wir haben aus diesem Grund ein 3D-SMS-Mikroskop entwickelt, welches auf dem Prinzip der Stereoskopie beruht und nicht dieser axialen Einschränkung unterliegt. Unser Mikroskop kommt dabei ohne Modifikationen der Detektions-PSF und komplizierte Interferenzmuster aus und verwendet stattdessen vier niedrig numerische Objektive, die sich in einer tetraederähnlichen Anordnung befinden. Während die Probe gleichzeitig durch alle vier Objektive beobachtet wird, werden Informationen aus unterschiedlichen Blickwinkeln gesammelt, welche es erlauben, hochaufgelöste 3D-Bilder in einem axial ausgedehnten Volumen von mindestens $6 \times 6 \times 6 \mu\text{m}^3$ ohne Rastern der Probe zu gewinnen. Die Bildqualität profitiert signifikant davon, dass der ausgenutzte Raumwinkel im Vergleich zur Detektion durch ein einzelnes, hochnumerisches Objektiv deutlich größer ist und dass das zu lösende, lineare Gleichungssystem überbestimmt 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 zum Beispiel auf die Größe der Teilchen oder die Viskosität des umgebenden Mediums geschlossen werden kann.

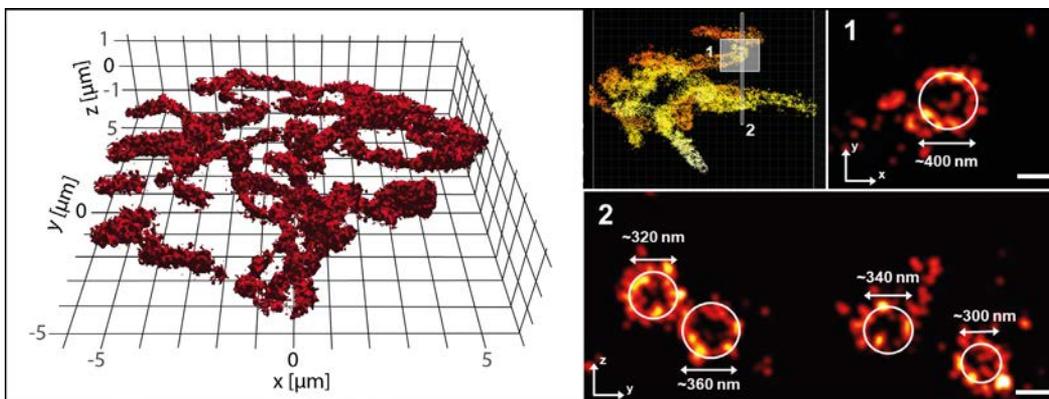


Optische Nanoskopie

Optical Nanoscopy

TetraSMS microscopy: isotropic resolution over large axial range

While the expansion of STED microscopy to the third dimension (3D STED, isoSTED) is based on the same principle as the resolution increase in two dimensions, several techniques can be used to determine the label's axial position in SMS microscopy. Typically, this is done by breaking the axial symmetry of the detection point spread function (PSF): The astigmatism and the double-helix PSF techniques unambiguously change the shape of the PSF depending on the label's axial position, whereas in the biplane technique two axially displaced detection planes are used to enable unambiguous axial localization. By using two opposing objective lenses in a 4Pi like geometry, the detection efficiency can be increased twofold, improving the resolution by a factor of $\sqrt{2}$. Interference between the signals detected through both lenses increases the axial resolution even further resulting in an overall resolution of ~ 6 nm in the axial and 8-22 nm in the lateral direction. However, these methods are restricted to thin layers.



We have developed a 3D SMS microscope based on the stereo view principle that clearly overcomes this axial restriction. Our microscope makes even detection PSF modifications as well as delicate interference patterns obsolete. By simultaneously observing an emitter through four low numerical aperture (NA) objectives that are oriented in a tetrahedron-like shape, our microscope allows acquiring super resolved 3D images within an axially extended volume of at least $6 \times 6 \times 6 \mu\text{m}^3$ without scanning. The image quality benefits from the significantly enhanced solid angle as compared to detection through a single standard high NA lens as well as from the greatly overdetermined set of linear equations in the algorithms. 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.

Optische Nanoskopie

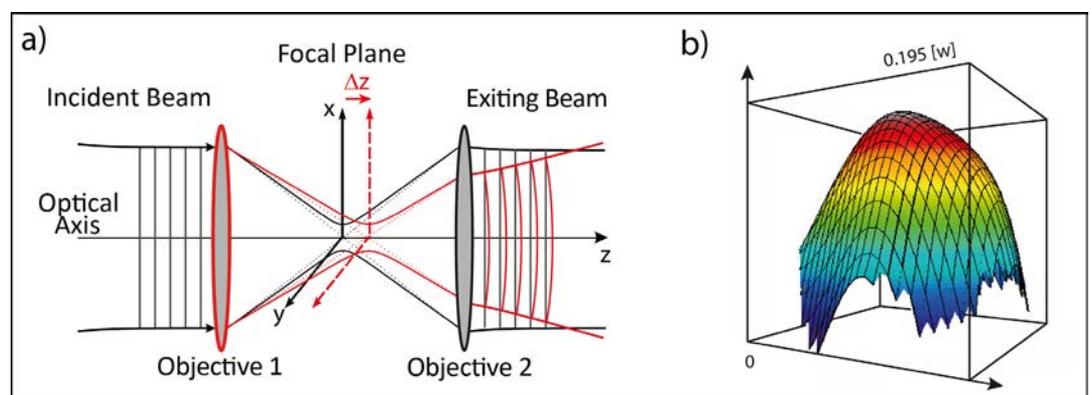
Optical Nanoscopy

Charakterisierung laserinduzierter Wellenfrontaberrationen 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 Leistung 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 100 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.

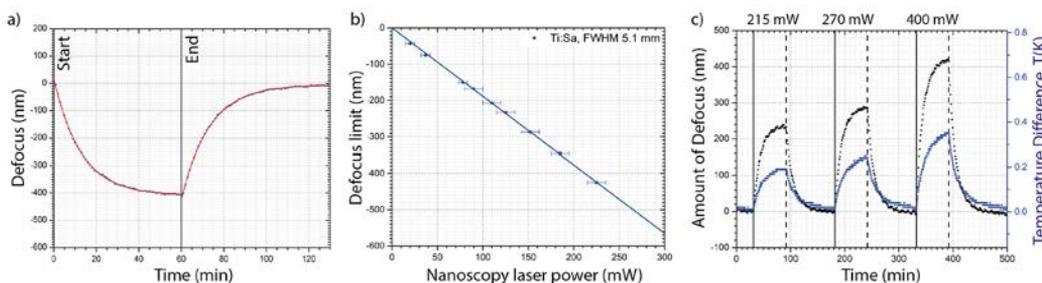
Optische Nanoskopie

Optical Nanoscopy

Analysis of laser-induced wavefront aberrations in microscope objectives

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-power 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.

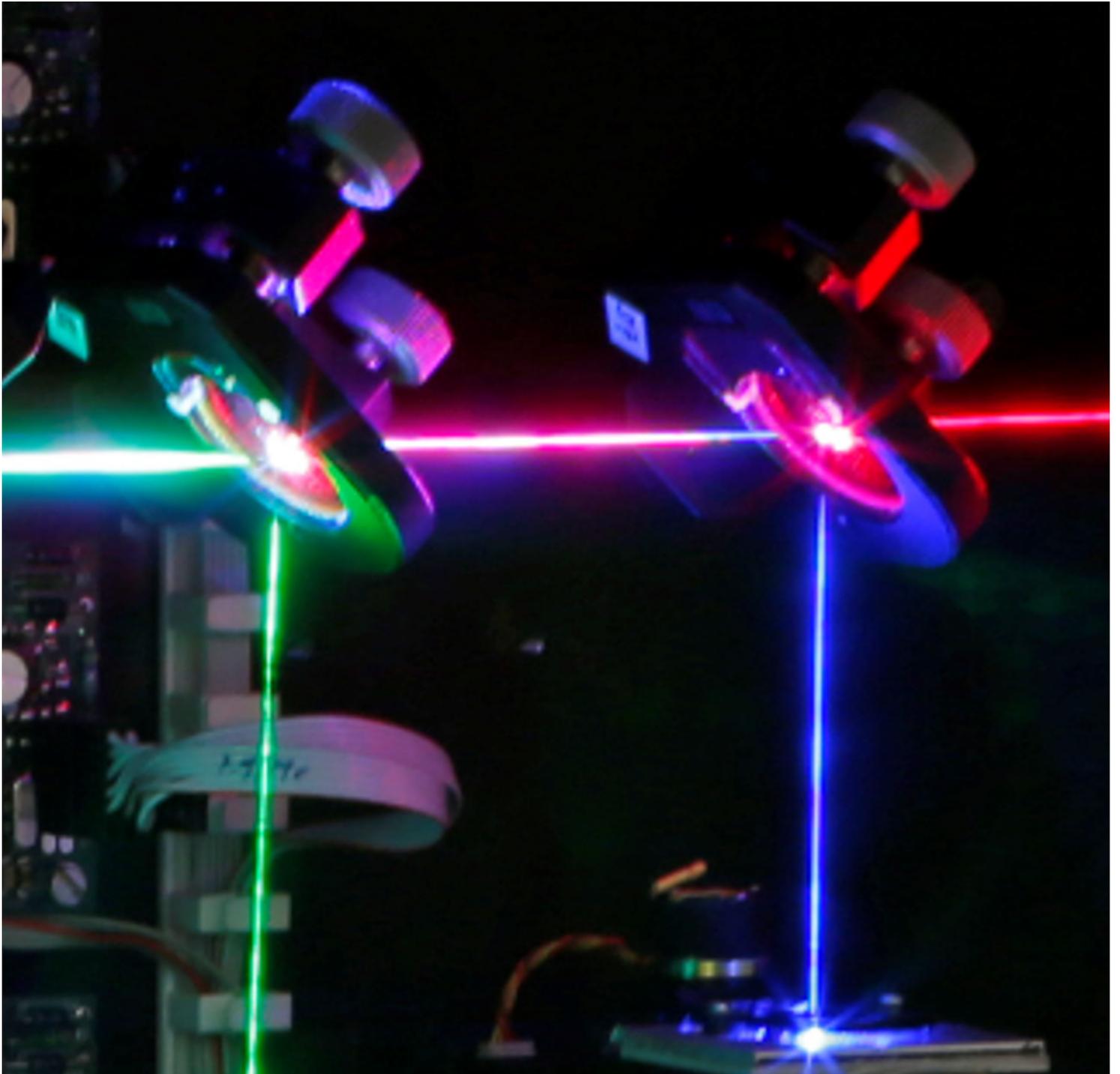


▲ a) Zeitliches Verhalten der Defokus-Amplitude während und nach der Beleuchtung mit dem Nanoskiplaser. b) Die maximale Amplitude konvergiert bis zu einem Grenzwert, der proportional zur angelegten Laserleistung ist. c) Die Defokus-Amplitude steht in direktem Zusammenhang mit der Temperaturänderung der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

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 of the objective lens' surface.

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.

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- μm -Präzision erreicht. Strukturdetails mit Abmessungen im Bereich 50 nm sind realisierbar. Dabei gewinnt der Einsatz ultrakurzer Pulse in immer mehr Anwendungsgebieten zunehmend an Bedeutung. Mittlerweile sind kompakte, industrietaugliche Ultrakurzpuls laser verfügbar, dennoch ist die in unserer Abteilung betriebene Weiterentwicklung ultrakurzpulsbasierter Techniken für ein nachhaltiges Wachstum dieses Technologiebereichs unabdingbar. Dabei steht die Erzeugung energetischer ultrakurzer Pulse sowie die Erzeugung periodischer Nanostrukturen auf technischen Oberflächen im Mittelpunkt.

Aktuelle Themen sind die Erzeugung leistungsstarker ultrakurzer Pulse mit gasgefüllten Hohlwellenleitern, die grundlegende Untersuchung der Dynamik der Laserablation mittels ultrakurzer UV-Pulse unter Confinement-Bedingungen, die diffraktiv wirksame Markierung von Werkstoffflächen und die Verwendung dynamischer Strahlformungselemente für die hocheffiziente Oberflächenmarkierung. Weitere Arbeiten befassen sich mit der Glas-Nanostrukturierung sowie der Erzeugung plasmonischer Nanopartikel in Glas. Darüber hinaus wird die laserbasierte Herstellung von mikrooptischen Komponenten und Si-Nanokristallen untersucht.

Micro- and nanostructured surfaces give rise to numerous functionalities for fluidic, tribological, medical or optical applications. Laser ablation or surface modification are the enabling technologies for their flexible and economic fabrication. Beam delivery concepts like mask projection and interference methods allow sub- μm 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. Although 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. Special emphasis is put on the generation of energetic ultrashort pulses and the fabrication of periodic nanostructures on technical surfaces.

In the following sections, recent achievements in these fields are summarised. First, our results on the generation of energetic few-cycle pulses using gas-filled hollow fibers will be surveyed. Next, a study of the ablation dynamics of solid surfaces under confinement layers following irradiation by ultrashort UV pulses will be presented. Then, our latest developments on diffracting marking by direct laser writing will be sketched, and progresses in the dynamic beam shaping for efficient surface-marking applications will be demonstrated. Additional research is focused on the micro- and nanopatterning of glass and the generation of plasmonic nanoparticles in glass. Furthermore, laser-based fabrication of micro-optical elements as well as the fabrication of silicon nanocrystals are also investigated.



Dr. Peter Simon
Abteilungsleiter

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

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

**Mitarbeiter
Staff members**

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

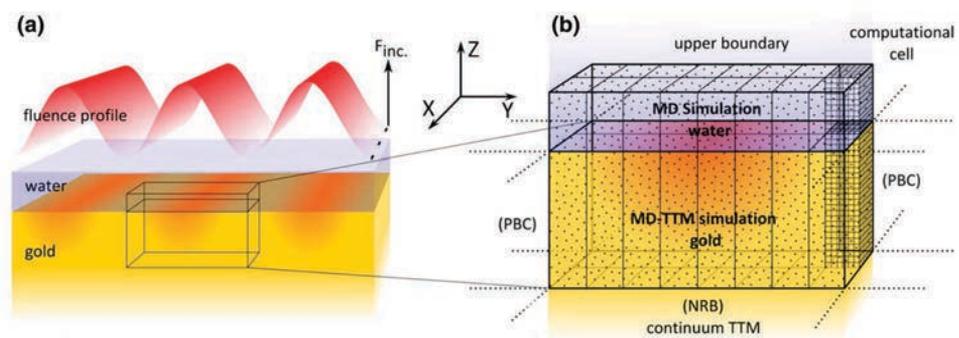
Kurze Pulse / Nanostrukturen

Short Pulses / Nanostructures

Periodische Nanostrukturierung von Metalloberflächen unter dem Einfluss einer Wasserdeckschicht

Bei der Oberflächen-Strukturierung mit Lasern kann eine transparente Deckschicht oberhalb des zu bearbeitenden Materials die entstehende Oberflächen-Topologie drastisch beeinflussen. Eine mögliche Anwendung dieser Technik ist das Vermeiden meist ungewollter Redeposition von ablatiertem Material auf der Oberfläche. Weiterhin kann der Druckaufbau unter der Confinement-Schicht genutzt werden, um die Form der entstehenden Struktur zu beeinflussen.

Der direkte Vergleich von theoriebasierten Modellrechnungen mit Experimenten ist essentiell, um die zugrundeliegenden Prozesse zu verstehen, und hilft uns bei der Optimierung der resultierenden Strukturen für spezifische Funktionalitäten. In Zusammenarbeit mit der Universität Kassel und der Technischen Universität Kaiserslautern werden wir diese Forschungsarbeit fortsetzen und die einzigartigen Möglichkeiten der Molekulardynamik-Simulationen weiter anwenden. Dies ermöglicht die Untersuchung der Entwicklung des Materialtransports auf einer atomaren Skala über einen Zeitraum von einigen ns, nachdem die Energie durch den ultrakurzen Laserpuls deponiert worden ist. Bisherige Vergleiche von simulierten und experimentellen Ergebnissen bezüglich der Beeinflussung der Strukturierung durch eine Confinement-Schicht zeigen dabei eine gute Übereinstimmung.



▲ Skizze des Bestrahlungsmusters im Experiment und das Volumen der Simulation. In (a) ist das sinusförmige Profil der eingehenden Laserfluenz gezeigt. In (b) ist die gesamte Simulationszelle für die Multiprozessor-Methode schematisch dargestellt. Dabei wird in jedem Prozessorkern ein Atomistisch-Kontinuums-MD-TTM für das Metallsubstrat im dreidimensionalen Raum gelöst. Unterhalb der nicht reflektierenden Grenzschicht (NRB) wird ein gewöhnliches Zwei-Temperatur-Modell im Kontinuum gelöst, um den Wärmeeintrag in tiefere Schichten der Probe zu beschreiben. *Sketch of the irradiation pattern for the experiments and the computational box for the simulation. In (a), the sinusoidal profile of the incident laser fluence is shown. In (b), the entire computational cell is schematically represented for the multiprocessing mode. In each particular processor core, an atomistic-continuum MD-TTM for the metal substrate is solved in 3D space. Beneath the non-reflective boundaries (NRB), an ordinary two temperature model is solved in continuum to account for the heat flux within deeper parts of the sample.*

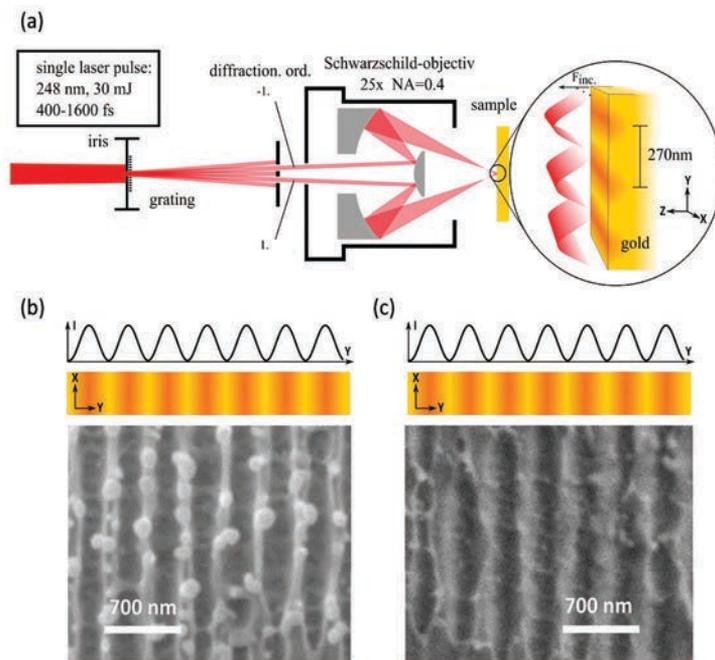
Kurze Pulse / Nanostrukturen

Short Pulses / Nanostructures

Periodic nanostructuring of metal surfaces under spatial confinement by a water layer

In laser surface-structuring processes, a transparent confinement layer on top of a target material can drastically influence the resulting topology. One possible application of this technique is to avoid the mainly unwanted redeposition of ablated material on the surface. Another is the effect of an increased pressure build-up beneath the confinement layer that can drastically affect the shape of the resulting structures.

Direct comparison of theory-based model calculations with experiments is crucial in understanding the mechanisms underlying these processes and helps in optimizing the resulting structures for specific functionalities. In collaboration with the University of Kassel and the Technical University of Kaiserslautern, we will continue our research and utilize the unique possibilities given by molecular dynamics simulations. This allows us to examine the evolution of the material transport on an atomic scale over a few nanoseconds after the energy is deposited by an ultrashort laser pulse. Comparison of simulated and experimental results on the influence of structuring by a confinement layer obtained so far show good agreement.



Schema des experimentellen Aufbaus zur periodischen Nanostrukturierung von Oberflächen (a). Darunter sind REM-Aufnahmen von nanostrukturiertem Gold an Luft (b) und unter Wasser-Confinement (c) zu sehen, bei einer Fluenz von jeweils $500 \text{ mJ}/\text{cm}^2$. Oberhalb der Aufnahmen ist die Intensitätsverteilung über die Probenoberfläche dargestellt.

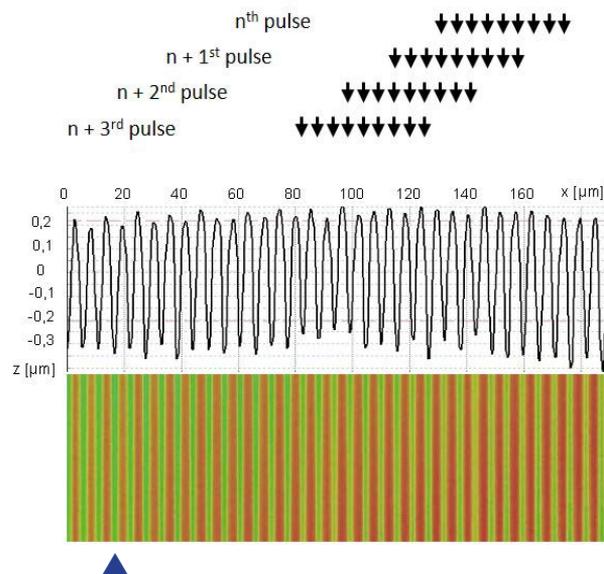
A schematic of the experimental set-up for periodic nanostructuring of surfaces is shown in (a). (b) and (c) show SEM images of nanostructured gold surfaces in air and in water environment at the same incident fluence of $500 \text{ mJ}/\text{cm}^2$, respectively. The insets on top of the figures display the intensity distribution across the target surface.

Kurze Pulse / Nanostrukturen

Short Pulses / Nanostructures

Glas-Nanostrukturierung

Die Laserstrukturierung von Glas mit μm - oder Sub- μm -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 fernen 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 dotierten und undotierten Gläsern wurden hiermit bereits erfolgreich hergestellt. Anwendungen finden sich in der Funktionalisierung und in der diffraktiven Markierung von Glasoberflächen.



Konfokalmikroskopische Aufnahme eines Oberflächenreliefs auf einer Glasoberfläche. Die Gruppen von Pfeilen zeigen die mit dem jeweiligen Laserpuls gleichzeitig bestrahlten Linien an (schematisch).

Surface grating on glass. The groups of arrows indicate schematically the lines that are simultaneously irradiated with the laser pulse. (Confocal microscope image.)

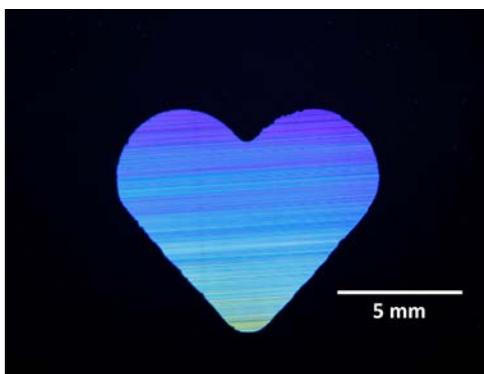
Ein neu entwickeltes Verfahren für eine periodische Oberflächenstrukturierung bietet gleichzeitig hohe Auflösung und große Prozessgeschwindigkeit und Effizienz. Eine Phasenmaske mit einem Liniengitter wird in einer Dimension mit einer Zylinderlinse abgebildet. Werden nur die +/- ersten Beugungsordnungen selektiert, die dann in der Bildebene interferieren, können Abbildungsfehler minimiert werden. Eine schnelle Multipuls-Bestrahlung großer Flächen wird erreicht, indem das Werkstück oder der Strahl mit einer konstanten Geschwindigkeit bewegt werden, so dass ein Vorschub von einem ganzzahligen Vielfachen der Strukturperiode zwischen jeweils aufeinanderfolgenden Laserpulsen erreicht wird. Dies ermöglicht eine schnelle Bearbeitung „on the fly“ ohne Zwischenstopps bei gleichzeitig einstellbarer Pulszahl ≥ 1 pro Position.

Kurze Pulse / Nanostrukturen

Short Pulses / Nanostructures

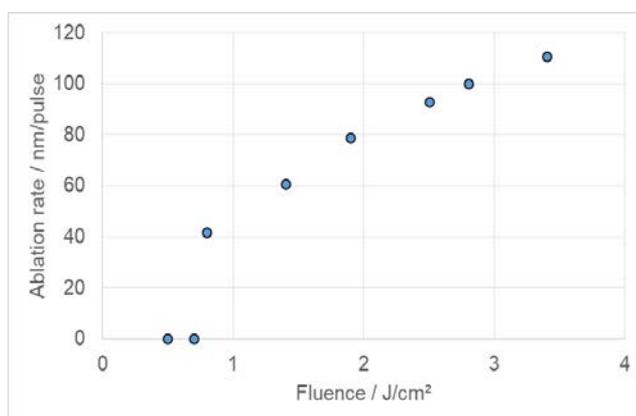
Nanopatterning of glass

Precise, high-resolution laser patterning of glass materials is still a challenging task. As glass is transparent in the visible and the near UV spectral ranges, IR or deep-UV lasers have to be applied for the ablative structuring of glass. Since the achievable resolution scales with the wavelength, IR light does not provide the spatial resolution required for μm - and sub- μm 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 in doped and pure glass have already been successfully fabricated. Such periodic patterns have a number of applications, e.g. for surface functionalization or diffractive marking.



◀ Flächige diffraktive Markierung auf einer Glasoberfläche.
Large area diffractive marking on a glass surface.

Precise structure resolution and high process speed are simultaneously obtained with the following method: a one-dimensional imaging concept using cylindrical lenses is applied for the projection of a fused silica phase mask. By selecting only the \pm first diffraction orders of the phase mask, which then interfere in the image plane on the work piece, lens aberrations can be minimized. Fast multipulse irradiation of large areas is accomplished by a scanning scheme, where either the sample or the beam pattern is moved at constant velocity, so that the travel between successive pulses corresponds to an integer multiple of the structure period. In this way, despite processing “on the fly”, a predefined number of pulses ≥ 1 per position can be applied.



▲ Abtragsrate in Abhängigkeit von der Laserfluenz für die ArF-Laserablation von Kalk-Natron-Glas.
Ablation rate vs. laser fluence for ArF laser ablation of soda lime glass.

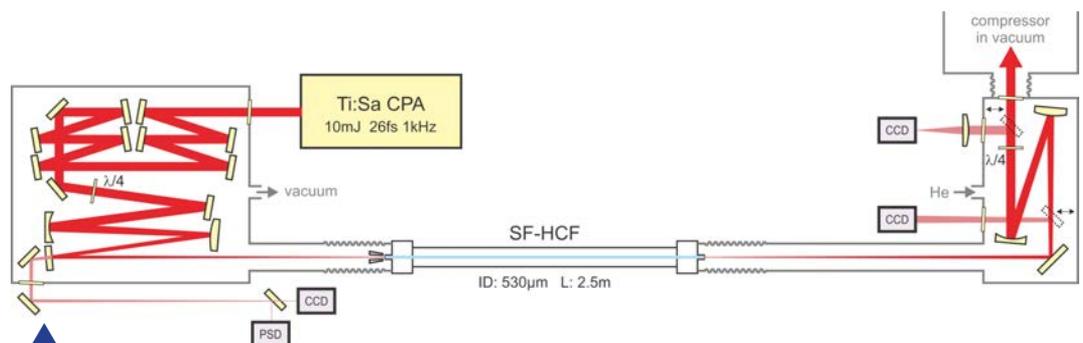
Kurze Pulse / Nanostrukturen

Short Pulses / Nanostructures



Gestreckte flexible Hohlfaservorrichtung zur Kompression von Multi-mJ-Pulsen

Im Bereich der Ultrakurzzeitphysik spielen Laser, die Pulse von wenigen Feldschwingungen $<5\text{fs}$ erzeugen können, eine wichtige Rolle. Die Bandbreite solcher Pulse ist jenseits von dem, was ein konventionelles Lasermedium verstärken kann. Daher müssen spezielle Techniken zur spektralen Verbreiterung der verstärkten Pulse implementiert werden. Für diese Aufgabe haben sich gasgefüllte Hohlfaserkompressoren als gut geeignete Werkzeuge etabliert. Jedoch konnte die Entwicklung dieser Kompressionstechnik nicht mit der schnellen Entwicklung von kHz CPA-Lasern mithalten, die Energien von bis zu 10-20 mJ liefern können. Die spektrale Verbreiterung von Pulsen jenseits von 1 mJ stellt dabei nach wie vor eine große Herausforderung dar. Einige Entwicklungen ermöglichen durch Erweiterung der herkömmlichen Hohlfaserkompressionstechnik ihren Einsatz für Pulse bis in den Multi-mJ-Energiebereich. Eine davon verwendet zirkular polarisiertes Licht innerhalb des Lichtleiters, was die Ionisationsschwelle anhebt und somit höhere Intensitäten zulässt. Ein weiterer Ansatz nutzt einen Druckgradienten innerhalb der Hohlfaser: Die Frontseite ist dabei evakuiert und Edelgas wird am Ende der Faser eingebracht. Wir haben eine neuartige Hohlfaservorrichtung entwickelt, in der eine gestreckte Hohlfaser (SF-HCF) zum Einsatz kommt, die auch bei nahezu beliebigen Faserlängen ideale Wellenleitungseigenschaften aufweist.



Zur spektralen Verbreiterung von zirkular polarisierten 10-mJ-Pulsen mit 26 fs Dauer bei 1 kHz kommt eine 2,5 m lange gestreckte Hohlfaser zum Einsatz. Die Kapillare wird an einem Ende mit He befüllt und am anderen Ende differentiell gepumpt. Am Eingang der Faser ist eine Strahlstabilisierung installiert, am Ausgang wird der Strahl kollimiert und in einen im Vakuum befindlichen Pulskompressor weitergeleitet.

A 2.5 m long stretched hollow fiber is used for spectral broadening of circularly polarized 10 mJ pulses of 26 fs duration at 1 kHz. The capillary is differentially pumped at one end and filled with He at the other. At the input of the fiber, a beam-pointing stabilization is implemented and the collimated output is directed to a vacuum pulse compressor.

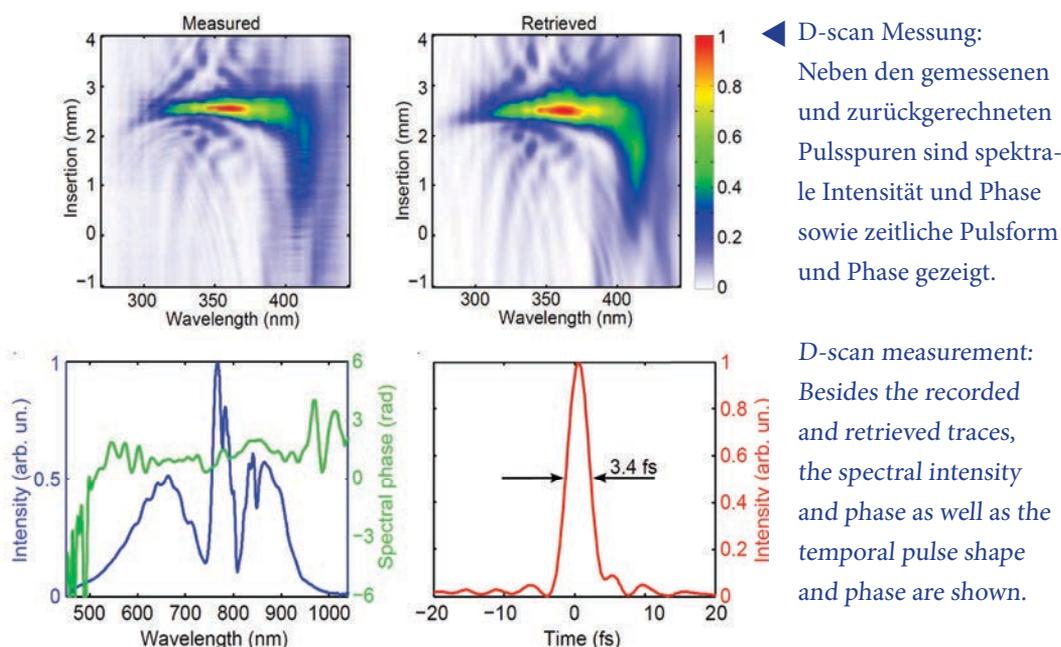
In einer aktuellen Zusammenarbeit mit dem Laboratoire D'optique Appliquee, ENSTA, Université Paris-Saclay, wurde eine Kombination von allen oben genannten Methoden umgesetzt. Dabei wurden die Möglichkeiten für eine maximale spektrale Verbreiterung ausgelotet. Die so erreichte spektrale Bandbreite ermöglichte eine Kompression der Pulse bis zu einer Länge von 3,4 fs, gemessen mit der sogenannten D-Scan-Methode. Somit konnte eine Spitzenleistung von 1 TW bei einer Repetitionsrate von 1 kHz erreicht werden, was ein Rekordwert für Sub-4-fs-Pulse darstellt.

Kurze Pulse / Nanostrukturen

Short Pulses / Nanostructures

Stretched flexible hollow fiber assembly for the compression of multi-mJ pulses

In contemporary ultrafast science, lasers delivering few-cycle pulses (<5 fs) play a prominent role. Such pulses have very broad spectra, well beyond the gain bandwidth of conventional amplifying media. Therefore, to reach the few-cycle regime, spectral broadening has to be applied to the amplified pulses. For this task, gas-filled hollow fiber compressors have become wide-spread and well-established tools. Unfortunately, this compression technique did not keep pace with the rapid development of kHz CPA lasers delivering energies of up to 10 to 20 mJ. Spectral broadening beyond the 1 mJ limit is still a great challenge. Some developments extended the use of the standard hollow fiber compression technique to the multi-mJ energy range. One of them applies circularly polarized light in the waveguide which increases the ionization threshold and thus allows higher intensities. Another approach uses a pressure gradient along the waveguide: the front side is evacuated and noble gas is applied to the end of the capillary. We proposed a novel hollow fiber assembly incorporating a stretched flexible hollow core fiber (SF-HCF), which enables the realisation of virtually ideal waveguide properties at arbitrary fiber length.



In a recent implementation in collaboration with the Laboratoire d'Optique Appliquée, ENSTA, Université Paris-Saclay, a combination of all these methods was realised. In this work, we explored the capability of our hollow fiber design for ultimate spectral broadening of multi-mJ pulses. The achieved spectral broadening allows a compression of the pulses down to 3.4 fs, as measured by the so-called D-scan method. Thus a peak power of as high as 1 TW at a repetition rate of 1 kHz was obtained, representing a record value for sub-4-fs Pulses.

Kurze Pulse / Nanostrukturen

Short Pulses / Nanostructures

Überlagerung von Hologrammen bei der diffraktiven Laserdirektbeschriftung

Diffraktive Beschriftungen und holographische Sicherheitsmerkmale werden zur fälschungssicheren Kennzeichnung von Originalteilen verwendet und eignen sich als besonderes Designmerkmal auf Produkten und Verpackungen. In Form von metallisierten Folien, die auf Oberflächen aufgeklebt werden, sind solche Hologramme fest etabliert. Am LLG wurde in den vergangenen Jahren ein laserbasiertes Direktschreibverfahren entwickelt, mit dem es möglich ist, diffraktive Strukturen in Form periodischer Gitterlinien von 1 bis 1,5 μm Periode direkt auf zahlreiche Materialien zu schreiben, unter anderem auch auf Metalle. Hierdurch lassen sich wertvolle Bauteile ohne die Einbringung von Fremdmaterialien individuell diffraktiv kennzeichnen. Auch die Beschriftung von Spritzgusswerkzeugen und die Abformung der diffraktiven Strukturen auf die Kunststoffoberfläche konnten in der Vergangenheit demonstriert werden.

Um die Anwendung dieser Beschriftungstechnologie zu erweitern, wurde ein Verfahren entwickelt, welches es ermöglicht, zwei oder mehr Logos übereinanderzuschreiben. Hierbei wurde ausgenutzt, dass die Beugung der diffraktiven Strukturen von der Ausrichtung der Gitterlinien abhängig ist.

Um z.B. zwei Bilder übereinanderzulegen, wurden den verschiedenen Bildern unterschiedliche Winkelausrichtungen der Linienstruktur zugeordnet. Die Bilder leuchten dann unter unterschiedlichen Betrachtungswinkeln diffraktiv auf. Allerdings entstehen in Bereichen, wo die Bilder überlappen, gekreuzte Linien. Diese haben ein deutlich anderes Beugungsverhalten als die linearen Strukturen der restlichen Bereiche, wodurch der Überlappsbereich der Bilder störend auffallen kann.



Um ein störungsfreies Übereinanderlegen von Hologrammen zu ermöglichen, wurden daher die Einzelbilder in feine, alternierende Streifen aufgeteilt. Die Breite der Streifen beträgt 40 bis 60 μm , so dass sie bei visueller Betrachtung des Werkstücks nicht auffallen. Innerhalb der alternierenden Streifen liegt dann nur die Linienausrichtung zu jeweils einem Bild vor.

Aufgrund der Reduzierung des Füllfaktors durch die Zerlegung der Bilder in Streifen nimmt der Kontrast gegenüber den unbeschriebenen Bereiche etwas ab. Bei zwei Bildern reduziert sich der Füllfaktor um 50 %. Möchte man mehr als drei Hologramme übereinanderlegen, so muss statt der Aufteilung der Bilder in Streifen ein komplexeres Schachfeldmuster gewählt werden, da die Streifenabstände ansonsten bei der Betrachtung sichtbar wären.

Der Vorteil der Methode ist, dass nun zwei oder mehr Hologramme störungsfrei übereinandergeschrieben werden können, was neben einer Erweiterung der Designmöglichkeiten auch zu komplexeren Sicherheitsmerkmalen führt.



Kurze Pulse / Nanostrukturen

Short Pulses / Nanostructures

Superposition of holograms for diffractive direct laser writing

Diffractive markings and holographic security features are used for anti-counterfeit labelling of original parts and are suitable as a special design feature on products and packaging. Such holograms are well established in form of metallised films, which are glued onto surfaces. In previous years, a procedure for direct laser writing has been established at the LLG that enables the writing of diffractive structures in the form of periodic gratings with a period of 1 to 1.5 μm directly onto many materials (e.g. metals). Through this, valuable components can be individually marked with diffractive structures without the use of extraneous materials. The inscription of such structures in injection-moulding tools and their transfer into plastic surfaces has also been demonstrated.

In order to expand the application of this technology, a technique was developed that allows the writing of two or more overlapping logos. This was realized by utilizing that the diffraction of the markings depends on the orientation of the line gratings.

When writing two overlapping images, different angular orientations of the grating structure are assigned to the different images. The images then light up diffractively under different viewing angles. However, in areas where the images overlap, crossed lines are formed. These have a different diffractive behaviour than the linear structures, causing the overlapping areas of the images to strongly stand out, which can disturb the overall appearance of the holograms.

Zwei Logos, das LLG Logo mit Schrift und das Logo des Göttinger Gänseliesel, wurden übereinandergeschrieben. Die Ausleuchtung wurde für das Foto so gewählt, dass LLG Logo und Schrift aufleuchten. Links: Ohne Segmentierung der Logos ist in der Überlappung die Erscheinung des LLG-Logos durch das Gänseliesel gestört. Rechts: Die Logos wurden in alternierende Streifen segmentiert, so dass das LLG-Logo auch in der Überlappung mit dem Gänseliesel gleichmäßig aufleuchtet.

Two logos, the LLG Logo with writing and the logo of Göttingen's "Gänseliesel", the written on top of each other. The lighting for the photo was set to light up the LLG Logo and the writing. Left: Without segmentation of the logos, the LLG logo's appearance is disturbed by the Gänseliesel Logo in the overlapping areas. Right: The logos were segmented into alternating stripes such that the LLG-logo lights up evenly, including in the areas overlapping with the Gänseliesel.

In order to facilitate an undisturbed superposition of holograms, the individual images were segmented into fine alternating stripes of 40 to 60 μm , so they are not visually perceived. Within the alternating stripes, there is only one orientation of the grating present corresponding to one of the images.

The reduction of the filling factor due to the fragmentation of the images into stripes reduces the contrast slightly. For two images, the filling factor is reduced by 50 %. If more than three holograms are superposed, the fragmentation has to be accomplished with a chequered pattern instead of stripes, since the stripes' spacing would otherwise become visible.

The advantage of this method is that now two or more holograms can be superposed undisturbed, which leads not only to an expansion of the design possibilities but also enables more complex security features.



Kurze Pulse / Nanostrukturen

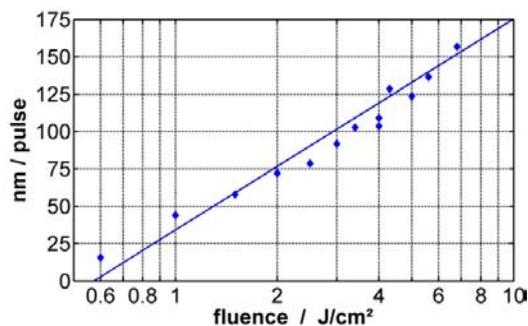
Short Pulses / Nanostructures



Laserbasierte Herstellung von Mikrooptik

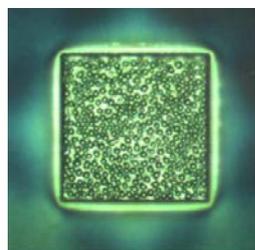
Die Herstellung von Mikrooptiken für hochintegrierte Mikrosysteme kann in vielen Fällen durch die direkte Bearbeitung und Strukturierung mittels Laserablation erfolgen. Zur Bearbeitung von Glaswerkstoffen sind in der Regel Wellenlängen im kurzwelligigen UV-Bereich (z.B. 193 nm oder 157 nm) erforderlich.

Ein Beispiel für die laserbasierte Herstellung mikrooptischer Komponenten ist die Fertigung von Fresnel-Linsen. Durch ihr flaches Design ermöglichen sie eine geringe Bauhöhe im Bereich weniger Mikrometer sowie die einfache Integration in plane Oberflächen. Eine besondere Herausforderung stellt die Herstellung hybrider mikrooptischer Abbildungssysteme dar, in denen Gradientenindex-(GRIN-) Elemente mit diffraktiven Fresnel-Linsen kombiniert werden. Die Fresnel-Linsen werden dabei durch F_2 -Laserbearbeitung direkt auf der Endfläche der GRIN-Linsen hergestellt. Die laserstrukturierten Linsen sind somit monolithisch mit den GRIN-Elementen verbunden, wodurch Aufbau und Justage deutlich vereinfacht und die Haltbarkeit verbessert wird. Die hybriden optischen Elemente können z.B. in Abstandssensoren oder in farbkorrigierten Mikroobjektiven mit hoher numerischer Apertur für die Endoskopie eingesetzt werden.

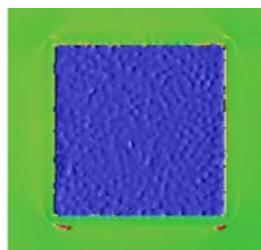


Abtragsrate in Abhängigkeit von der Fluenz für Ag-dotiertes Glas bei der Laserwellenlänge 157 nm.
Ablation rate vs fluence for Ag-doped glass at laser wavelength of 157 nm.

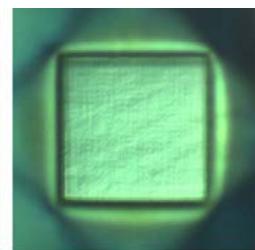
Die Bearbeitung erfolgt im Maskenprojektionsverfahren. Während die Maske fest steht, wird die GRIN-Linse bei der Bearbeitung um ihre Achse gedreht, um die spezifischen konzentrischen Strukturen zu erreichen. Die Maske enthält die für das spezielle Linsendesign angepassten Aperturen für jede Zone der Fresnel-Linse und wird aus einer 30 μm dicken Stahlfolie mit einem UV-ps-Laser (355 nm) ausgeschnitten. Die verwendeten Gradientenindexgläser sind deutlich schwieriger zu bearbeiten als homogene, undotierte Gläser. Die Abtragsrate steigt zwar stetig mit zunehmender Laserfluenz an, bei geringen bis moderaten Fluenzen erhält man jedoch eine sehr raue, körnige Oberfläche. Erst bei relativ hohen Fluenzen von etwa 5 J/cm^2 sind die Oberflächen glatt und für optische Anwendungen nutzbar.



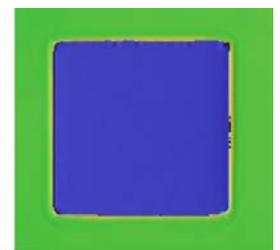
(a)



(b)



(c)



(d)

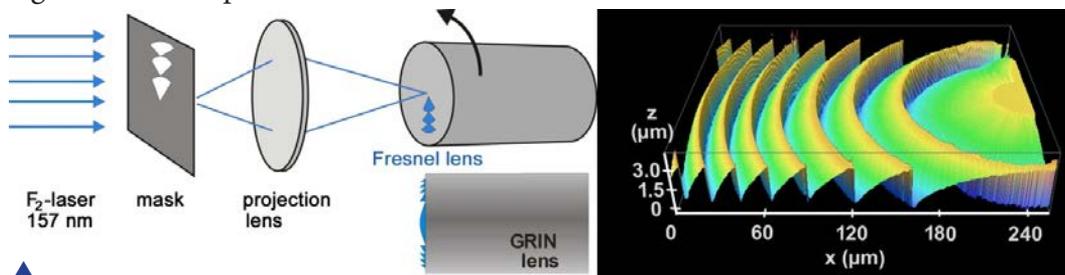
Kurze Pulse / Nanostrukturen

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).

One example for the laser-based fabrication of micro-optical elements is the fabrication of Fresnel lenses. Hybrid micro-optical imaging systems can be generated by combining gradient index (GRIN) elements with diffractive Fresnel lenses. In this case, the Fresnel lenses are manufactured directly on the end face of the cylindrical GRIN lenses by F_2 laser processing. A major benefit of the laser-structured lenses is the monolithic bonding to the GRIN elements, leading to significantly simplified adjustment and packaging, and improved durability. The hybrid optical elements can serve as a basis for optical sensors or colour-corrected microscope objectives with high numerical aperture.



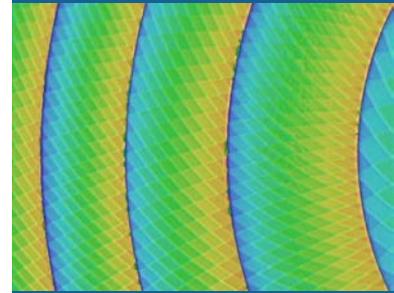
Schematische Darstellung der Maskenprojektions-Anordnung (links). 3D-Oberflächenprofil der inneren Zonen einer 23-Zonen-Fresnel-Linse auf der Endfläche eines GRIN-Elements (rechts, aufgenommen mittels Konfokalmikroskopie).

Schematic illustration of the mask projection scheme (left). 3D-surface profile of the inner zones of a 23-zone Fresnel lens fabricated on the end face of a GRIN element as recorded by confocal microscopy (right).

The Fresnel lenses are fabricated using mask projection. While the mask is kept stationary, the GRIN lens is rotated along the cylinder axis during laser operation to achieve the specified concentric structures. The mask is a free-standing structure fabricated in stainless steel equipped with appropriately designed apertures for each zone of the Fresnel lens. It is cut in a 30 μm thick high-alloy steel sheet by a ps-UV Laser operating at 355 nm using a focus scanning technique. The main difficulty in processing ion-doped glass is to avoid a roughening of the surface. Whereas moderate fluences and high pulse numbers lead to a rough and grainy surface, a smooth surface is obtained at high fluence (5 J/cm^2).

▶ Oberflächenqualität von 50 x 50 μm^2 großen Ablationsspots in Li-dotiertem GRIN-Glas nach Bestrahlung mit 20 Laserpulsen. Bei einer Fluenz von 2 J/cm^2 (a, b) weist das Ablationsprofil eine Tiefe von 1,5 μm auf. Bei 5 J/cm^2 (c, d) beträgt die Tiefe 2,8 μm . (a, c): Weitfeldmikroskopische Aufnahmen mit DIC-Kontrast; (b, d): Oberflächentopographie in Falschfarbendarstellung, aufgenommen mittels Konfokalmikroskopie.

Surface quality of 50 x 50 μm^2 ablation spots in Li-doped GRIN glass after irradiation with 20 laser pulses. At a fluence of 2 J/cm^2 (a, b), the ablation profile exhibits a depth of 1.5 μm . At 5 J/cm^2 (c, d), the profile shows a depth of 2.8 μm . (a, c): wide field microscopy images recorded with DIC contrast; (b, d): surface topography in false colour representation as recorded by confocal microscopy.

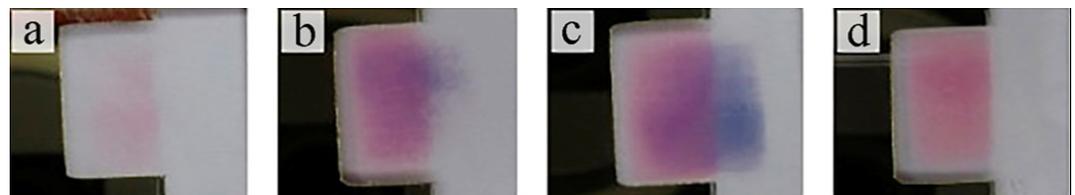
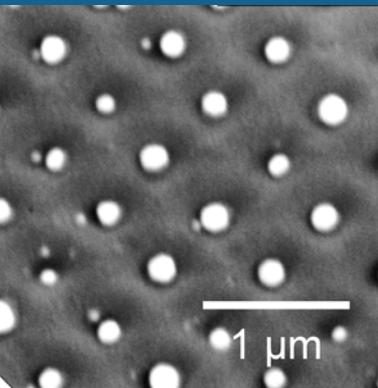


Kurze Pulse / Nanostrukturen

Short Pulses / Nanostructures

Erzeugung plasmonischer Nanopartikel in Glas

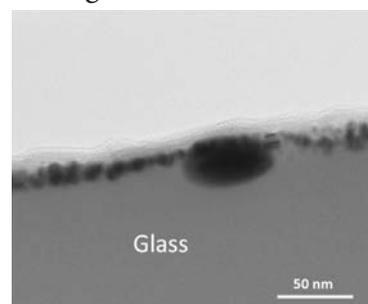
Erzeugung und kontrollierte Anordnung metallischer Nanopartikel sind Grundvoraussetzungen für die Herstellung plasmonischer Komponenten. Silber- und Gold-Nanopartikel in einer Glasmatrix sind besonders interessant, da ihre Plasmonenresonanz (SPR) im sichtbaren Spektralbereich liegt und zahlreiche Anwendungen 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. Mittels Laserbestrahlung kann auch eine lokal definierte Ag-Partikelbildung erfolgen (s. Jahresbericht 2016).



▲ Probenoberfläche nach Goldbeschichtung und anschließender Bestrahlung mit 10 Laserpulsen (193 nm) auf der Zinnbadseite (a-c) und auf der Luftseite (d) des Floatglases mit Fluenzen von 120 mJ/cm^2 (a), 130 mJ/cm^2 (b) und 140 mJ/cm^2 (c, d). Auf der rechten Seite der Laserspots wurden nicht implantierte Partikel mit einem trockenen Tuch abgewischt.

Pictures of samples after gold coating and subsequent laser irradiation by 10 laser pulses at the tin bath side (a-c) and at the air side (d) of the float glass with fluences of 120 mJ/cm^2 (a), 130 mJ/cm^2 (b) and 140 mJ/cm^2 (c, d). On the right half of the laser spots, non-implanted gold particles have been removed by wiping with a dry cloth.

Für das oberflächennahe Einbringen von Gold in Glas wird eine andere Methode angewendet: Das Glas wird zunächst mit einem dünnen Goldfilm beschichtet und dann mit dem ArF-Excimerlaser (193 nm) bei Fluenzen unterhalb der Ablationsschwelle im Multipulsbetrieb bestrahlt. Es bilden sich Goldpartikel, wie aus der rot-violetten Färbung der bestrahlten Bereiche und den Plasmonenresonanzpeaks der Absorptionsspektren hervorgeht. Nach Abwischen der locker anhaftenden Partikel bleibt nur der Effekt der implantierten Partikel übrig. Das Implantationsergebnis hängt deutlich von der Laserfluenz ab. Außerdem zeigt sich, dass bei den hier gewählten Fluenzen eine effiziente Implantation nur auf der stärker absorbierenden zinnhaltigen "Badseite" des Floatglases möglich ist. Diese Arbeiten wurden in Kooperation mit dem Institut für Physik der Universität Halle-Wittenberg durchgeführt.



◀ TEM-Bild nach Bestrahlung einer goldbeschichteten Zinnbadseite (193 nm, 140 mJ/cm^2 , 10 Laserpulse).
TEM image of the irradiated gold-coated tin bath side (193 nm, 140 mJ/cm^2 , 10 laser pulses).

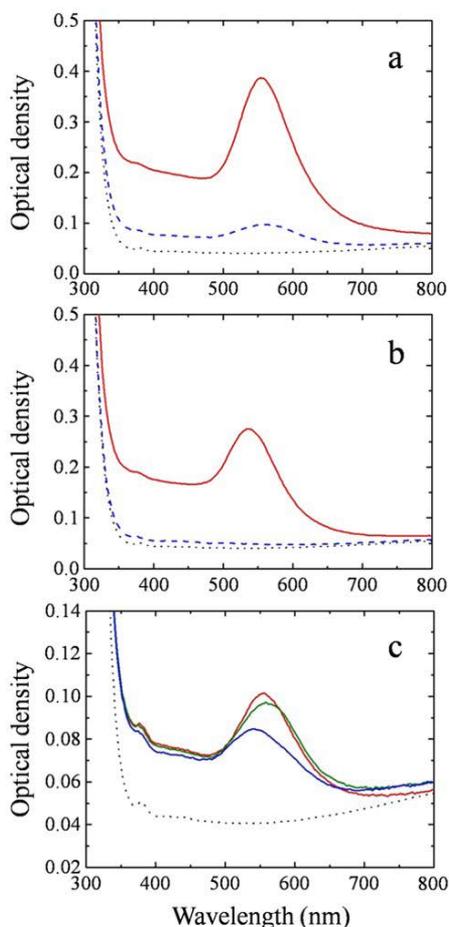
Kurze Pulse / Nanostrukturen

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 a $\text{Ag}^+ \leftrightarrow \text{Na}^+$ ion exchange process and subsequent thermal treatment. However, this method does not allow creating nanoscaled arrays of particles localized in a certain way. For spatially selective particle formation, laser irradiation can be utilized (cf. annual report 2016). For the near-surface implantation of gold into glass, a different method is applied: the glass surface is coated with a thin gold film and subsequently irradiated with an ArF excimer laser at a fluence below the threshold of ablation. Gold nanoparticles are formed, as can be seen from the coloured appearance of the irradiated areas and the plasmon resonance peak in the absorption spectra. After wiping off the loosely sticking particles, the remaining effect is only due to the implanted particles. The implantation result depends strongly on the laser fluence. Furthermore, at the fluences utilized so far, efficient implantation is only possible at the stronger absorbing "bath side" of the float glass containing tin.

This work has been performed in collaboration with the Institute of Physics of the University Halle-Wittenberg.



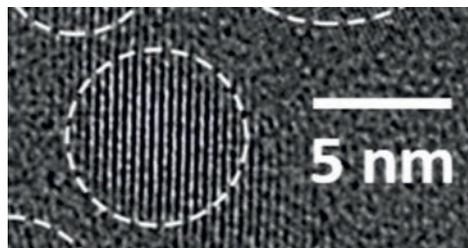
◀ (a und b): Änderung der optischen Extinktionspektren infolge der Bestrahlung der goldbeschichteten Zinnbadseite (a) und der Luftseite (b) mit 10 Laserpulsen (140 mJ/cm^2) vor (rote durchgezogene Linie) und nach Reinigung (blau gestrichelte Linie). (c): Optische Extinktionspektren nach Bestrahlung der goldbeschichteten Zinnbadseite mit 5 (blau), 10 (grün) und 50 (rot) Laserpulsen (140 mJ/cm^2) und anschließender Reinigung. Die schwarz gepunkteten Linien in (a), (b) und (c) entsprechen dem Grundglas. (a and b): Changes in optical extinction spectra as a result of irradiating the gold-coated tin bath side (a) and the air side (b) by 10 laser pulses (140 mJ/cm^2) before cleaning (red solid line) and after cleaning (blue dashed line). (c): Optical extinction spectra as a result of irradiating the gold-coated tin bath side by 5 (blue line), 10 (green line) and 50 (red line) laser pulses (140 mJ/cm^2) and subsequent cleaning of the laser irradiated areas. Black dotted line in (a), (b) and (c) corresponds to basic glass.

Kurze Pulse / Nanostrukturen

Short Pulses / Nanostructures

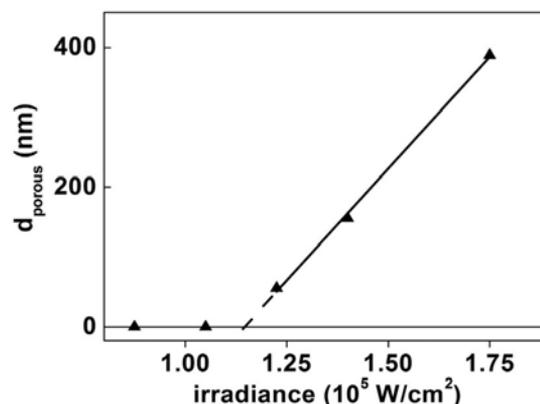
Si-Nanokristalle

Si-Nanokristalle (Si-NC) sind als potenzielle Lichtemitter in der siliziumbasierten Photonik von Interesse. Sie werden bisher hauptsächlich durch eine Hochtemperaturbehandlung von substöchiometrischem SiO_x (silicon-rich oxide) hergestellt, bei der eine Phasenseparation in Si und 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, die die beim Ofentempern erforderlichen Temperaturen nicht vertragen (z.B. Borosilikatgläser).



◀ Hochaufgelöste TEM-Aufnahme eines im Laserprozess erzeugten Si-Nanokristalls.
High-resolution transmission electron microscope image of a laser-generated Si nanocrystal.

In unserem Ansatz, den wir in Kooperation mit dem IV. Physikalischen Institut der Universität Göttingen verfolgen, wird ein kontinuierlich emittierender Laser mit 405 nm Wellenlänge für die Phasenseparation von SiO_x verwendet. Dabei konnte die Bildung von Si-Nanokristallen ohne die bei bisherigen Laserversuchen beobachtete Oberflächenschädigung erreicht werden. Derartige zerstörungsfreie Prozessbedingungen sind für die Herstellung von Bauteilen für photonische Anwendungen wie z.B. Lichtwellenleiter erforderlich. Bei höheren Intensitäten bildet sich im Zentrum der Bestrahlung poröses SiO_2 -Material, die Oberfläche bleibt weiterhin intakt. Die Untersuchung von Struktur und Komposition der unterschiedlichen Bereiche lässt Rückschlüsse auf das laserinduzierte Materialverhalten zu. So erscheint ein vorrangiger Abtrag von Si-reichem Material, der zu der beobachteten porösen Struktur führt, derzeit wahrscheinlicher als ein in der Literatur diskutierter lateraler Si-Verlust durch Thermodiffusion.



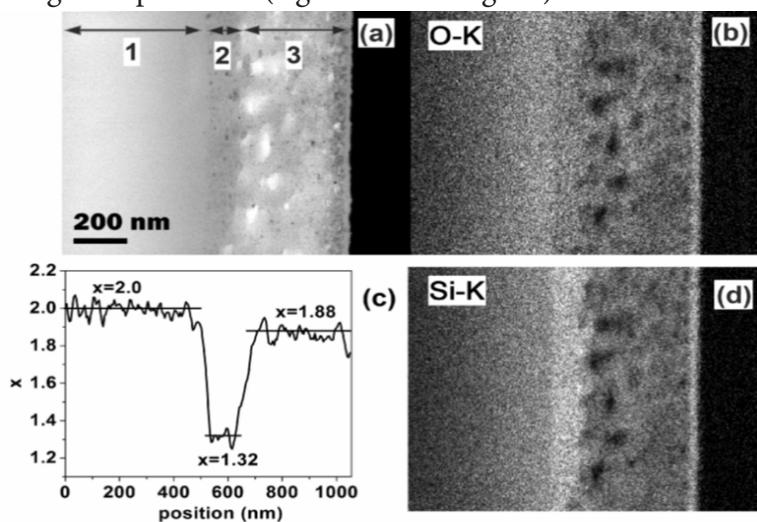
◀ Dicke des porösen Bereichs d_{porous} in Abhängigkeit von der Laserintensität.
Depth d_{porous} of the porous region in dependence on the laser irradiance.

Kurze Pulse / Nanostrukturen

Short Pulses / Nanostructures

Si nanocrystals

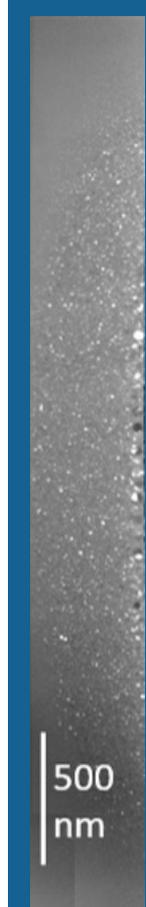
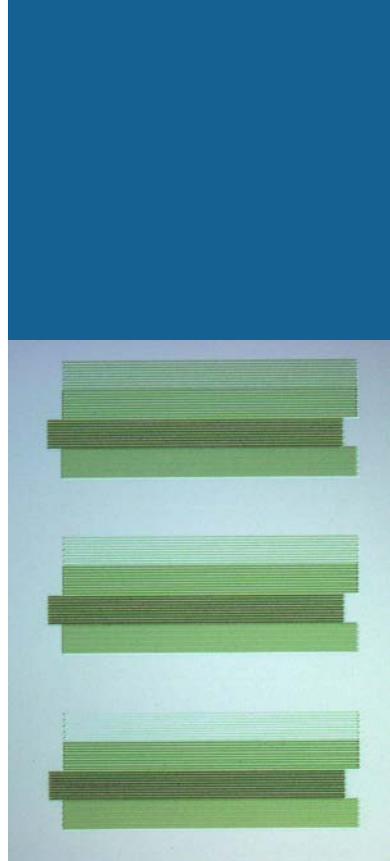
Si nanocrystals (Si-NC) are of interest as integrated light emitters in silicon-based photonics. They are mainly fabricated by high-temperature annealing of substoichiometric SiO_x (silicon-rich oxide), leading to a phase separation into Si and SiO_2 . The strong visible to infrared photoluminescence 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 with a locally controlled distribution. Furthermore, the thermal load of the substrate can be reduced, thereby allowing materials and components that do not tolerate high temperatures (e.g. borosilicate glass).



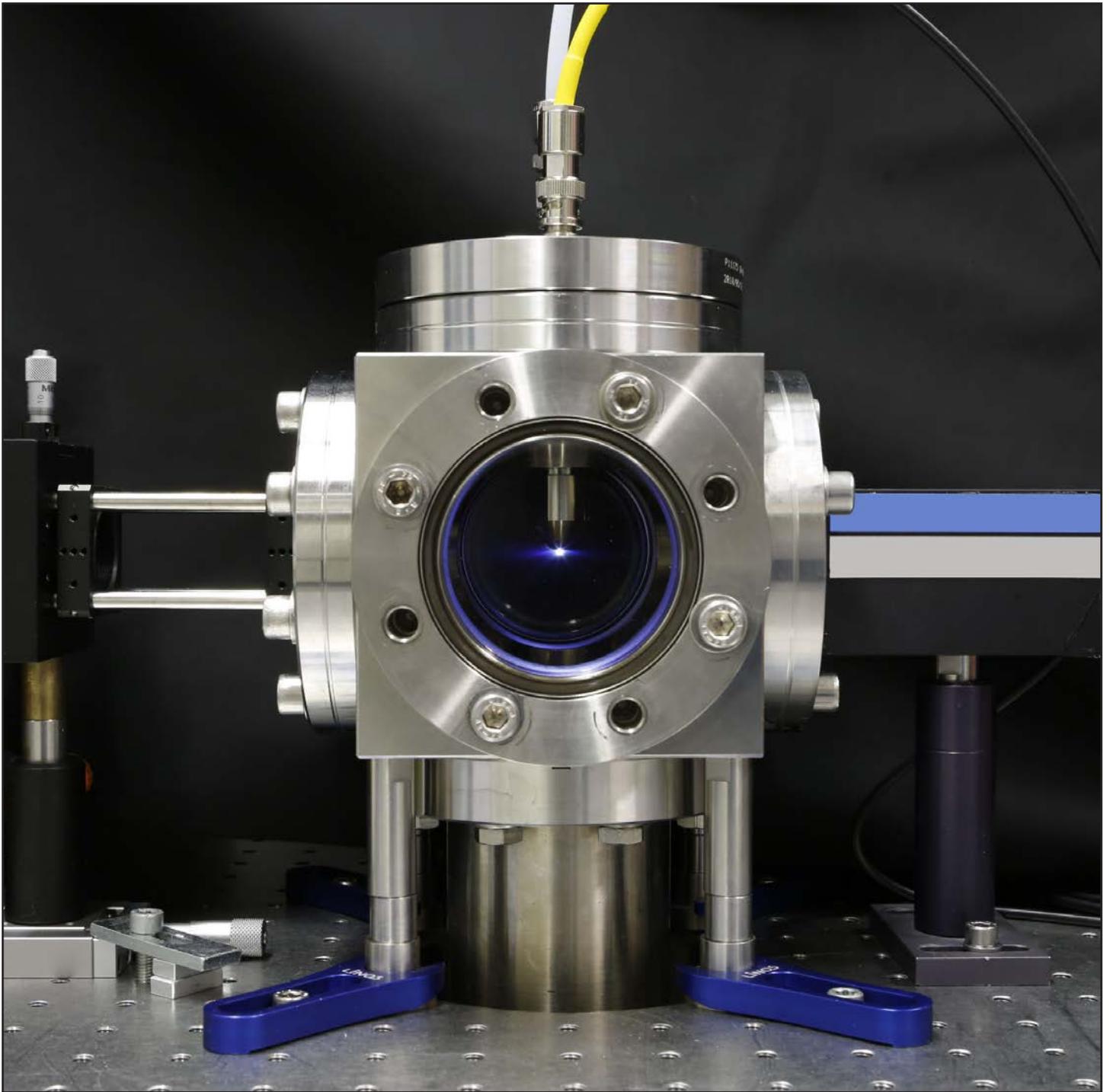
▲ Analyse der Zusammensetzung eines mit $1,75 \cdot 10^5 \text{ W/cm}^2$ bestrahlten Bereichs. (a): Hellfeld-STEM-Bild mit (1) SiO_2 -Substrat, (2) der nicht porösen Si-NC-Region und (3) der porösen Oberflächenschicht. EDX-Mapping von Sauerstoff (b) und Silizium (d). (c): Sauerstoff/Silizium-Verhältnis x .

Compositional analysis in a region irradiated at $1.75 \cdot 10^5 \text{ W/cm}^2$. (a): STEM bright field image showing (1) the SiO_2 substrate, (2) the undamaged Si-NC region, and (3) the porous surface layer. EDX maps of oxygen (b) and silicon (d). (c): oxygen-to-silicon ratio x .

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 SiO_x films. In this way, the formation of Si-nanocrystals could be accomplished without any deterioration of the surface, which has been observed in most of the previously performed laser annealing experiments. Such conditions are necessary for fabricating devices like waveguides for photonic applications. At higher laser power, porous SiO_2 is formed in the center of the irradiated region, while the surface remains optically smooth. The investigation of structure and composition of the different regions allows some conclusions about the laser-induced material behaviour. A predominant evaporation of Si-rich material leading to porous structure seems to be more probable than the lateral loss of Si by thermodiffusion as discussed in the literature.



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. The main focus is put on the deep UV wavelengths relevant for semiconductor microlithography. Other common laser wavelengths are also available.

Various measuring devices for assessment of the efficiency and stability of heavily loaded optical components are operated. This allows, among others, at-wavelength determination of laser-induced damage thresholds, thermal lensing as well as monitoring of absorption and degradation behaviour. 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

+49 551/5035-41
+49 551/5035-99
kmann@llg-ev.de

Mitarbeiter Staff members

Jens-Oliver Dette
Stephan Figul
Jonathan Holburg
Simon Lange
Maik Lübbecke
Dr. Markus Muchow
Matthias Müller
Dr. Bernd Schäfer
Meike Schellhorn
Martin Stubenvoll

Optik / Kurze Wellenlängen

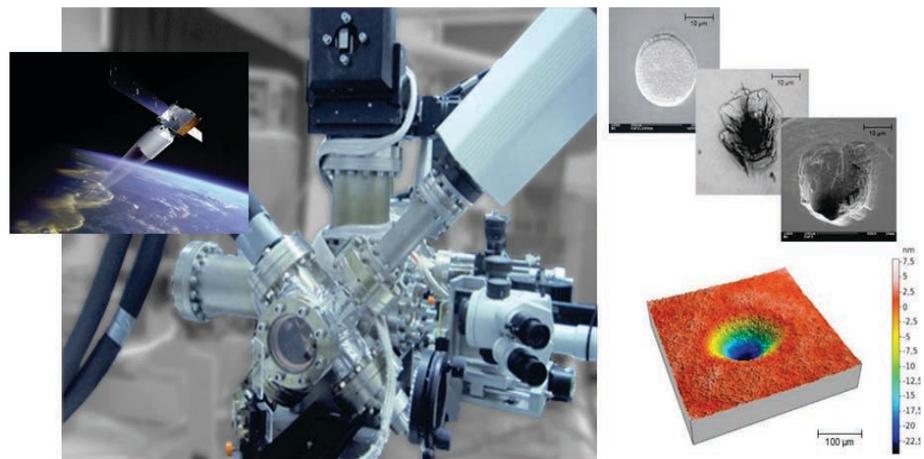
Optics / Short Wavelengths

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 auch die Degradation insbesondere UV-optischer Materialien, z.B. durch Farbzentrenbildung oder nicht-lineare Effekte, von großer Bedeutung, vor allem bei den für die Halbleiter-Lithographie relevanten Wellenlängen 248 und 193 nm.

Es werden diverse Messapparaturen zur quantitativen Erfassung der Verluste und der Stabilität laseroptischer Komponenten betrieben, wie z. B. Laser-Kalorimeter, Photothermie-Messplätze, Streulichtaufbauten und ratiometrische Transmissions-/Reflexions-Messplätze. Damit lassen sich sowohl die Gesamtverluste einer Komponente bei (Langzeit-)Bestrahlung wie auch deren Einzelbeiträge (Oberflächen-/Volumenanteile, nichtlineare Effekte) erfassen. Auf diese Weise werden grundlegende Erkenntnisse über die Ursachen der strahlungsinduzierten Alterung von UV-Optiken gewonnen.

Im Auftrag des von der Europäischen Weltraumbehörde ESA betriebenen Raumfahrttechnologiezentrum ESTEC (Noordwijk, Niederlande) wurde ein Langzeitbestrahlungs- und Zerstörschwellentest zur Zertifizierung von optischen Elementen für die ESA-Satellitenmission EarthCare durchgeführt. Testoptiken wurden dabei simultan bei den drei Nd:YAG-Laserwellenlängen 1064 nm, 532 nm und 355 nm mit bis zu 150 Millionen Pulsen bestrahlt.



▲ Links: Vakuum-Teststand für Langzeitbestrahlungen und Stabilitätstests an Weltraumoptiken der ESA-Missionen AEOLUS und EarthCare; rechts oben: morphologische Schädigungen optischer Komponenten bei der LIDT-Bestimmung; rechts unten: Kompaktierung einer Quarz-Probe durch ArF-Excimerlaser-Bestrahlung (10^8 Pulse, Weißlicht-Interferogramm).

Left: Setup for test measurements under vacuum for long-term irradiation and stability tests on space optics of the ESA mission AEOLUS and EarthCare. Top right: Morphological damage 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

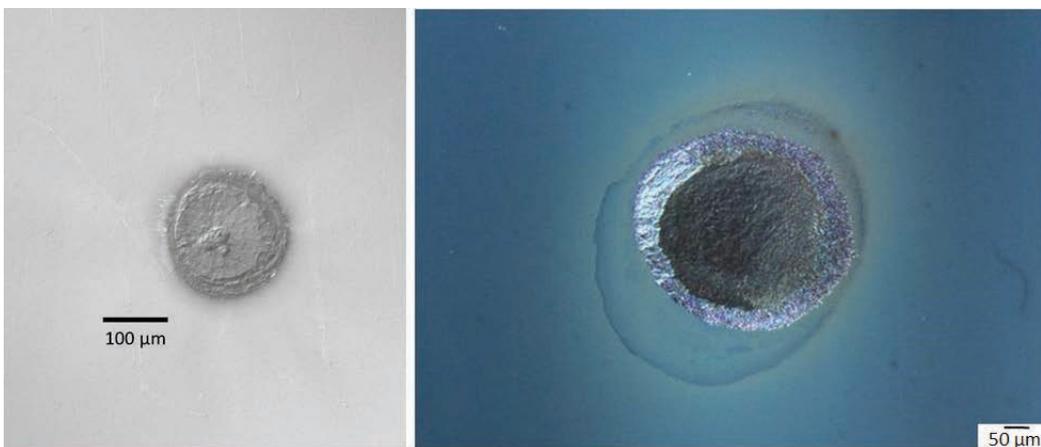
Optics / Short Wavelengths

Laser optics characterization

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

Various set-ups for quantitative evaluation of losses and stability in laser optical components are operated, such as laser calorimeters, photothermal measuring stations, light-scattering setups, and ratiometric transmission/reflectivity measurements. Both the total losses during (long-term) irradiation of a component as well as their individual contributions (surface, coating, bulk) are determined in order to gain insight into the causes of radiation-induced aging of UV optics.

On behalf of the European Space and Technology Centre ESTEC (Noordwijk, The Netherlands), being part of the European Space Agency ESA, a long-term irradiation of optics for the satellite mission EarthCare was carried out over 150 million pulses with simultaneous irradiation at the three Nd:YAG wavelengths 1064 nm, 532 nm and 355 nm.



▲ Morphologische Schädigungen optischer Komponenten bei der LIDT-Bestimmung.
Morphological damage of optical components after LIDT measurements.

Optik / Kurze Wellenlängen

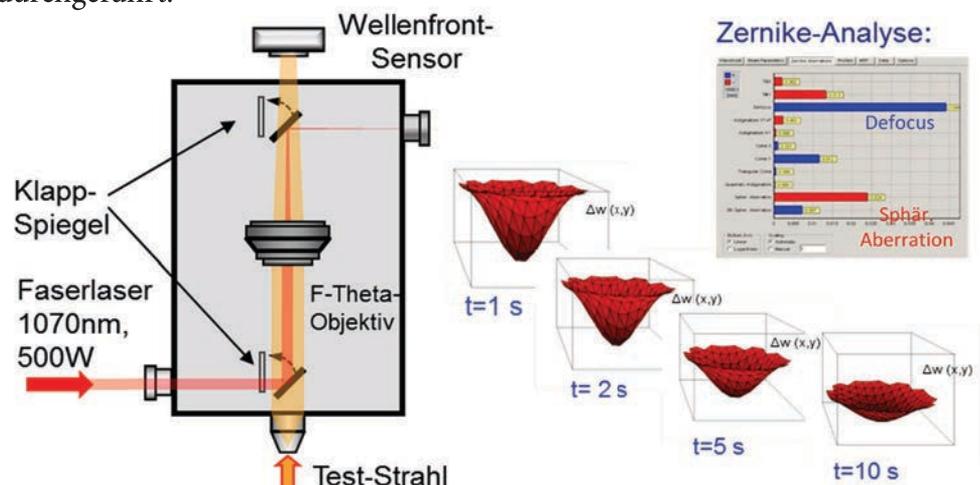
Optics / Short Wavelengths

Absorption und thermische Linsen in Hochleistungs-Laseroptiken

Angesichts stetig steigender verfügbarer Laserleistungen sind die Stabilität und die Verlustarmut optischer Strahlführungskomponenten von zunehmender Bedeutung für die Effizienz lasergestützter Prozesse. Als Schlüsselparameter ist hier die Absorption optischer Materialien anzusehen: Die im Volumen und vor allem an der Oberfläche bzw. der Beschichtung von Optiken absorbierte Laserstrahlung führt zu einer inhomogenen Temperaturverteilung, die infolge thermischer Ausdehnung sowie Brechungsindexgradienten und innerer Spannungen im Material mit dem Auftreten einer „thermischen Linse“ verbunden ist. Dieser 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 (NIR, Vis- und UV-Bereich) eingesetzt

Das Verfahren konnte bereits mehrfach in die Industrie transferiert werden, wo es zur schnellen Bewertung der Qualität von Optiken verwendet wird, z. B. für Substrate und Beschichtungen in der Halbleiter-Lithographie (Carl Zeiss, Heraeus Quarzglas, Asahi, Shin-Etsu, Newport). Eine patentierte Weiterentwicklung erlaubt in Echtzeit die quantitative, orts aufgelöste Vermessung der transmittierten Wellenfront an komplexen optischen Systemen wie etwa Bearbeitungsköpfen mit F-Theta-Optiken. In einem mit der Fa. Sill Optics durchgeführten Projekt konnte auf Basis derartiger Messdaten eine passive Kompensation des "Focus shift"-Effekts in F-Theta-Objektiven realisiert werden.

Das Messverfahren wurde zudem um die Bestimmung thermisch induzierter Aberrationen in Laser-Kristallen erweitert. So stand die passive resonatorinterne Kompensation zur Steigerung der thermischen Stabilität eines Nd:YAG-Lasers mit Hilfe eines dotierten Calciumfluorid-Kristalls im Zentrum eines ZIM-Projekts mit der Fa. InnoLas. Wegen thermisch induzierter Depolarisation und Verschiebung der Phasen Anpassungs-Bedingung sind thermische Aberrationen auch in nichtlinearen Kristallen relevant, z. B. in elektrooptischen Schaltern oder bei der Frequenzvervielfachung. Untersuchungen an KTP- und BBO-Kristallen wurden in Kooperation mit dem tschechischen HiLASE centre/Akad. d. Wissenschaft (Prag / CZ) durchgeführt.



Optik / Kurze Wellenlängen

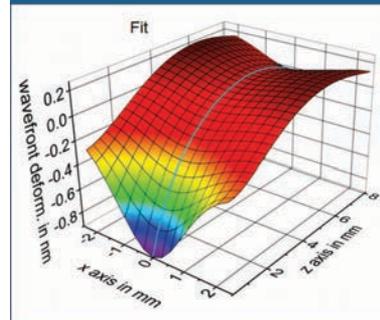
Optics / Short Wavelengths

Absorption and thermal lenses in high-power laser optics

Due to steadily increasing laser powers, the stability and low loss of optical beam line components are of increasing importance for the efficiency of laser-based processes. The key parameter is the absorption of optical materials: the absorbed laser radiation in the bulk and especially on the surface or coating of optics leads to an inhomogeneous temperature distribution that is due to thermal expansion, refractive index gradients and internal stresses in the material, associated with the occurrence of a “thermal lens”. This undesirable effect can, however, be employed for a quantitative determination of the absorption of optical materials. For this purpose, a photothermal measuring system based on wavefront measurements with a high sensitivity Hartmann-Shack sensor was developed and applied in recent years for absorption measurements at several relevant laser wavelengths (NIR, Vis and UV range).

The method has already been successfully transferred several times to industry, where it is used for rapid quality assessment of optics, such as for substrates and coatings in semiconductor lithography (Carl Zeiss, Heraeus Quarzglas, Asahi, Shin-Etsu, Newport). A patented extension allows a quantitative and locally resolved measurement of transmitted wavefronts on complex optical systems, such as F-theta optics used for laser processing heads. In a collaborative project with Sill Optics GmbH, a passive compensation of the focus shift effect in F-theta optics could be demonstrated.

In addition, the measurement method has also been extended to the determination of thermally induced aberrations in laser crystals. In a joint project with InnoLas GmbH, thermal distortions in a Nd:YAG laser were minimized, using a doped calcium fluoride crystal for passive resonator-internal compensation. Due to thermally induced depolarisation and shifting of the phase-matching condition, thermal aberrations are also relevant in nonlinear crystals, e.g. in electro-optical switches or in frequency multiplication crystals. In this context, KTP and BBO crystals were investigated in cooperation with the Czech HiLASE center/Academy of Science (Prague).



◀ 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.

Experimental set-up 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.

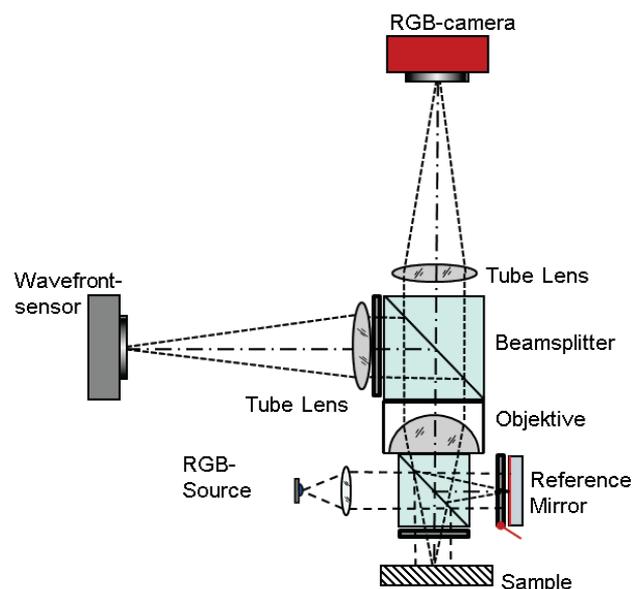
Optik / Kurze Wellenlängen

Optics / Short Wavelengths

Wellenfrontmikroskopie an optischen Oberflächen und Präzisionsbauteilen

Im Jahr 2016 startete zusammen mit den Projektpartnern Mahr GmbH, Universität Kassel und ABS GmbH das BMBF-Photonic-Plus-Verbundvorhaben "Fertigungsintegrierte High-Speed-RGB-Interferometrie und Wellenfrontsensorik" – FIHSIW. Ziel des LLG-Teilvorhabens ist dabei der Aufbau eines nach dem Hartmann-Shack-Verfahren arbeitenden Wellenfrontmikroskops zur schnellen Erfassung der Oberflächenform bzw. der lateralen Brechzahlverteilung technischer und optischer Oberflächen. Das Messsystem soll im Projektverlauf in ein RGB-Interferometer integriert werden. Da bei zusätzlicher Verwendung eines Hartmann-Shack-Sensors ein eindeutiges, wenn auch mit geringerer Orts- und Höhenauflösung aufgenommenes Topographiesignal zur Verfügung steht, werden die Nachteile der beiden Verfahren (Hartmann-Shack: relativ geringe laterale Auflösung; Interferometer: Phase nur Modulo 2π bestimmbar, daher begrenzter Eindeutigkeitsbereich und Einschränkung auf relativ kleine Messfelder) weitgehend aufgehoben.

Von entscheidender Bedeutung für die Anwendungsbreite des Wellenfrontmikroskops sowohl hinsichtlich des Einsatzes in FIHSIW als auch darüber hinaus ist die präzise Bestimmung und eindeutige laterale Zuordnung der Schwerpunkte der einzelnen Teilstrahlen. Die Problematik ergibt sich einerseits aus der Tatsache, dass technische Präzisionsbauteile häufig deutlich größere Oberflächen-Rauheiten als optische Elemente besitzen. In der Folge kommt es zu einer Verbreiterung der Spotgröße der Teilstrahlen und bei kohärenter Beleuchtung zum Auftreten von Speckles. Andererseits können ausgeprägte Bauteilkanten oder Brechzahlspünge lokal zu einer derart großen Strahlablenkung führen, dass eine eindeutige Zuordnung der Spots auf dem Detektor zu den Subaperturen des Mikrolinsenarrays auf Schwierigkeiten stößt. Beide Probleme sollen im LLG-Teilvorhaben durch die Kombination von refraktiven und diffraktiven Strukturen sowie durch Entwicklung geeigneter Entfaltungsalgorithmen angegangen werden.

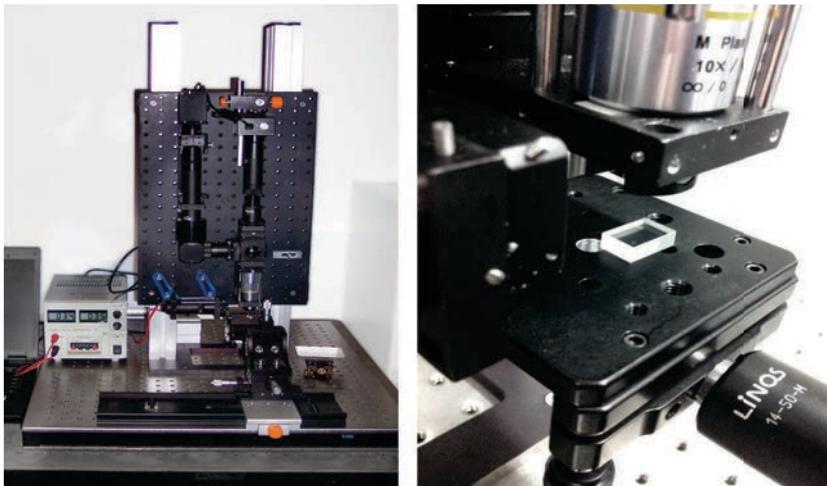


Optik / Kurze Wellenlängen

Optics / Short Wavelengths

Wavefront microscopy for characterization of optical surfaces and precision assemblies

In 2016, the LLG commenced activities within the framework of the BMBF joint project FIHSIW. The main issue is the development of a Hartmann-Shack based wavefront microscope for real-time measurement of surface shapes and lateral refractive index variations on optics and precision assemblies. In combination with an RGB interferometer, such a hybrid measurement tool overcomes the main drawbacks of both methods (interferometry: 2π ambiguity and therefore limited field of view, Hartmann-Shack technique: low spatial resolution), as the wavefront sensor yields a unique, albeit less detailed, topography signal over the complete measurement area.



▲ Foto des Wellenfrontmikroskops.
Photograph of the wavefront microscope.

For this task, the precise and unambiguous centroid determination of the single sub-rays will be of major importance. On one hand, compared to optical elements, technical precision (e.g. metal) surfaces frequently feature a considerably higher surface roughness, producing spot blurring and speckles. On the other hand, distinct inhomogeneities such as surface edges or refractive index jumps may cause large ray aberrations, thereby exceeding the dynamical range of the sensor. Both problems shall be tackled in the project by a combination of refractive and diffractive structures, as well as by the development of adapted deconvolution algorithms.

- ◀ Prinzip des RGB-Interferometers mit integriertem Wellenfrontmikroskop zur Oberflächen-Untersuchung optischer Elemente und technischer Präzisionsbauteile. Durch den Teleskop-Strahlengang in 4f-Anordnung werden sowohl die Amplitude als auch die Phase des Teststrahls auf das Mikrolinsenarray des Sensors abgebildet. Durch eine einfache Modifikation sind Messungen sowohl in Reflexion als auch in Transmission möglich.

Experimental set-up of the combined RGB interferometer and wavefront microscope. The telescopic optical layout in 4f arrangement enables simultaneous imaging of amplitude and phase of the test beam. By a simple modification, the system can be operated either in reflection or in transmission.

Optik / Kurze Wellenlängen

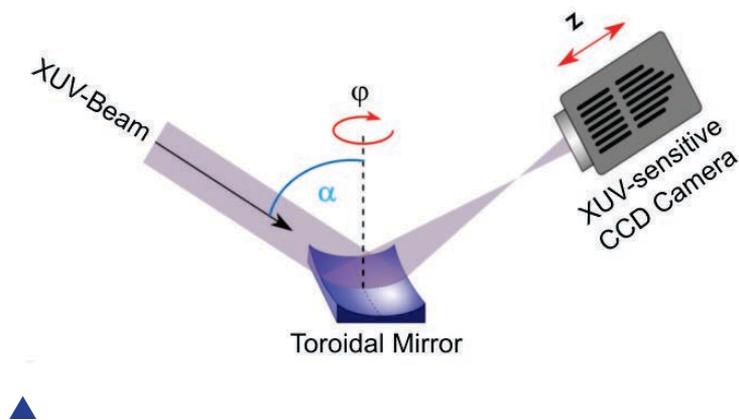
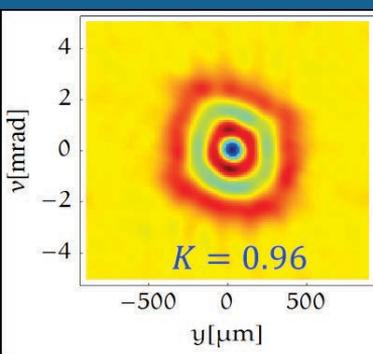
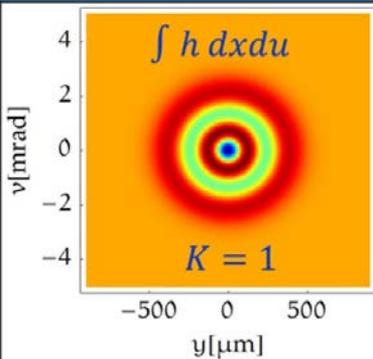
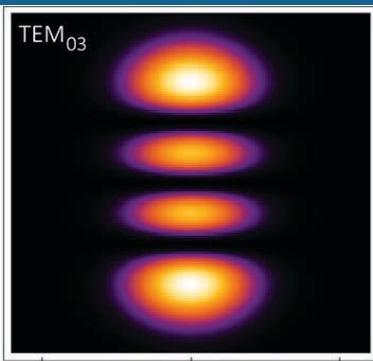
Optics / Short Wavelengths

Messung der Wigner-Verteilung zur Charakterisierung teilkohärenter Strahlung

Die Wigner-Verteilungsfunktion eines Strahls beinhaltet die vollständige Beschreibung seines Propagationsverhaltens. Interpretiert werden kann sie als vom Ort \vec{x} und vom Abstrahlwinkel \vec{u} abhängige Radianz. Als Fourier-Transformierte der Kohärenzfunktion des Strahlungsfeldes enthält sie alle Informationen über dessen räumliche Kohärenz, die sonst nur unter hohem Aufwand experimentell zugänglich sind (Young'scher Versuch).

In Fortsetzung der langjährigen Kooperation mit DESY (Hamburg) wurde in den Jahren 2014-2016 ein experimenteller Aufbau unter Einsatz eines drehbaren Toroidspiegels zur Bestimmung der 4D-Wigner-Verteilung am Freie-Elektronen-Laser FLASH konzipiert und Testmessungen im sichtbaren Spektralbereich durchgeführt, um die prinzipielle Eignung des Messverfahrens zu demonstrieren. Ein Rekonstruktionsalgorithmus erzeugt die Wigner-Verteilung durch Mapping der erhaltenen Strahlprofile in einen vierdimensionalen Phasenraum. Daraus können alle Strahlkenngrößen einschließlich Wellenfront, Kohärenzgrad und modaler Zusammensetzung bestimmt werden.

Die am LLG durchgeführten Messungen an Teststrahlen unterschiedlicher Komplexität zeigten die Eignung des Verfahrens für die vollständige Strahlcharakterisierung, so dass Teilresultate inzwischen in wissenschaftlichen Journalen veröffentlicht und auf internationalen Konferenzen vorgestellt werden konnten. Damit wurde die Grundlage für weiterführende Untersuchungen zur Kohärenzsteuerung von FELs geschaffen.



Experimentelle Anordnung zur Erfassung der 4D-Wigner-Verteilung unter Einsatz eines drehbaren Toroidspiegels. Zur Qualifizierung des Auswerteverfahrens wurden Messungen an verschiedenen Gauss-Hermite-Moden eines Testlasers bei 1064 nm vorgenommen (s. simuliertes TEM₀₃ - Profil, blauer Rand). 2D-Projektionen der theoretischen (mitte, blauer Rand) und der experimentell ermittelten Wigner-Verteilung (unten, blauer Rand) zeigen eine ausgezeichnete Übereinstimmung.

Experimental setup for detecting the 4D Wigner distribution using a rotatable toroidal mirror. To qualify the evaluation method measurements on various Gauss Hermite modes were performed at 1064 nm (see simulated TEM₀₃ profile, blue border). 2D projections of the theoretical (middle, blue border) and the experimental (bottom, blue border) determined Wigner distribution show excellent agreement.

Optik / Kurze Wellenlängen

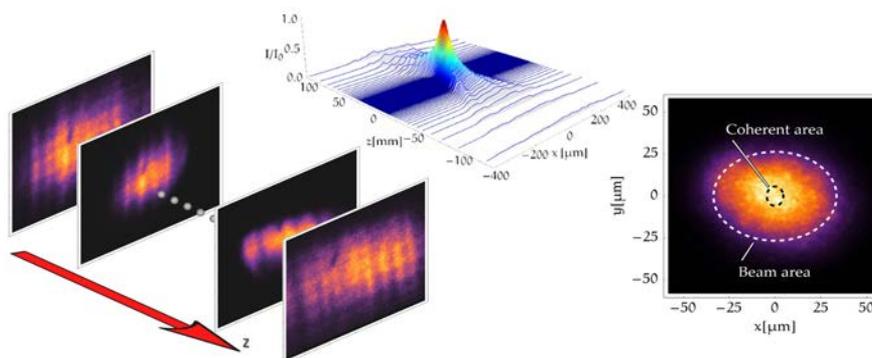
Optics / Short Wavelengths

Wigner measurement for characterization of partially coherent radiation

The Wigner distribution function (WDF) of a beam contains its entire propagation characteristics. It can be interpreted as radiance, depending on position \vec{x} and radiation angle \vec{u} . Representing the Fourier transformation of the mutual coherence function, it includes all information on the spatial coherence properties of the radiation field that are difficult to characterize in other ways (Young's experiment).

In continuation of a cooperation with DESY/Hamburg, a measurement technique for determining the 4D-Wigner distribution function of the free-electron laser FLASH, based on a rotating toroidal mirror, was developed and experimentally tested in the visible range. A reconstruction algorithm produces the entire WDF by mapping the measured beam profiles into a four-dimensional phase space. As a result, the complete set of beam characteristics, including for example wavefront, the spatial coherence and modal composition of a laser beam may be achieved.

Within the last two years, the described method has been employed to investigate optical beams of various complexity, showing the ability for complete beam characterization. Within this context, several results have been published in scientific journals and presented at international conferences. This work will be the basis for further investigations to achieve a coherence control of FEL radiation.



Links: Intensitätsprofile im Bereich der Strahltaile des Freie-Elektronen-Lasers FLASH/DESY bei der Wellenlänge 13 nm; Mitte: ein Rekonstruktionsalgorithmus erzeugt die Wigner-Verteilungsfunktion durch Mapping der erhaltenen Strahlprofile in einen 3D-Schnitt des 4D-Phasenraums. Daraus lassen sich unter Annahme einer quasihomogenen Phasenraumverteilung die räumlichen Kohärenzeigenschaften des Strahls bestimmen. Die Abb. rechts zeigt den kohärenten Bereich im Vergleich zum Gesamtstrahl, berechnet an der Tailenposition des FEL.

Left: Intensity profiles in the vicinity of the beam waist of the free-electron laser FLASH/DESY at 13nm wavelength. Middle: A reconstruction algorithm generates the Wigner distribution function by mapping the obtained beam profiles in a 3D section of the 4D phase space. From this, the spatial coherence properties of the beam can be determined assuming a quasi-homogeneous phase space distribution. Right: The coherent area in comparison to the total beam calculated at the waist position of the FEL.

Optik / Kurze Wellenlängen

Optics / Short Wavelengths

Mikroskopie im weichen Röntgenbereich

Gepulste Röntgenstrahlung wird für zahlreiche innovative Anwendungen benötigt, die von der strukturellen Analytik in der Biologie und den Lebenswissenschaften bis hin zur Untersuchung grundlegender Wechselwirkungsmechanismen mit Materie reichen. Intensive Röntgenpulse ermöglichen z. B. tomographische Aufnahmen aus dem Inneren von Zellen oder die Strukturaufklärung von Makromolekülen mit Ortsauflösungen auf der Nanometerskala. Allerdings stehen für derartige Untersuchungen aufgrund fehlender Laborstrahlquellen derzeit ausschließlich Synchrotrons oder Freie-Elektronen-Laser zur Verfügung, was den Einsatz und die Verbreitung der höchstauflösenden Messtechniken stark einschränkt.

Im Rahmen des SFB 755 "Nanoscale Photonic Imaging" wurde daher ein kompaktes Laborröntgenmikroskop für den Wellenlängenbereich des "Wasserfensters" ($\lambda = 2,2 \text{ nm} \dots 4,4 \text{ nm}$) entwickelt. Ein in einem kurzgepulsten Gasjet erzeugtes Laserplasma wird dabei von einem Kondensormsiegel auf eine Probe fokussiert und diese dann mit einer Fresnel'schen Zonenplatte stark vergrößert auf eine Kamera abgebildet. Mit Stickstoff als Targetgas (Emissions-Wellenlänge 2,88 nm) wurden u. a. Algen sowie das Bakterium *Deinococcus radiodurans* mikroskopiert. Die charakteristische Form des Bakteriums ist eindeutig zu erkennen. Darüber hinaus wurden z. B. Mikro-Organismen und Geo-Kolloide untersucht, die aufgrund ihres Eisengehaltes eine stärkere Absorption aufweisen als zum Beispiel kohlenstoffhaltiges Material.

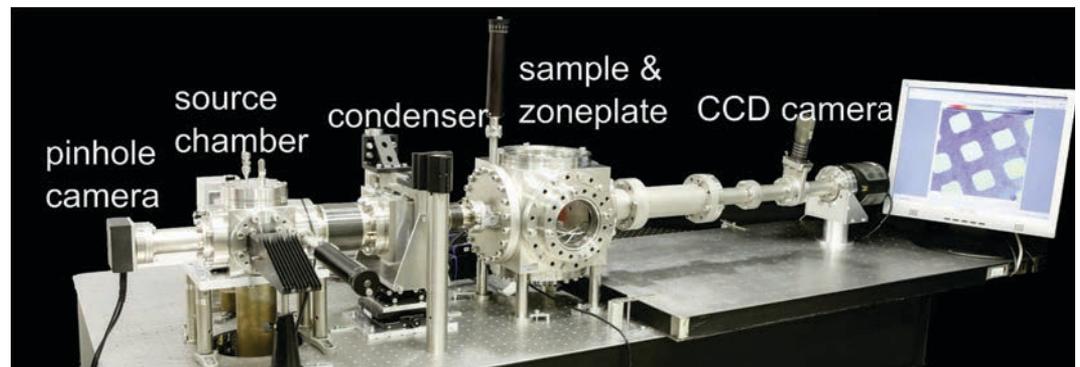
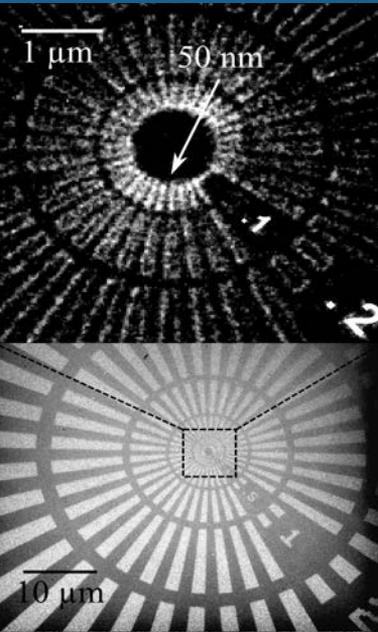


Foto des kompakten Laborröntgenmikroskops.

Photograph of the tabletop soft X-ray microscope.

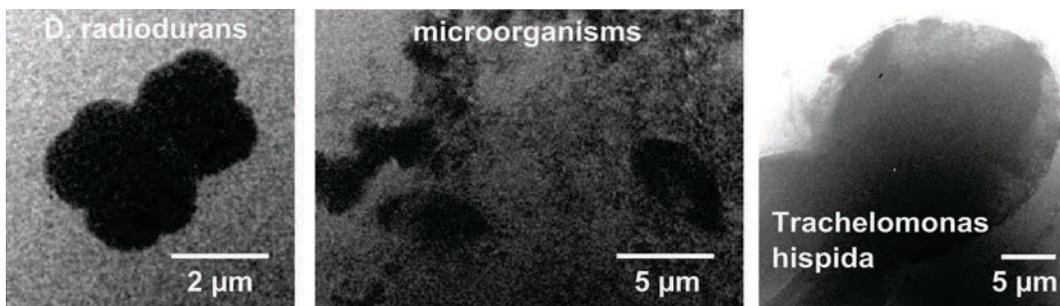
Optik / Kurze Wellenlängen

Optics / Short Wavelengths

Soft X-ray microscopy

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. Intense X-ray pulses allow, for example, tomographic images of the inside of cells or the structure determination of macromolecules with a spatial resolution on the nanometer scale. However, due to the lack of appropriate lab-scale radiation sources, such studies are currently conducted with synchrotron or free-electron lasers exclusively.

Within the framework of the SFB 755 "Nanoscale Photonic Imaging", a compact laboratory X-ray microscope was developed for the "water window" spectral range ($\lambda = 2.2 \text{ nm} \dots 4.4 \text{ nm}$). A laser plasma generated in a short-pulsed gas jet is focused by a condenser mirror onto a sample, which is then imaged by a Fresnel zone plate onto a camera at high magnification. Using nitrogen as the target gas (emission wavelength 2.88 nm), various algae and also the polyextremophilic bacterium *Deinococcus radiodurans* were imaged: the representative structure of the bacterium is clearly visible. Furthermore, microorganisms and geo-colloids were investigated. Due to their iron content, they show stronger absorption compared to material containing carbon.



Mikroskopaufnahme des Bakteriums *Deinococcus radiodurans* (links), von eisenhaltigen Mikro-Organismen (Mitte) und von *Trachelomonas hispida* (rechts) bei $\lambda = 2,88 \text{ nm}$ (Vergrößerung 250-fach, effektive Pixelgröße 52 nm, 18.000 Pulse, Belichtungszeit 60 min). Die Probe *D. radiodurans* wurde von T. Salditt (Universität Göttingen) zur Verfügung gestellt. Soft X-ray micrograph of the bacterium *Deinococcus radiodurans* (left), micro-organisms containing iron (middle) and *Trachelomonas hispida* (right) recorded with $\lambda = 2.88 \text{ nm}$ (magnification $250\times$, effective pixel size 52 nm, 18,000 pulses, exposure 60 min. The *D. radiodurans* was provided by T. Salditt (University of Göttingen).

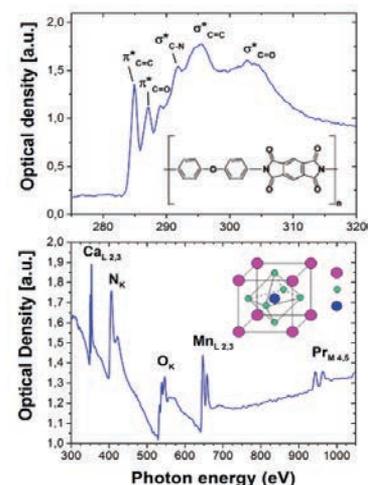
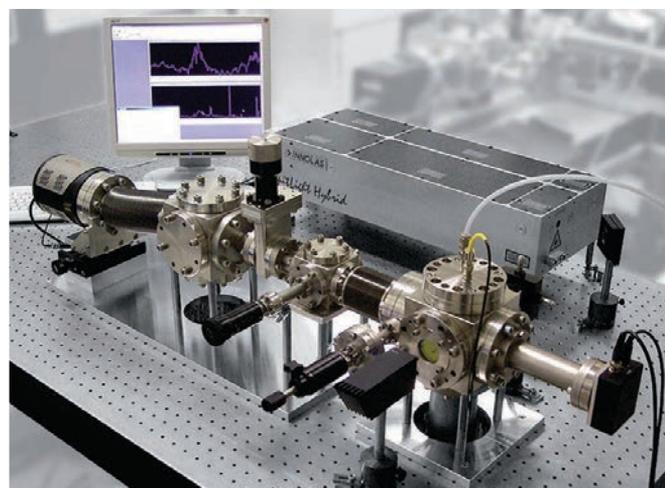
Optik / Kurze Wellenlängen

Optics / Short Wavelengths

Röntgen-Absorptionsspektroskopie (NEXAFS)

Auf Basis der Laborstrahlquelle für weiche Röntgenstrahlung wurde ein kompaktes Messsystem zur Absorptionsspektroskopie im Wellenlängenbereich des "Wasserfensters" ($\lambda = 2,2 \text{ nm} \dots 4,4 \text{ nm}$) entwickelt. Als Quelle wird ein in diesem Bereich breitbandig emittierendes laserinduziertes Krypton- bzw. Xenon-Plasma genutzt. Mit dem nachfolgenden Spektrometer lässt sich an dünnen Transmissionsproben die Lage der Röntgen-Absorptionskanten und damit der Bindungszustand vieler wichtiger Elemente (u. a. Si, Cl, S, C, N, O, Ca, K, Ti, Mn, Fe, Cu) genau vermessen (siehe unten). 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. Es wird bereits eine hervorragende Übereinstimmung mit vergleichbaren Messungen an Synchrotron-Quellen erzielt. Durch die stetige Weiterentwicklung der Plasmaquelle konnten kürzlich erstmals die L-Kanten von Mangan, Eisen und Kupfer untersucht und z. B. der Einfluss unterschiedlicher Oxidationsstufen auf die Absorptionsspektren verschiedener Manganverbindungen gemessen werden.

Aufgrund der geringen mittleren freien Weglänge weicher Röntgenstrahlung in Luft werden NEXAFS-Apparaturen überwiegend unter Hoch- bzw. Ultrahochvakuum betrieben. Insbesondere organische Proben enthalten aber gebundenes Wasser, wobei unter Vakuum erfolgendes Ausgasen strukturelle Änderungen bewirkt. Dies führt zu verfälschten Messergebnissen. Um die Untersuchung vakuumsensitiver Proben zu ermöglichen, wurde eine Helium-Probenkammer in den bestehenden NEXAFS-Aufbau integriert. Diese erlaubt die Untersuchung von Proben unter Atmosphärendruck.



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 employing a laboratory scale laser plasma source emitting in the "water window" ($\lambda = 2.2 \text{ nm} \dots 4.4 \text{ nm}$). The fine structure of the absorption edges yields information on molecular orbitals, oxidation states and the coordination of an absorbing element, and can therefore be applied for chemical analysis. Single-pulse NEXAFS spectra are obtained from a broadband krypton or xenon plasma transmitted through a sample and divided by a reference spectrum without a sample. The measurements already achieve excellent agreement with comparable measurements using synchrotron sources.

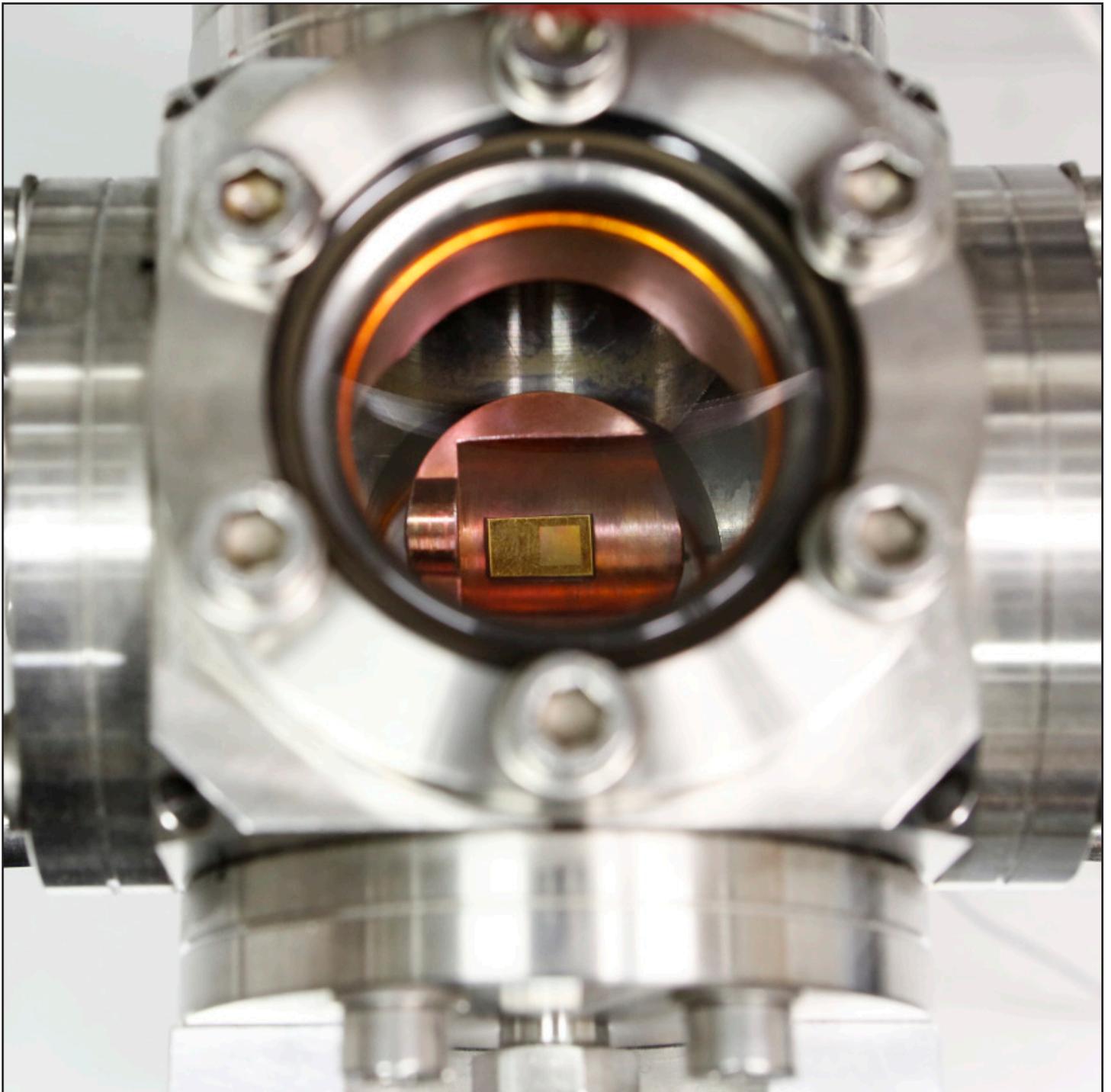
Due to the continuous development of the plasma source, L-edges of manganese, iron and copper were investigated for the first time. Moreover, the influence of different oxidation states on the absorption spectra of different manganese compounds were examined.

Due to the short mean free path of soft X-rays in air, NEXAFS devices are usually operated under high or ultra-high vacuum. Especially organic samples contain bound water, where degassing under vacuum results in water release and thus to structural changes possibly altering the spectral signature. In order to facilitate investigations of vacuum-sensitive samples, a helium sample chamber was integrated into the existing NEXAFS set-up. This innovation allows for measurements under ambient pressure.

◀ Links: Foto des kompakten Röntgenabsorptions-Spektrometers; rechts oben: NEXAFS-Spektrum an der Kohlenstoff-K-Kante von Polyimid (Mittelung über 60 Laserpulse). Die einzelnen Peaks entsprechen elektronischen Übergängen in höherliegende unbesetzte Niveaus und spiegeln die chemische Struktur und die Bindungsverhältnisse in der Probe wieder; rechts unten: Übersichtsspektrum des Perovskits $\text{Pr}_{0.7}\text{Ca}_{0.3}\text{MnO}_3$ (PCMO). Alle Absorptionskanten können gleichzeitig gemessen werden.

Left: Photograph of the compact X-ray absorption spectrometer. Top right: NEXAFS spectrum on the carbon K-edge of polyimide (average over 60 laser pulses). The single peaks correspond to electronic transitions to higher unoccupied states and reflect the chemical structure and binding ratio in the sample. Bottom right: Spectra of the Perovskite $\text{Pr}_{0.7}\text{Ca}_{0.3}\text{MnO}_3$ (PCMO). All absorption edges can be measured simultaneously.

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, 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 Analyse der Gemischbildung für emissionsarme Erdgasmotoren.

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, combustion diagnostics 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 explosive 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 analysis of mixture formation for low-emission natural gas engines.



Dr. Hainer Wackerbarth
Abteilungsleiter

☎ +49 551/5035-58

📠 +49 551/5035-99

✉ hainer.wackerbarth@llg-ev.de

Mitarbeiter Staff members

Dr. Stephan Bauke

Dr. Georgios Ctistis

Dr. Kai Golibrzuch

Dr. Christoph Lenth

Dennis Braun

Julian Born

Simon Göllner

Daniel Konradt

Christian Niklas

Stefan Scholz

Florian Wieduwilt

Photonische Sensorik

Photonic Sensor Technologies

Raman-spektroskopische Bestimmung von Mikroplastiken in Abwässern

Das Thema Mikroplastikrückstände in Gewässern rückte in den vergangenen Jahren immer weiter in den Fokus der öffentlichen Aufmerksamkeit. Ursache hierfür ist, dass die Belastung von Oberflächengewässern weiter ansteigt und Mikroplastik in immer mehr Organismen der Nahrungskette nachgewiesen wird, die zum Teil auch zum menschlichen Verzehr genutzt werden. Die daraus resultierenden gesundheitlichen Risiken sind noch nicht erforscht. Ebenso wenig sind Methoden zur Anreicherung und Analyse von Mikroplastikpartikeln standardisiert oder für die Vor-Ort-Analytik verfügbar.

Ziel unserer Arbeiten ist die Erforschung und Entwicklung einer praxistauglichen Vor-Ort-Methode zur Bestimmung der Masse an Mikroplastikpartikeln direkt auf Filtern. Eingesetzt werden soll diese Bestimmungsmethode bei der Überwachung des Ablaufes von Kläranlagen.

Das verwendete Raman-Verfahren basiert auf der Abrasterung des Filters mit Hilfe eines Prozessramangerätes. Es werden demnach keine Partikel gezählt, sondern es wird ein Durchschnittsspektrum aller auf dem Filter vorhandenen Partikel und des Filtermaterials generiert. Das Zählen von Einzelpartikeln und deren Ramanspektroskopische Analyse würden den hohen apparativen Aufwand eines Raman-mikroskopischen Messplatzes erfordern, der in der Prozessanalytik nicht praktikabel ist. Da sich das Ramanspektrum des belegten Filters additiv aus den Ramanspektren aller auf dem Filter vorhanden Substanzen sowie dem des Filtermaterials zusammensetzt, ist eine mathematische Separation notwendig. Hierzu wird das mathematisch-statistische Verfahren Partial Least Squares Regression (PLS) getestet. In der Tabelle ist anhand der Fehler zu erkennen, dass die verschiedenen Mikroplastiken erfolgreich quantifiziert werden können. Eine große Herausforderung stellt jedoch die Analyse und Kompensation der Effekte, die die Probenmatrix verursacht, dar.

Validierung	AC	PA12	PE	PET	PS	Mittlerer RMSE Average RMSE
PLS2	1,88	1,62	2,39	2,80	1,50	2,04
PLS1 (AC)	1,72					
PLS1 (PA12)		1,54				
PLS1 (PE)			2,47			
PLS1 (PET)				2,83		
PLS1 (PS)					1,46	
5x PLS1	1,72	1,54	2,47	2,83	1,46	2,00



Wurzel der Fehlerquadratsummen bei der Validierung verschiedener PLS-Modelle in mg bezogen auf die Bestimmung von 0 bis 20 mg Mikroplastik.

Root mean square error (RMSE) of validation in mg using different PLS models based on the determination of 0 to 20 mg microplastics.



Photonische Sensorik

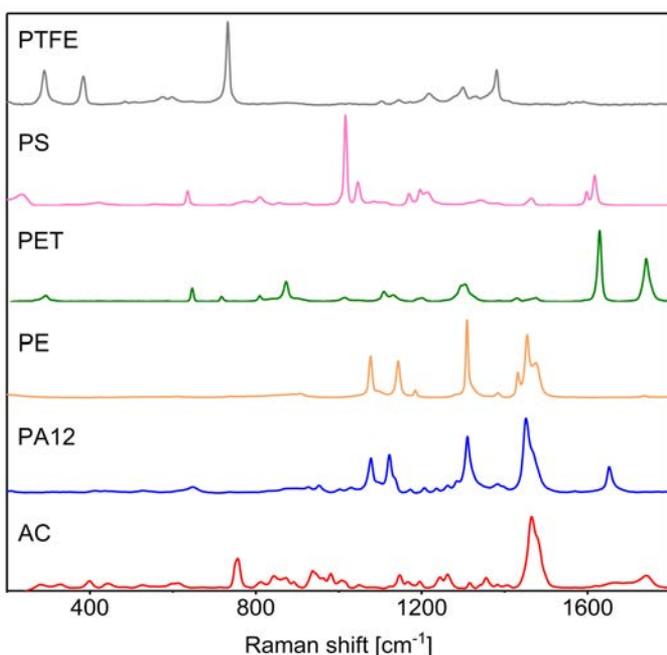
Photonic Sensor Technologies

Raman spectroscopic analysis of microplastics in sewage

In recent years, public attention is increasingly focussed on the topic of microplastic residues in water bodies. The reason for this is that the load on surface waters continues to rise and microplastics are detected in an increasing number of organisms of the food chain, which are also partly used for human consumption. The resulting health risks have not been explored yet. Methods for the enrichment and analysis of microplastic particles are neither standardized nor applicable for on-site analysis.

The aim of our work is the research and development of a practical on-site method for determining the mass of microplastic particles directly on filters. This method of determination is to be used in the monitoring of the effluent of sewage treatment plants.

The Raman method used is based on the scanning of the filter by means of a process Raman device. Therefore, no particles are counted but an average spectrum of all the particles present on the filter and the filter material are generated. The counting of individual particles and the Raman spectroscopic analysis of these particles requires the high apparatus-complexity of a Raman microscope, which is not practical in process analysis. Since the Raman spectrum of the loaded filter contains contribution from the Raman spectra of all substances on the filter and the filter material itself, a mathematical separation is necessary. For this purpose, the mathematical statistical method of partial least squares regression (PLS) is tested. We have demonstrated by the errors listed in the table that the quantification is successful. A major challenge still is to analyse and compensate the effects caused by the sample matrix.



Ramanspektren von Acrylat-Copolymer (AC), Polyamid 12 (PA12), Polyethylen (PE), Polyethylenterephthalat (PET), Polystyrol (PS) und Polytetrafluorethylen (PTFE).

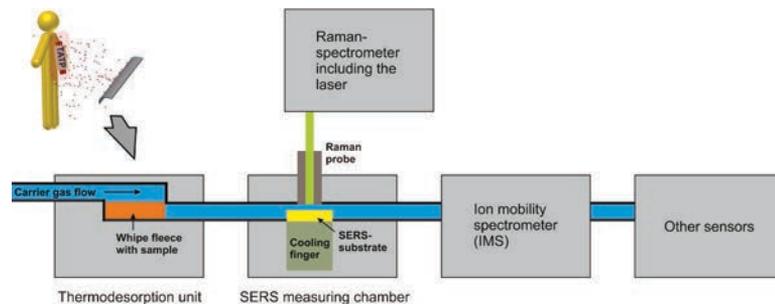
Raman spectra of acrylate-copolymer (AC), polyamide 12 (PA12), polyethylene (PE), polyethylenterephthalate (PET), polystyrole (PS) and polytetrafluoroethylene (PTFE).

Photonische Sensorik

Photonic Sensor Technologies

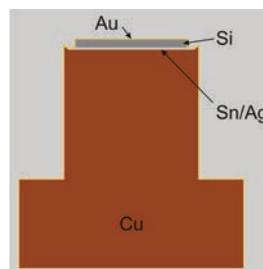
Oberflächenverstärkte Raman-Spektroskopie in Kombination mit Kryo-Fokussierung zur Explosivstoffdetektion

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



Apparatur zur Explosivstoffdetektion mittels Wischtest.
Apparatus for explosive detection by wipe test.

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 geringster 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 Thermodesorptionseinheit 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.



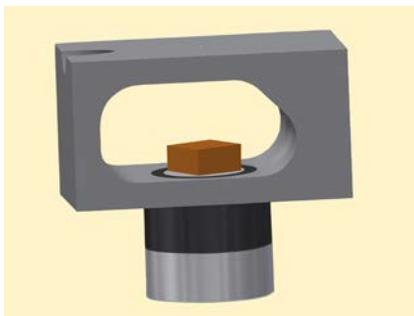
Miniatur-Kühlfinger mit nanostrukturierter Goldoberfläche.
Miniature cooling finger with nanostructured gold surface.

Photonische Sensorik

Photonic Sensor Technologies

Surface-enhanced Raman spectroscopy in combination with cryofocusing for explosive detection

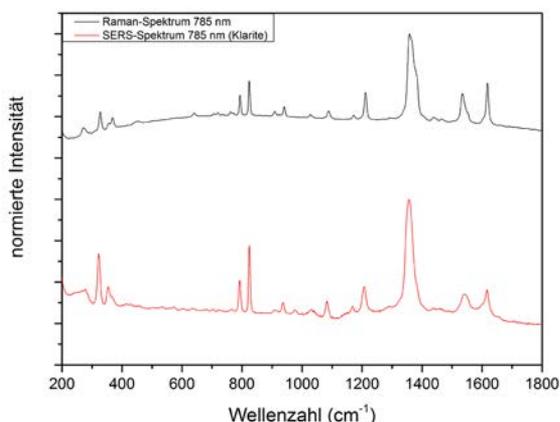
Explosive detection is - as shown by the discovery of a high-risk explosive in Chemnitz in October 2016 - an actual and pressing issue. Surface enhanced Raman scattering (SERS) spectroscopy enables rapid, faultless detection of different classes of explosives including triacetone triperoxide (TATP). This explosive was secured in Chemnitz and was used in the attacks in Paris in November 2015.



Miniaturisierte Messkammer mit Vorrichtung zur Kyrofokussierung.

◀ Miniaturized Measuring chamber with cryofocusing feature.

Traces of explosives on clothing or luggage are picked up with a fleece by means of the so-called wiping test. The fleece is heated to analyse the vaporizable components. The low amounts of the substances are a great 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. Nanostructured 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 nanostructured surface is located on a cooling finger. On to this, the substances to be analyzed, which have been baked out of the fleece by means of the thermal desorption unit, are redeposited in a minimal area. This process is also referred to as cryofocusing. For this purpose, a mechanically stable connection of a thin nanostructured silicon substrate with copper must be realized that has maximum thermal conductivity. This is realized via 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.



Fingerprintbereich des Ramanspektrums von TNT, aufgezeichnet mit und ohne Oberflächenverstärkung.



◀ Fingerprint range of the Raman spectrum of TNT, recorded with and without surface enhancement.

Photonische Sensorik

Photonic Sensor Technologies

Entwicklung eines optischen Sensors zur Überwachung der Abgaszusammensetzung in kleinen Feuerungsanlagen

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.¹ 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 Zweijahresturnus Messungen relevanter Parameter wie Kohlenmonoxid (CO) und Sauerstoff (O₂) durchgeführt. Hierzu werden elektrochemische Sensoren eingesetzt, welche auf Grund ihrer Bauweise häufigen Wartungsintervallen unterliegen und verschleifen. Zudem kann das Treibhausgas und Hauptverbrennungsprodukt Kohlendioxid (CO₂) nicht direkt elektrochemisch detektiert werden. Seine Konzentration wird daher aus den Messgrößen für CO und O₂ lediglich berechnet, was eine Fehlerquelle bei der Emissionsbestimmung darstellt.



◀ FTIR-Spektrometer mit angeschlossener Druckzelle zur Messung verschiedener Konzentrationen und Zusammensetzungen des Verbrennungsabgases.
FTIR spectrometer with pressure cell to measure different concentrations and mixtures of exhaust gases.

Ziel unserer Arbeiten gemeinsam mit der Vereta GmbH ist die Entwicklung eines optischen Sensors, der simultan die Konzentrationen von CO und CO₂ im Abgasstrom von Verbrennungsanlagen misst. Zur Messung wird die nichtdispersive Infrarotspektroskopie (NDIR) eingesetzt. Durch das Lambert-Beer'sche Gesetz kann die Konzentration der Gase direkt im Abgasstrom bestimmt werden. Die Verwendung des mittleren Infrarotbereiches des elektromagnetischen Spektrums bringt dabei den Vorteil hoher Absorptionsquerschnitte und kleiner spektraler Überlagerung der einzelnen Absorptionsbanden von CO₂ und CO. Die Konstruktion des optischen Aufbaus des Messsystems muss dabei unter den Gesichtspunkten einer kompakten und robusten Bauweise sowie niedriger Kosten vorgenommen werden. Gleichzeitig muss das System hohe Anforderungen an die Messgenauigkeit erfüllen, was ein hohes Signal-Rausch-Verhältnis sowie im Falle von CO eine sehr lange Absorptionsstrecke erfordert. Dieser Zielkonflikt stellt eine der zentralen Herausforderungen im Projekt dar.

¹ Quelle: Homepage Umweltbundesamt

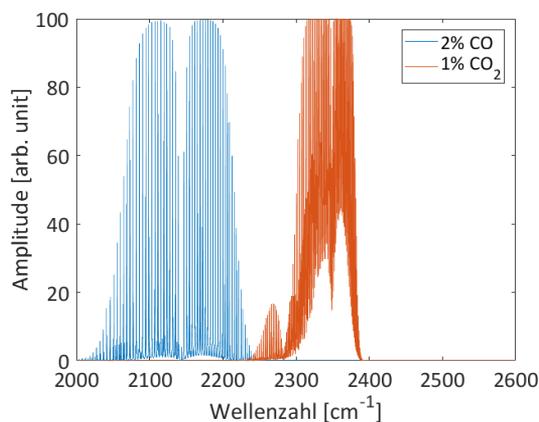
Photonische Sensorik

Photonic Sensor Technologies

Development of an optical sensor to control exhaust gases in small firing systems

In 2016, there were approximately 13 million gas boilers, 5.6 million oil heating boilers, and 0.7 million boilers for burning solid materials in Germany. Furthermore, there were approximately 11.7 million fireplaces or tile ovens which operated with either wood or coal¹. The resulting exhaust gases from these combustion processes affect the environment, climate and health, and therefore are governed 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 (O₂) every two years. For these monitoring measurements, electrochemical sensors are used, which are liable to frequent inspections as well as heavy wear due to their construction. Furthermore, the greenhouse gas and main combustion product carbon dioxide (CO₂) is not detected with electrochemical sensors. Its concentration is determined through CO and O₂ measurement, resulting in an error for the calculation of the emission.



◀ Berechnung der Spektren von CO und CO₂ mit Hilfe der HITRAN-Datenbank zur Bestimmung der benötigten Sensorik bei gegebenen Absorptionsstrecken.
Calculation of CO and CO₂ spectra using the HITRAN database to determine the requirements for the sensor technology.

The goal of our work in collaboration with Vereta GmbH is the development of an optical sensor that can simultaneously measure the concentration of CO and CO₂ in the exhaust gas of a firing system. Non-dispersive infrared spectroscopy (NDIR) is used as the measurement technique. With the help of the Beer-Lambert law, the concentration of the gases in the exhaust gas flow can be determined. Working at the mid-infrared regime has the advantage of large absorption cross sections and small overlap of the absorption bands of CO₂ and CO. The construction of the optical set-up of the sensor is subject to the constraints of compactness, robustness, as well as low cost. Simultaneously, the system has to match requirements of high measurement accuracy, which requires a high signal-to-noise ratio and, in the case of CO, requires a long absorption distance. This conflict of the demands is the main challenge in this project.

¹ Source: Homepage Federal Environmental Agency

Photonische Sensorik

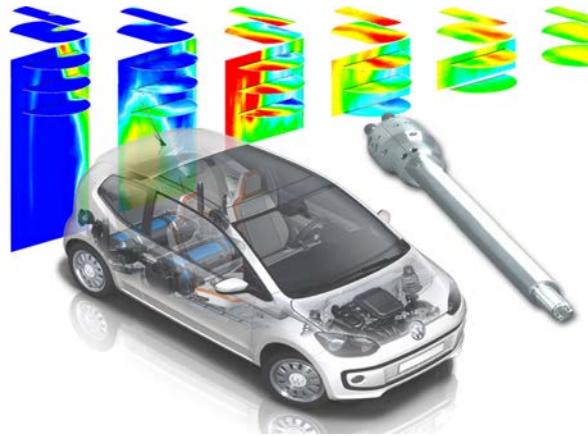
Photonic Sensor Technologies

Optische Verbrennungsdiagnostik

Die aktuelle EU-Verordnung zur Reduktion des CO₂-Ausstoßes besagt, dass die durchschnittliche Emission von Neuwagen bis 2021 auf 95 g/km gesenkt werden muss. Die Verwendung von Erdgas (CNG, engl.: Compressed Natural Gas) als Treibstoff ist eine der Möglichkeiten, eine deutliche Reduktion der CO₂-Emissionen zu erreichen.

Die Entwicklung effizienter und emissionsarmer CNG-Motoren ist eine neue Herausforderung, da sich die physikalischen Eigenschaften von Gas deutlich von Otto-Kraftstoffen unterscheiden. Dies wirkt sich direkt auf Gemischbildungs- und Verbrennungsprozesse im Motor aus. Daher wird dringend eine Messtechnik benötigt, welche die Konzentration der am Motorzyklus eines PKW-Viertaktmotors beteiligten Gase (Methan, Wasser und Kohlenstoffdioxid) zeitaufgelöst (100 µs) bestimmt.

Beginnend Mitte 2014 arbeitet das LLG bis Mitte 2017 gemeinsam mit dem Institut für Verbrennungs- und Gasdynamik der Uni Duisburg-Essen sowie den Firmen LaVision GmbH und Volkswagen AG an der Lösung dieses Problems im Projekt OMeGa-E (Optische Messung der Gemischbildung am Erdgasmotor). Der auf IR-Absorption basierende ICOS-Zündkerzensensor zur Messung der Gemischbildung im Motorbrennraum, welcher gemeinsam mit LaVision entwickelt wurde, ist im Rahmen dieses Projekts zur Messung an CNG-Luft-Gemischen weiterentwickelt worden.



▲ Laserinduzierte Fluoreszenz und Zündkerzensensor dienen der Entwicklung effizienter und ressourcenschonender Erdgasmotoren (Quelle: Volkswagen AG, Universität Duisburg-Essen, LaVision GmbH).

Laser induced fluorescence and spark-plug probe serve as a tool for the development of efficient and resource saving CNG-engines. (source: Volkswagen AG, University Duisburg-Essen, LaVision).

Die Ergebnisse bei Volkswagen an einem Prüfstandsmotor und an einer Rapid Compression Machine an der Universität Erlangen zeigten die Funktionstüchtigkeit des ICOS-Systems. Basierend auf dieser erfolgreichen Prototypentwicklung kann zeitnah ein kommerzieller Sensor hergestellt werden, mit dem Erdgasmotoren optimiert und somit klimafreundlicher gebaut werden können.

Photonische Sensorik

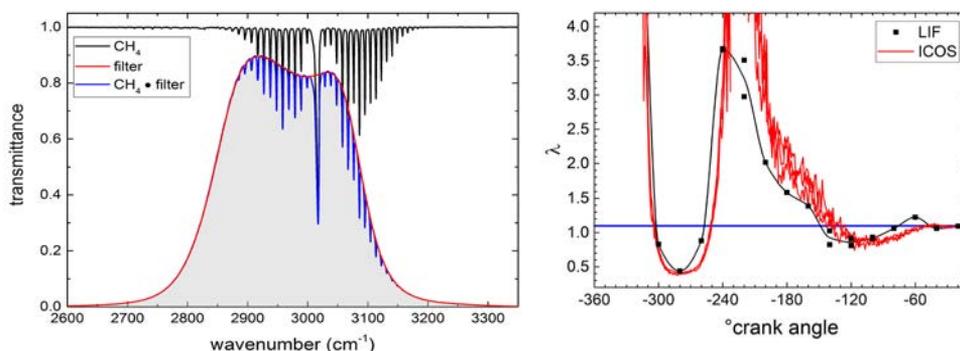
Photonic Sensor Technologies

Optical combustion diagnostics

A new European Union (EU) regulation on the control of CO₂ emissions requires reducing the average emissions of new cars below 95 g/km by 2021. The use of compressed natural gas (CNG) as fuel allows significant reduction of the CO₂ emissions and thus achieves the goal set by the EU.

The development of efficient and low-emission CNG-engines is a new challenge since the physical properties of CNG differ significantly from those of conventional liquid gasoline. This directly influences the mixture formation and the combustion process. Therefore, the time-resolved (100 μs) acquisition of data on the gas density of each substance (methane, water and carbon dioxide) involved in a motorcycle of a typical four-stroke engine is urgently required.

Starting in mid-2014, LLG established a collaboration with the Institute for Combustion and Gasdynamics Duisburg and the companies LaVision GmbH and Volkswagen AG on the solution to this problem in the OMeGa-E project ending in mid-2017. During former projects, a spark-plug sensor based on IR-absorption to measure mixture formation in the combustion chamber of an engine was developed together with LaVision. This sensor was further developed in the OMeGa-E project for use with CNG air mixtures.



Links: Messprinzip des ICOS-Systems am Beispiel CH₄: Durch einen breitbandigen Filter wird ein passender Bereich des Spektrums für die Quantifizierung der Dichte selektiert. Rechts: Ein Vergleich der Messungen mit laserinduzierter Fluoreszenz (LIF) und ICOS-System ergibt eine gute Übereinstimmung.

Left: Measurement principle of the ICOS system using the example of CH₄: a broadband filter selects a defined region of the spectrum for quantification of the density. Right: Comparison measurements with laser-induced fluorescence (LIF) and ICOS system show good agreement.

The results on a test engine at Volkswagen and a rapid compression machine at University Erlangen showed the functionality of the developed ICOS system. Based on this successful development, a commercial sensor can be produced, with which CNG engines can be optimized and hence be manufactured more environmentally friendly.

Projekte

Projects



Erfolgreiches drittes Arbeitsjahr des Photonik Inkubators in Niedersachsen

Der Bericht zur Entwicklung des Photonik Inkubators Niedersachsen – kurz PI - am LLG gliedert sich in folgende Abschnitte:

- erste gelungene Ausgründung: die FiberSense GmbH
- neueste Entwicklungen der aktuellen PI-Projekte

FiberSense GmbH

Für das erste Projekt des Photonik Inkubators stand das Jahr 2017 im Zeichen der Gründung eines Unternehmens – insbesondere der Suche nach geeigneten Investoren. Nach erfolgreichem Start zum 1.11.2014 endete die Inkubationsphase des extern am Fraunhofer-Heinrich-Hertz-Institut in Goslar durchgeführten Projekts FiberLab am 31.12.2016. FiberLab hatte sich mit der Herstellung von neuartigen Sensoren unter Verwendung gewöhnlicher Glasfasern beschäftigt, die – neben den heute bereits bekannten faseroptischen Sensoren für Dehnung und Temperatur – auch die Messung von Krümmungen, Torsionen und dreidimensionale Navigation im Raum erlauben.



▲ Glasfaser von FiberSense mit 5 Fasergittern bei monochromatischer Beleuchtung.
FiberSense fiber with 5 fiber gratings under monochromatic illumination.

Kurz vor Ende des Projekts konnte das FiberLab-Team im November 2016 über den eigentlichen Inhalt des Projekt hinaus ein komplett neuartiges Konzept für ein faseroptisches Spektrometer vorstellen, welches ein Gitter innerhalb der Faser direkt als dispersives Element ausnutzt. Die Gründung des Unternehmens auf eine Investition fand am 19.09.2017 in Braunschweig statt. Der Firmenname: FiberSense GmbH. Im weiteren Verlauf des Jahres konnten erfolgreich Investoren aus dem Münchener Raum gewonnen werden, so dass sowohl eine eigene Fertigungsanlage für faseroptische Sensoren gekauft als auch das einzigartige und neuartige Konzept eines Spektrometers als eines vielseitig einsetzbaren Produktes in Zukunft vermarktet werden kann. Beides wird bis zum Ende 2018 von zunächst einem Team aus vier Mitarbeitern realisiert.

Projekte

Projects

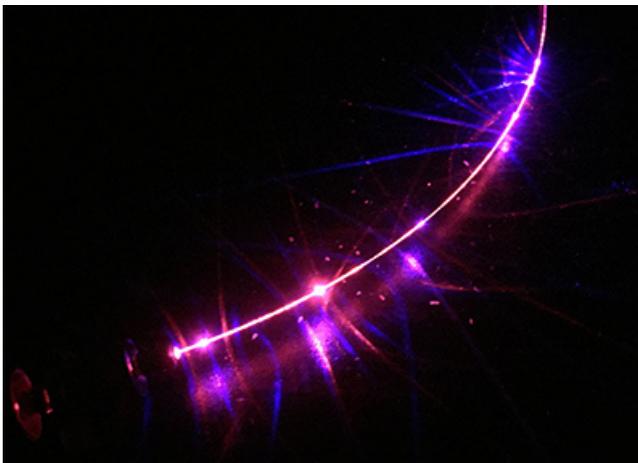
A Successful Third Year of Operation for Photonik Inkubator in Lower Saxony

The report on the development of the Photonik Inkubator in Lower Saxony, abbreviated to PI, at LLG is divided into the following sections:

- Initial successful spin-off: FiberSense GmbH
- Latest development of current projects

FiberSense GmbH

For the first project of the Photonik Inkubator, the year 2017 was all about founding a company and, in particular, searching for suitable investors. After its successful launch on November 1, 2014, the incubation phase of the FiberLab project which was conducted externally at the Fraunhofer Heinrich Hertz Institute in Goslar came to an end on December 31, 2016. FiberLab had been working on the production of new types of sensors using standard glass fibers which, in addition to the familiar fiber-optic sensors for strain and temperature, also enable the measurement of curvature, torsion, and three-dimensional navigation in the given space.



◀ Faser mit 4 Fiber Bragg Gittern nach Einkopplung der Wellenlängen von 450 nm und 630 nm.
Fiber with 4 Fiber Bragg gratings after coupling the shaft of 450 nm and 630 nm radiation.

Shortly before the end of the project, the FiberLab team presented in November 2016 a completely new concept for a fiber-optic spectrometer which beyond the actual scope of the project makes use of a grating inside the fiber directly as the dispersive element. The foundation of the company as preparation for an investment took place in Brunswick on September 19, 2017. The company name: FiberSense GmbH. Later in the year, investors were successfully convinced from the Munich area, so that an independent production facility for fiber-optic sensors can be built and the unique innovative concept of the spectrometer be marketed as a versatile product. Both will be completed by the end of 2018 by an initial team of four employees.



Dieser Bericht wurde verfasst von:

Prof. Dr. Gerd Marowsky
Technologischer Berater der
Photonik Inkubator GmbH

☎ +49 551/5035-30

☎ +49 551/5035-99

✉ gmarows@gwdg.de

Projekte

Projects

Neue PI-Projekte

In 2017 wurde durchgängig an vier Inkubator-Projekten gearbeitet:

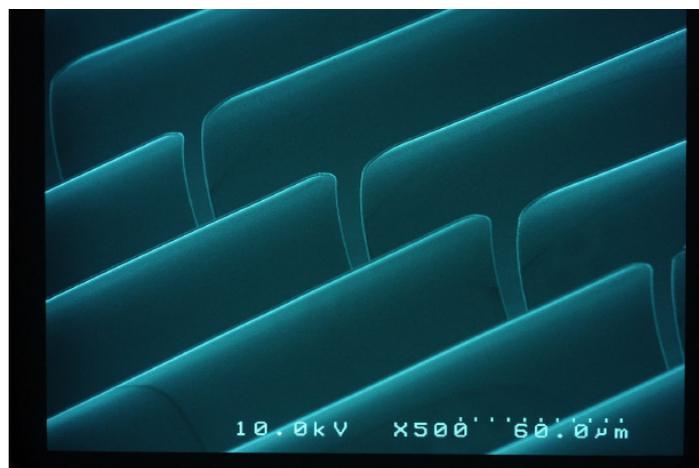
- Superlight Photonics (Braunschweig)
- Patientensicherheit 4.0 (Göttingen)
- SurPlas (Göttingen)
- NanoScale (Kassel, ab 1.9.2017)

Bei der Sitzung des Investment-Gremiums am 29.9.2017 wurde die Inkubation für zwei weitere Vorhaben genehmigt:

- NanoPET (Braunschweig/München)
- OptoGenTech (Göttingen)

Mithin sind derzeit sechs Projekte in Arbeit und nach dem großen Gründungserfolg des Vorhabens FiberSense ist zu hoffen, dass alle Projekte auch zu Firmengründungen führen. Es scheint, dass die Gründungsmöglichkeiten im Bereich der Photonik durch die bereits vorhandenen Netzwerke deutlich besser sind als im Bereich der Lebenswissenschaften, wo nur mit einer Gründungsrate nach erfolgreicher Inkubation um 50 Prozent gerechnet wird.

Teilweise wurden die Projekte bereits in früheren Jahren vorgestellt. Deshalb an dieser Stelle der aktuelle Stand und eine kurze Inhaltsangabe der neu genehmigten Vorhaben.



◀ Array von schaltbaren Mikrosiegeln.
Array of switchable micromirrors.

Beim Projekt **NanoScale** der Universität Kassel handelt es sich um den Versuch, aktive Fenster zur Steuerung des Lichteinfalls in Innenräumen einzusetzen. Als Steuerelemente sind Arrays von Mikrosiegeln innerhalb von Mehrschichtfenstern angedacht. Bisher ist ein Prototypfenster von 10 cm x 10 cm erstellt worden. Es demonstrierte eindrucksvoll die Vorzüge des neuen Verfahrens. Wie großflächig mit aktiven Fenstern ausgestattete Gebäude in Zukunft aussehen könnten, zeigt die nebenstehende Abbildung.

Projekte

Projects

New PI projects

Four incubator projects were carried out in 2017:

- Superlight Photonics (Brunswick)
- Patientensicherheit 4.0 (Patient Safety 4.0) (Göttingen)
- SurPlas (Göttingen)
- NanoScale (Kassel, from 1/9/2017)

During the meeting of the investment board on September 29, 2017, the incubation was approved for two further projects:

- NanoPET (Brunswick/Munich)
- OptoGenTech (Göttingen)

There are therefore six projects in progress at the present, and following the highly successful establishment from the FiberSense project, we hope that all projects will lead to new company foundations. It appears that the start-up opportunities in photonics through existing networks are considerably better than in the area of life sciences, which has a foundation rate of just 50 percent following successful incubation.

Some of the projects were already presented in recent years. Therefore an update is provided here as well as a short account of the newly approved projects.



◀ Gebäude der Zukunft.
Buildings of the future.

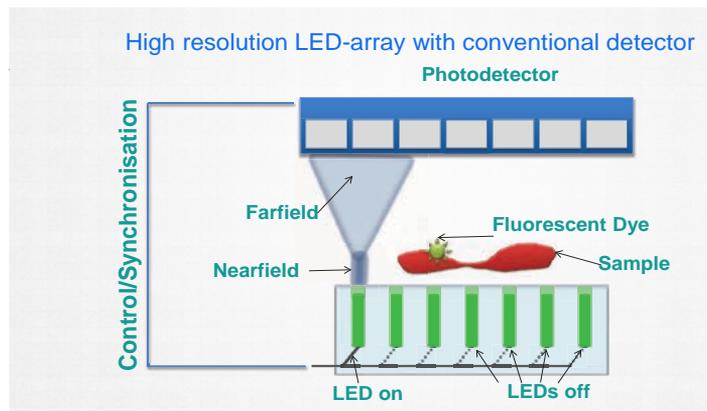
The **NanoScale** project from the University of Kassel is an attempt to use active windows to control the light falling into indoor areas. Arrays of micromirrors inside multilayered windows dimension are to be used as control elements. A prototype window of 10 cm × 10 cm has been made. It impressively demonstrated the benefits of the new procedure. The adjoining illustration shows how buildings extensively fitted with active windows might look in the future.

Projekte

Projects

Das Projekt **Superlight Photonics** hat im Zuge seiner bisherigen Entwicklung überraschend an Bedeutung gewonnen: Das mit einem miniaturisierten LED-Array realisierbare linsenlose Mikroskop hat sich inzwischen wegen seiner Einfachheit und Schnelligkeit zu einem international sehr wichtigen Instrument entwickelt (vergl. auch zahlreiche Beiträge zu diesem Thema auf der Photonics West im Januar 2018). Darüber hinaus ist das LED-Array eine interessante, sehr schnelle Lichtquelle für Mikroskopie mit strukturierter Beleuchtung geworden.

Die Abbildung zeigt das Prinzip dieser neuartigen Mikroskopie mittels GAN-Chip: Das miniaturisierte Array bildet biologische Objekte mittels "Schattenwurf" ab. Die mikroskopische Vergrößerung kommt durch die Bildvergrößerung über den Photodetektor zustande.



◀ Linsenlose Mikroskopie.
Lensless Microscopy.

Beim Projekt **NanoPET**, Plasmon Enhanced Technologies, geht es um nanophotonische Fluoreszenzverstärker für die Einzelmolekül-DNA-Sequenzierung. Auf Basis einer in Braunschweig gemachten und patentierten Erfindung möchten die Antragsteller ein verbessertes, Polymerase-basiertes Sequenzierverfahren entwickeln – und das im Hinblick auf das stetig wachsende Marktvolumen für DNA-Sequenzierer, das bereits jetzt 3,5 Mrd. Euro beträgt. Mit nanophotonischer Fluoreszenzverstärkung beschreiben die Antragsteller das Verhalten von metallischen Nanostrukturen, die - wesentlich kleiner als die Wellenlänge des verwendeten Lichts - bei optischer Anregung sich wie optische Antennen verhalten. Diese plasmonischen Strukturen agieren wie ein getriebener Oszillator und zeigen ausgeprägte Resonanzen. Eine derartige Resonanz liegt bei Goldnanopartikeln mit einem Durchmesser von 80 nm in wässriger Umgebung im grünen Spektralbereich. Die Anregung solcher Resonanzen führt wiederum zu einer lokalen Verstärkung des elektrischen Feldes nahe der Partikeloberfläche, dem sogenannten „Hot Spot“. DNA-Nanostrukturen erlauben die gezielte Platzierung fluoreszierender Moleküle in diesem „Hot Spot“, um ihr Signal zu verstärken. Im Projekt NanoPET wird es möglich sein, mit Hilfe dieser Fluoreszenzverstärkung einzelne, farbstoffmarkierte Nukleotide zuverlässiger nachzuweisen und damit die DNA-Sequenzierung wesentlich zu beschleunigen. Ob damit die DNA-Sequenzierung so beschleunigt und vereinfacht wird, dass sie „alltagstauglich“ wird, das ist noch zu demonstrieren.

Projekte

Projects

The **Superlight Photonics** project has surprisingly become more important over the course of its development to date. The lensless microscope based on a miniaturized LED array has now become a very important tool internationally due to its simplicity and speed (see also various articles on this subject at Photonics West from January 2018). The LED array is also an interesting very fast light source for microscopy with structured illumination.

The figure depicts the principle of this innovative microscopy using a GAN chip. The miniaturized array images biological objects by means of "shadowing". Microscopic magnification is achieved by enlarging the image using the photo detector.

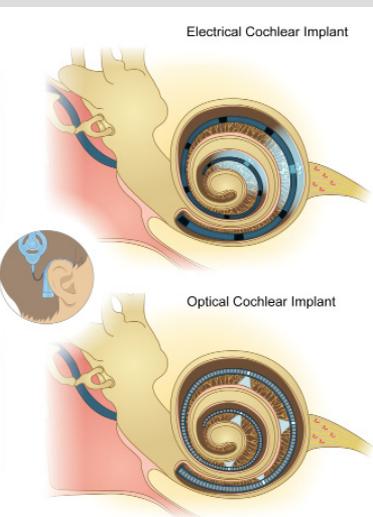


◀ Mikroskop in der Laboranwendung.
Microscope in a laboratory application.

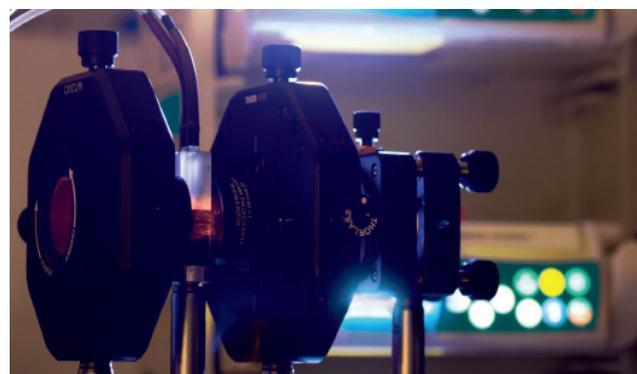
The **NanoPET** project Plasmon Enhanced Technologies is a nanophotonic fluorescence enhancer for the single-molecule DNA sequencing. Based on an invention developed and patented in Brunswick, the applicants are seeking to develop an improved polymerase-based sequencing procedure - in light of a constantly growing market volume for DNA sequencers which already amounts to EUR 3.5 billion. With nanophotonic fluorescence enhancement, the applicants describe the behavior of metallic nanostructures, which being considerably smaller than the wavelength of the light used, behave like optical antennae upon optical excitation. These plasmonic structures act like a driven oscillator and have distinct strong resonances. In the case of gold nanoparticles with a diameter of 80 nm in an aqueous environment, this resonance would be in the green spectral range. The excitation of such resonances then leads to local amplification of the electrical field close to the surface of the particle, known as the hot spot. DNA nanostructures allow the specific placement of fluorescent molecules in this hot spot to amplify their signal. The NanoPET project will make it possible to detect individual dye-marked nucleotides more reliably by means of this fluorescence enhancement and thus accelerate the DNA sequencing significantly. It remains to be seen whether the DNA sequencing will be accelerated and simplified sufficiently to become suitable for standard use.

Projekte

Projects



Im Projekt **OptoGenTech** forscht das Team an „Werkzeugen“ für die Optogenetik, d. h. die optische Stimulierung oder Inhibition der Aktivität biologischer Zellen und selektiver Zellfunktionen. Ziel des Projekts ist die Entwicklung marktreifer, implantierbarer optischer Sonden für eine Vielkanal-Stimulation. Dabei sollen aktive (μ LED-Arrays) und passive Lösungen (an Laserdioden gekoppelte, biokompatible Wellenleiter-Arrays) gebaut werden. Für Anwendungen in der Grundlagenforschung sollen zunächst neben den Sonden auch die geeignete Ansteuerungselektronik, die Software und die Infrastruktur für Verhaltensexperimente entwickelt werden. Ein langfristiges Ziel ist das optische Cochlea-Implantat. Das Randbild zeigt das prinzipielle Vorgehen für das avisierte Implantat: Über ein extern angebrachtes Mikrofon mit Frequenzanalyse wird im Innenohr mittels Licht ortsabhängig – und damit tonhöhenabhängig – das Innenohr stimuliert. Deshalb auch die alternative Formulierung des Vorhabens: (besseres) **Hören mit Licht**.



◀ Aufbau einer Ramanmesszelle.
Setup of a Raman measuring cell.

Neueste Entwicklungen des Projekts Patientensicherheit 4.0 am LLG

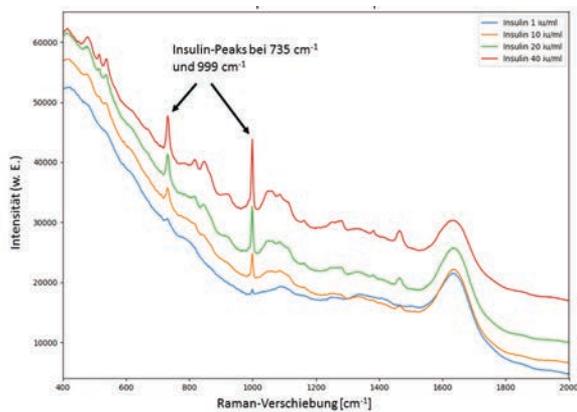
Dieses hauseigene Projekt hat sich in 2017 hervorragend weiterentwickelt – in ständigem Kontakt mit den Partnern bei der Universitätsmedizin Göttingen (UMG) und einem weltweit agierenden Medizintechnikunternehmen. Zum Ende des Jahres wurde ein erstes Funktionsmuster erstellt, das Anfang 2018 in den Räumen der UMG hinsichtlich Funktionalität und Anwenderfreundlichkeit erprobt und untersucht werden soll.

Die Entwicklungsschritte für das Funktionsmuster des geplanten Analyseautomaten waren aufwendiger als ursprünglich gedacht. Der sichere und zuverlässige Nachweis von Medikamenten von Infusionslösungen mit einem universellen Raman-Gerät erfordert eine sehr empfindliche Detektionseinheit und eine aufwendige Probengeometrie – eine Aufgabe, die z.B. überhaupt nicht von derzeit am Markt verfügbaren und preiswerten "handheld"-Geräten geleistet werden kann. In einer weiteren Abbildung sind Spektren von Insulinproben zu sehen. Nach der klinischen Erprobung des bisher entwickelten Funktionsmusters ist als nächster Schritt der Aufbau eines marktfähigen Prototyps vorgesehen, der die Messung in einer gemeinsamen Durchflusszelle mittels Raman-Technik und Refraktometrie erlauben wird.

Projekte

Projects

In the **OptoGenTech** project, the team is researching on tools for optogenetics, i.e. optical stimulation or inhibition of the activity of biological cells and selective cell functions. The aim of the project is to develop market-ready implantable optical probes for a multichannel stimulation. Active (μ LED arrays) and passive solutions (biocompatible waveguide arrays coupled to laser diodes) will be built for this. In addition to the probes, appropriate control electronics, software, and infrastructure for behavioral experiments also first need to be developed for applications in basic research. The cochlear implant is a long-term goal. The border image shows the primary procedure for the planned cochlear implant. Using an externally mounted microphone with frequency analysis, the inner ear is stimulated by means of light depending on the location, and thus also on the pitch. Hence, the alternative formulation of the project: (better) **Hearing with Light**.



◀ Ramanspektren von
Insulinproben.
Raman spectra of
Insulin samples.

Latest developments from the Patient Safety 4.0 project at LLG

This internal project made excellent progress in 2017, in constant contact with partners at the University Medical Center Göttingen (UMG) and a global medical technology company. At the end of the year, an initial functional model was developed, which is to be tested and examined with regard to its functionality and ease of use in the facilities of UMG at the beginning of 2018.

The development steps for the functional model of the planned analysis machines were more complex than originally thought. The safe, reliable detection of medications from infusion solutions using a universal Raman device requires a very sensitive detection unit and a complex sample geometry. This is something that cannot be performed at all using the inexpensive "handheld" devices currently available on the market. After clinical testing of the functional model developed to date, the next step is to develop a marketable prototype that will enable measurement in a common flow cell by means of Raman technology and refractometry.

Projekte

Projects

Projekt Holo-Mark II:

Holographische Lasermarkierung zur fälschungssicheren, großflächigen Beschriftung metallischer Werkstücke, gefördert vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (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)

Projekt Laser-Implant:

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

Projekt Paladin:

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

Projekt GlaSiDeE:

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

Projekt RaCoLas:

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

Projekt NEXLab:

NEXAFS-Laborspektrometer mit Picosekunden-Strahlquelle zur Werkstoff- und Substanz-Analytik, gefördert vom BMWi (ZIM)

Projekt FIHSIW:

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

Projekt PPA-KISS:

Kombination von Ionenmobilitäts- und SERS-Spektrometrie, gefördert vom BMWi

Projekte

Projects

Projekt VAMINAP:

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

Projekt COCO-Sense:

Kombinierter optischer CO/CO₂/O₂ Sensor zur Überwachung von Abgaszusammensetzungen nach 1. Bundes-Immissionsschutzverordnung, gefördert vom BMWi

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

Projekt SFB 755 C04:

Soft X-ray spectro-microscopy with a lab-scale source, gefördert im Rahmen des SFB755 Nanoscale Photonic Imaging

Projekt SFB 755 C08:

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

Projekt WeKokUBS:

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

Projekt OMeGa-E:

Optische Messung der Gemischbildung am Erdgasmotor, gefördert vom BMBF

Projekt: UV-Femtosekunden - Nanostrukturierung

Erzeugung von Nanostrukturen an Metall- und Halbleiteroberflächen mit Hilfe von UV-Femtosekundenlaserpulsen: Experiment und Theorie, gefördert von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG)

Projekt SIMAC:

Entwicklung eines flächenverlust-freien Verfahrens zur Markierung der Kristallorientierung von Halbleiterwafern, gefördert vom BMWi (ZIM)

Projekte

Projects

Projekt SIMAC:

Entwicklung eines flächenverlust-freien Verfahrens zur Markierung der Kristallorientierung von Halbleiterwafern, gefördert vom BMWi (ZIM)

Projekt NANOPOL:

Polarisationsempfindlicher Wellenfrontsenor auf Basis von Nano-Gittern zur Charakterisierung thermischer Aberration in Hochleistungs-Laseroptiken, gefördert vom BMBF

Teilprojekt SFB 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

Projekt CNMPB A1:

Nanoscale Imaging, 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 PerfectSTED:

STED-Mikroskop mit aktiver Aberrationskorrektur & automatischer Justage (perfectSTED), gefördert im Rahmen des Programms ZIM

Projekt Nanointeraction:

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

Patente

Patents

Angemeldete Patente / Patents pending

J. Ihlemann, J. Meinertz, H. Stark:

Vorrichtung und Verfahren zur ablativen Herstellung einer periodischen
Linienstruktur an einem Werkstück

WO 2017/032818 A1

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

Verfahren zur lokalen Modifikation eines Substrats

DE 10 2016 007 736 A1

Erteilte Patente / Patents granted

J. Ihlemann, R. Weichenhain-Schriever:

Verfahren zur Herstellung einer Überwölbten Mikrostruktur

EP 2857138 B1

P. Simon, J. Ihlemann, G. Marowsky:

Beleuchtungsanordnung und Verfahren zur räumlich periodischen
Musterung einer Oberfläche

DE 102016104331 B3

Publikationen

Publications

N. Wang, T. Fricke-Begemann, P. Peretzki, K. Thiel, J. Ihlemann, M. Seibt:
Microstructural analysis of the modifications in substrate-bound silicon-rich silicon oxide induced by continuous wave laser irradiation, *Journal of Alloys and Compounds* 707, 227 (2017)

M. Heinz, M. Dubiel, J. Meinertz, J. Ihlemann, A. Hoell:
Investigation of gold and bimetallic gold/silver nanoparticles in soda-lime-silicate glasses formed by means of excimer laser irradiation, *Proc. SPIE* 10093, 100930I (2017)

D. S. Ivanov, A. Blumenstein, J. Ihlemann, P. Simon, M. E. Garcia, B. Rethfeld:
Molecular dynamics modeling of periodic nanostructuring of metals with a short UV laser pulse under spatial confinement by a water layer, *Applied Physics A* 123, 744 (2017)

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*, <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.11.122> (2017)

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*, <https://doi.org/10.1088/1361-648X/aa9fcc> (2017)

K. Golibrzuch, F.-E. Digulla, S. Bauke, H. Wackerbarth, O. Thiele, T. Berg:
Optical Sensor System for Time-Resolved Quantification of Methane Densities in Methane-fueled Spark Ignition Engines, *Applied Optics*, 56 (22), 6049-6058, (2017)

J. Barnett, U. Plachetka, C. Nowak, H. Wackerbarth:
Highly periodic Au nano-disc arrays for plasmon-resonant SERS structures on fused silica using UV-NIL based double-layer lift-off process, *Micro-electronic Engineering*, 172, 45-48 (2017)

Publikationen

Publications

S. Bauke, K. Golibrzuch, F. Rotter, H. Wackerbarth, O. Thiele, T. Berg:
Quantitative, time-resolved detection of CH₄ concentrations in flows for injection analysis in CNG engines using IR absorption, *Journal of Sensors and Sensor Systems*, 6(1), 185-198 (2017)

P. Vrba, M. Vrbova, M. Müller, K. Mann, D. Pánek, T. Parkman:
Picosecond Laser Krypton Plasma Emission in Water Window Spectral Range, *Physics of Plasmas* 24 (2017)

M. Stübenvoll, B. Schäfer, K. Mann:
Passive compensation of laser-induced higher-order aberrations in high-power NIR optics, *Optics Express* 25 (21), 25407-25415 (2017)

I. A. Makhotkin, R. Sobierajski, J. Chalupský, K. Tiedtke, G. de Vries, M. Störmer, F. Scholze, F. Siewert, R. W. E. van de Kruijs, I. Milov, E. Louis, I. Jacyna, M. Jurek, D. Klinger, L. Nittler, Y. Syryanyy, L. Juha, V. Hájková, V. Vozda, T. Burian, K. Saksl, B. Faatz, B. Keitel, E. Plönjes, S. Schreiber, S. Toleikis, R. Loch, M. Hermann, S. Strobel, G. Gwalt, H.-K. Nienhuys, T. Mey, H. Enkisch:
Experimental study of EUV-mirror radiation damage resistance under long term FEL exposures below the single shot damage threshold
J. Synchrotron Rad. 25, 77-84 (accepted, 2017)

M. Mehrjoo, K. Giewekemeyer, P. Vagovič, S. Stern, R. Bean, M. Messerschmidt, B. Keitel, E. Plönjes, M. Kuhlmann, T. Mey, E. A. Schneidmiller, M. V. Yurkov, T. Limberg, A. P. Mancuso:
Single-shot determination of focused FEL wave fields using iterative phase retrieval, *Optics Express* 25 (15), 17892-17903 (2017)

L. Shi, B. Iwan, R. Nicolas, Q. Ripault, J.R.C. Andrade, S. Han, H. Kim, W. Boutu, D. Franz, T. Heidenblut, C. Reinhardt, B. Bastiaens, T. Nagy, I. Babushkin, U. Morgner, S. Kim, G. Steinmeyer, H. Merdji, M. Kovacev:
Self-optimization of plasmonic nanoantennas in strong femtosecond fields, *Optica* 4, 1038-1043 (2017)

Konferenzbeiträge

Conference contributions

M. Heinz, M. Dubiel, J. Meinertz, J. Ihlemann, A. Hoell:

Investigation of gold and bimetallic gold/silver nanoparticles in soda-lime-silicate glasses formed by means of excimer laser irradiation, Synthesis and Photonics of Nanoscale Materials XIV, Photonics West San Francisco (01.2017)

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

Wigner distribution measurement of the spatial coherence properties of FLASH, DESY Users' Meeting, Hamburg (01.2017)

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

IsoSTED microscopy in living cells, SFB 755 Winterschool 2017, Hirschegg Kleinwalsertal, Österreich (02.2017)

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

Tomographic STED microscopy, CNMPB-Retreat, Bad Sooden-Allendorf (02.2017)

J. Holburg, M. Müller:

Soft X-ray spectro-microscopy with a lab-scale source, SFB 755 Winter School, Nanoscale Photonic Imaging, Hirschegg, Österreich (02.2017)

M. Müller:

Spectro-microscopy with a compact laser-driven soft X-ray source, SFB 755 Winter School, Nanoscale Photonic Imaging, Hirschegg, Österreich (02.2017)

D. Tasche, C. Gerhard, J. Ihlemann, W. Viöl:

Einfluss des Wasserstoffgehaltes und Stöchiometrieverhältnisses von O und Si auf die Excimerlaserablation von Quarzglas, 18. Fachtagung für Plasmatechnologie PT-18, Göttingen (02.2017)

C. Gobert, N. Wang, T. Fricke-Begemann, J. Ihlemann, M. Seibt:

Micro-Raman spectroscopy of laser-annealed reheated SiO_x films on silica substrate, DPG-Frühjahrstagung, Dresden (03.2017)

P. Simon, A. Blumenstein, F. Kleinwort, J. Ihlemann, B. Rethfeld,

D. S. Ivanov, M. E. Garcia:

Nano-structure formation on gold and silicon surfaces by laser irradiation, FemtoMat 2017, Mauterndorf, Austria (invited talk) (03.2017)

M. Heinz, M. Dubiel, L. Avakyan, A. Bugaev, L. Bugaev, J. Ihlemann, J. Meinertz:

ArF-excimer laser irradiation of gold coated float glass - formation and implantation of gold nanoparticles, DPG-Frühjahrstagung, Dresden (03.2017)

Konferenzbeiträge

Conference contributions

I. Makhotkin, K. Tiedtke, M. Störmer, F. Siewert, K. Mann, E. Louis, L. Juha, E. Plönjes-Palm, T. Mey, H. Enkisch:

Irradiation of EUV-mirrors with multiple FEL pulses below the single shot damage threshold, Damage to VUV, EUV, and X-ray Optics (XDam6), SPIE Conf. Optics + Optoelectronics, Prag (04.2017)

F. Rocca, N. Mazkereth, J. Krüger, C. Geisler, A. Egner, Z. Fishelson:

Two-Color STED microscope for the analysis of stress-induced interaction between mitochondrial chaperone mortalin and the plasma membrane attack complex, Focus on Microscopy 2017, Bordeaux, France (04.2017)

C. Lenth, S. Ritter, A. Schumann, V. Steckel, C. Mai, R. Pérez, G. Legrand:

Formaldehydbestimmung in der Holzwerkstoffproduktion: Überführung einer Labormethode in die Prozessanalytik, ANAKON 2017, Tübingen (04.2017)

J. Krüger, J. Keller-Findeisen, B. Vincon, C. Geisler, A. Egner:

Tomographic STED microscopy, Focus on Microscopy 2017, Bordeaux, France (04.2017)

J. Born, C. Lenth, F. Wieduwilt, M. Liebetrau, S. Steinhauer, G. Pelzer:

Mikroplastikbestimmung: Entwicklung einer Methode zur automatisierten Mikroplastikbestimmung in Klarwasser, ANAKON 2017, Tübingen (04.2017)

H. Wackerbarth:

Optische Spektroskopie für die Proteinanalyse
Niedersächsisches Zentrum für Biomedizintechnik, Implantatforschung und Entwicklung (NIFE) Hannover (04.2017)

F. Boehle, A. Blumenstein, A. Vernier, A. Jullien, M. Kretschmar,

M. Kovacs, R. Romero, H. Crespo, P. Simon, T. Nagy, R. Lopez-Martens:
Relativistic-intensity near-single-cycle pulses from a stretched hollow-fiber compressor at 1kHz, SPIE Optics & Optoelectronics 2017, Prague-Czech Republic, (04.2017)

I. Milov, I. Makhotkin, R. Sobierajski, H. Enkisch, K. Tiedtke,

G. de Vries, F. Scholze, E. Louis, L. Juha, B. Keitel, E. Plönjes-Palm, T. Mey, K. Mann:

Single-shot damage of Ru thin film induced by XUV FEL fs pulses
Damage to VUV, EUV, and X-ray Optics (XDam6), SPIE Conf. Optics + Optoelectronics, Prag (04.2017)

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

Theoretical investigation of periodic nanostructuring mechanism of Au due to UV laser pulse with and without spatial confinement, E-MRS Spring meeting, Strasbourg (05.2017)

Konferenzbeiträge

Conference contributions

F. Boehle, A. Blumenstein, M. Bocoum, A. Vernier, M. Lozano, J.-P. Rousseau, A. Jullien, D. Gustas, D. Guénot, J. Faure, M. Kretschmar, P. Simon, T. Nagy, R. Lopez-Martens:

Relativistic plasma mirrors at 1kHz, TARG3: Targetry for high repetition rate laser-driven sources, Salamanca-Spain, (06.2017)

F. Böhle, M. Bocoum, A. Vernier, M. Lozano, J.-P. Rousseau, A. Jullien, D. Gustas, D. Guénot, J. Faure, M. Kovacs, M. Kretschmar, P. Simon, U. Morgner, T. Nagy, R. Lopez-Martens:

Relativistic-Intensity 1.3 Optical Cycle Laser Pulses at 1kHz from a Stretched Hollow-Core-Fiber Compressor, CLEO Europe 2017, Munich-Germany, (06.2017)

K. Mann:

Absorption und Wellenfrontdeformation in optischen Hochleistungskomponenten, ZIM-Netzwerk-Treffen, Photonische Prozesskette & Industrie 4.0 (OPTILIZE I4.0), (eingel. Vortrag) Fa. Leica / Wetzlar (08.2017)

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

Quantitative absorption data from thermally induced wavefront distortion on UV, Vis, and NIR optics, Laser Damage, XLIX Annual Symposium on Optical Materials for High-Power Lasers, Boulder, Colorado (09.2017)

J. Ihlemann:

Micro- and Nanopatterning of Surfaces by Short and Ultrashort UV Laser Pulses, PhotonicNet-Symposium: Surface Processing, Göttingen (06.2017)

F. Boehle, A. Blumenstein, M. Bocoum, A. Vernier, M. Lozano, J.-P. Rousseau, A. Jullien, D. Gustas, D. Guénot, J. Faure, M. Kovacs, M. Kretschmar, P. Simon, U. Morgner, T. Nagy, R. Lopez-Martens:

Relativistic-intensity 1.3 optical cycle laser pulses at 1kHz from a stretched hollow-fiber compressor, CLEO/QELS 2017, San Jose (CA) USA, (05.2017)

H. Mittelstädt, C. Geisler, A. Egner:

Single marker switching microscope with isotropic resolution over large axial range, SPIE Optics + Photonics, Nanoscience + Engineering, Nanoimaging and Nanospectroscopy V, San Diego, CA, USA (08.2017)

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

Tomographic STED microscopy, SPIE Optics + Photonics, Nanoscience + Engineering, Nanoimaging and Nanospectroscopy V, San Diego, CA, USA (08.2017)

A. Egner:

Optical nanoscopy: Decoding the building blocks of life beyond the diffraction barrier, XXXI. AHMT Symposium 2017, Clausthal-Zellerfeld (09.2017)

Konferenzbeiträge

Conference contributions

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

Nano ridge formation by ultrashort UV laser irradiation of gold, International Conference on Laser Ablation (COLA), Marseille (09.2017)

J. Meinertz, R. Karstens, H. Stark, J. Ihlemann:

Periodic patterning of glass by phase mask projection, International Conference on Laser Ablation (COLA), Marseille (09.2017)

T. Fricke-Begemann, K. Rewerts, N. Wang, P. Peretzki, C. Gobert, M. Seibt, J. Ihlemann:

Laser annealing of SiO_x films for the generation of luminescent silicon nanoclusters and nanocrystals, International Conference on Laser Ablation (COLA) Marseille (09.2017)

F. Boehle, A. Blumenstein, M. Bocoum, A. Vernier, M. Lozano, J.-P. Rousseau, A. Jullien, D. Gustas, D. Guénot, J. Faure, M. Kovacs, M. Kretschmar, P. Simon, U. Morgner, T. Nagy, R. Lopez-Martens: Relativistic-intensity near-single-cycle laser pulses at 1kHz, Ultrafast Optics XI, Jackson Hole (WY) USA, (10.2017)

M. Müller, M. Schellhorn, K. Mann:

Soft X-ray spectro-microscopy with a lab-scale source
Autumn School SFB 755, Göttingen (10.2017)

M. Müller:

Soft X-ray spectroscopy and microscopy using a table-top laser-induced plasma source 304th PTB-Seminar VUV and EUV Metrology, Berlin (10.2017)

J. Ihlemann:

DUV/VUV-Laser-Mikrobearbeitung transparenter Materialien
PhotonicNet Arbeitskreistreffen DUV-VUV, Göttingen (11.2017)

A. Egner:

Optical nanoscopy and statistics: Towards the optimum resolution, Statistics Meets Friends – from biophysics to inverse problems and back, Göttingen (11.2017)

A. Egner:

Tomographic STED Microscopy, Forum MikroskopieTrends'17, Göttingen (12.2017)

J. Ihlemann:

UV-Laser-Mikro- und Nanostrukturierung von Glas
Workshop Laserbearbeitung von Glaswerkstoffen, Nürnberg (12.2017)

Abschlussarbeiten

Final Thesis

Daniel Konradt:

Untersuchung der Gemischbildung bei Einspritzung von Methan in Luftströmungen,
Bachelorarbeit, Ostfalia Hochschule für angewandte Wissenschaften, Fakultät Fahrzeugtechnik
(2017)

Florian Wieduwilt:

Aceton, 3-Pentanon und Butanon als Fluoreszenztracer zur Gemischbildungsanalyse in Gasströmungen,
Bachelorarbeit, Georg-August-Universität Göttingen, Fakultät für Chemie
(2017)

Julian Born:

Entwicklung einer chemometrischen Auswertungsmethode für die qualitative und quantitative Bestimmung von unterschiedlichen Mikroplastiken in Klarwasser mittels Raman-Spektroskopie,
Masterarbeit, Hochschule für Angewandte Wissenschaft und Kunst, Fakultät Naturwissenschaften und Technik Göttingen
(2017)

Stephan Bauke:

Konzeption einer Messsonde zur quantitativen, zeitaufgelösten Messung von CNG im Motor mittels IR-Absorption,
Dissertation, Georg-August-Universität Göttingen, Fakultät für Physik
(2017)

David Köhne:

Principles and applications of optical switching assisted imaging and structuring schemes,
Dissertation, Georg-August-Universität Göttingen
(2017)

Jennifer-Rose Krüger:

Tomographic STED microscopy,
Dissertation, Georg-August-Universität Göttingen
(2017)

Ausgewählte Kooperationspartner

Selected Cooperation Partners

International



National



Lokal



Messen und Veranstaltungen

Exhibitions and Events



Dichter Nebel füllte den Raum, nur Lichtpunkte waren zu erkennen. Ein futuristisch leuchtendes Labyrinth hatte das Laser-Laboratorium Göttingen am 21. Januar 2017 zur dritten "Nacht des Wissens" geschaffen.

Im blau beleuchteten Institutsgebäude am Hans-Adolf-Krebs-Weg 1, das schon von weitem zu sehen war, schlängelten sich Besucherinnen und Besucher durch den Laser-Tunnel hindurch. Große und kleine Gäste konnten sich einmal wie Schauspieler in einem Actionfilm fühlen. Diesen Spaß wollte sich keiner entgehen lassen.

Gut besucht waren auch die Führungen durch das Institut. Die Wissenschaftler öffneten ihre Labore und boten der Öffentlichkeit Einblicke in ihre Forschung. Darum geht es bei der "Nacht des Wissens", einem Tag der offenen Tür mit buntem Programm, den Universität und außeruniversitäre Forschungseinrichtungen anbieten.



Interessierte Besucher bei der 3. Nacht des Wissens im Laser-Laboratorium Göttingen.
Interested visitors at the 3. Nacht des Wissens in the Laser Laboratorium Göttingen.

Messen und Veranstaltungen

Exhibitions and Events



Heavy fog filled the room, only points of light were visible. A futuristic glowing labyrinth was created by the Laser Laboratory Göttingen on January 21, 2017 for the third "Night of Knowledge".

In the blue-lit institute building on Hans-Adolf-Krebs-Weg 1, which was visible from far, visitors meandered through the laser tunnel. Young and old guests could for once feel like actors in an action movie. No one wanted to miss this fun.

The guided tours of the institute were also well attended. The scientists opened their laboratories and provided the public with insights into their research. That's what the "Night of Knowledge", an open day with a colorful program, is offered by the university and non-university research institutions.



Interessierte Besucher bei einer Führung durch die Labore des Laser-Laboratoriums Göttingen.

Interested visitors at the 3. Nacht des Wissens in the Laser Laboratorium Göttingen.

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 2017 war eine Gruppe von 12 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 supervisors 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 12 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.



▲
Herr Scholz erklärt einen Versuch mit Flüssigstickstoff.
Mr. Scholz explains an experiment with liquid nitrogen.

Messen und Veranstaltungen

Exhibitions and Events

IdeenExpo 2017

Hinter dem Vorhang ist es dunkel, fast schwarz, Kunstnebel erfüllt das Innere des Tunnels. Zunächst sind an den Wänden nur Lichtpunkte zu sehen, dann werden diese plötzlich durch grüne Strahlen miteinander verbunden. Wie aus dem Nichts entsteht ein leuchtendes, futuristisch anmutendes Labyrinth, durch das sich der Besucher nun unter Zeitdruck hindurchschlängeln muss. Dabei ist Geschicklichkeit gefragt, denn berührt man eine der Lichtschranken, wird ein Alarm ausgelöst.

Der Lasertunnel „Mission Possible“, mit dem sich das Laser-Laboratorium Göttingen vom 10. bis 18. Juni 2017 auf der IdeenExpo in Hannover einem vorwiegend jungen Publikum präsentierte, war ein durchschlagender Erfolg und eine Wissenschaftsattraktion mit Spaßfaktor. Mehr als 8.000 Messebesucher versuchten ihr Glück auf dem Hindernisparcours und informierten sich nebenbei über die Arbeit des LLG.

Die IdeenExpo fand 2017 zum sechsten Mal statt und hat es sich zum Ziel gesetzt, junge Menschen für die Welt der Naturwissenschaften und der Technik zu begeistern. Mission possible? Mission erfüllt!



▲ Interessierter Schüler beim Parcours durch den Laser Tunnel.
Interested student at the parcour through the laser tunnel.

Messen und Veranstaltungen

Exhibitions and Events

IdeenExpo 2017

Behind the curtain it is dark – almost black – and artificial fog fills the interior of the tunnel. Initially, only points of light on the walls can be seen, which are suddenly connected by green rays. A glowing, futuristic maze is created out of nowhere, through which the visitor is forced to weave under time pressure. Skill is required for this, because if one of the light beams is touched, an alarm is triggered.

The "Mission Possible" laser tunnel, which the Laser Laboratorium Göttingen presented to a predominantly young audience at the IdeenExpo in Hanover on 10 to 18 June 2017, was a resounding success and a science attraction with a fun factor. More than 8,000 visitors tried their luck on the obstacle course, and discovered the work of LLG.

The IdeenExpo took place in 2017 for the sixth time and has set itself the goal of attracting young people to the world of science and technology. Mission possible? Mission accomplished!



▲
Mitarbeiter des Laser-Laboratorium Göttingen auf der Ideenexpo 2017.
Staff members of the Laser Labortorium Göttingen on the Ideenexpo 2017.

Messen und Veranstaltungen

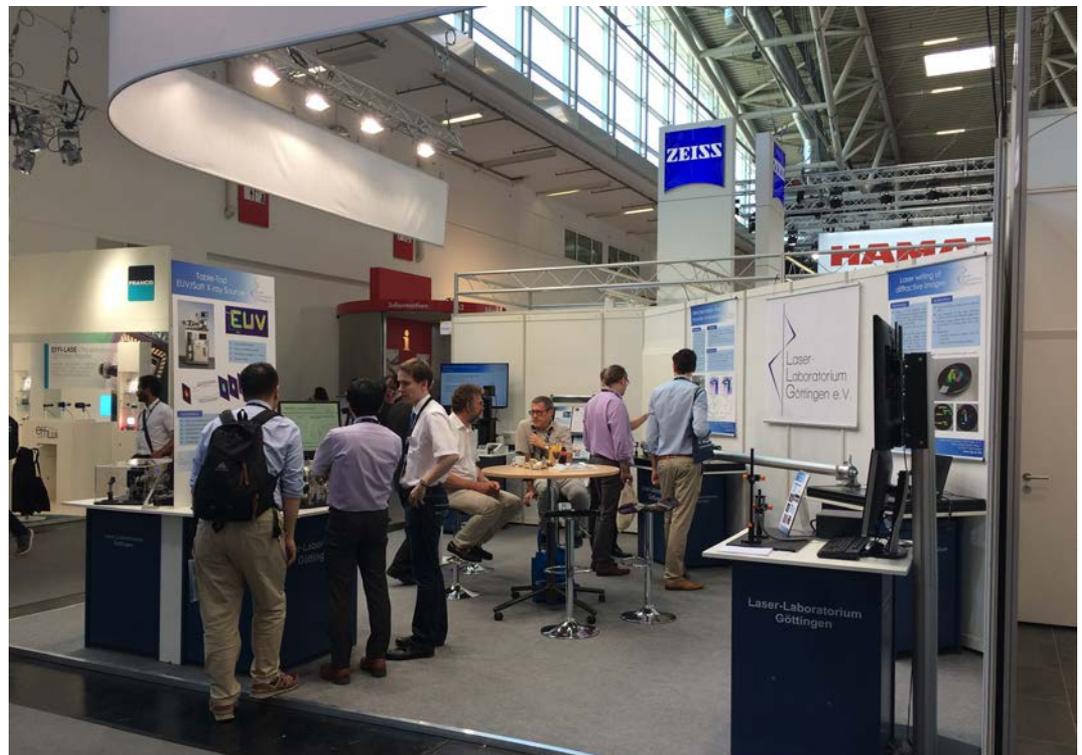
Exhibitions and Events



Laser World of Photonics

Die größte Messe auf dem Gebiet der Photonik zog wie in jedem Jahr tausende Besucher an. Die Messe gilt als weltweiter Treffpunkt für Wissenschaftler und Experten aus Betrieben und Instituten der Laser- und Optik-Branche. In fünf Hallen wurden die neuesten Produkte und Ideen aus vielen Bereichen der Biophotonik, Laserfertigung und den Life-Sciences vorgestellt.

Das Laser-Laboratorium zeigte das vielseitige Spektrum seiner Forschungskompetenzen und präsentierte Innovationen auf dem Gebiet der Laserforschung und -anwendung. Die Exponate deckten einen breiten Themenbereich ab, der die Erzeugung, die Charakterisierung und die Anwendung von Laserstrahlung umfasste. Unter anderem wurden die Erzeugung ultrakurzer fs-Laserpulse mit einer einzigartigen Anordnung von Hohlwellenleitern sowie die Strahlcharakterisierung in Quasi-Echtzeit und in hoher räumlicher Auflösung gezeigt. Anwendungsbeispiele von Laserlicht umfassten die höchstauflösende Mikroskopie jenseits der Beugungsgrenze, den Nachweis geringster Mengen organischer Substanzen in Wasser und ein neuartiges Verfahren zur diffraktiven Markierung beliebiger Materialien, welches sich aufgrund seiner Flexibilität und Geschwindigkeit auch für das industrielle Umfeld eignet.



▲ Teilnehmer und Betreuer am Stand des Laser-Laboratoriums Göttingen.
A visitor and staff member at the Stand of Laser Laboratorium Göttingen.

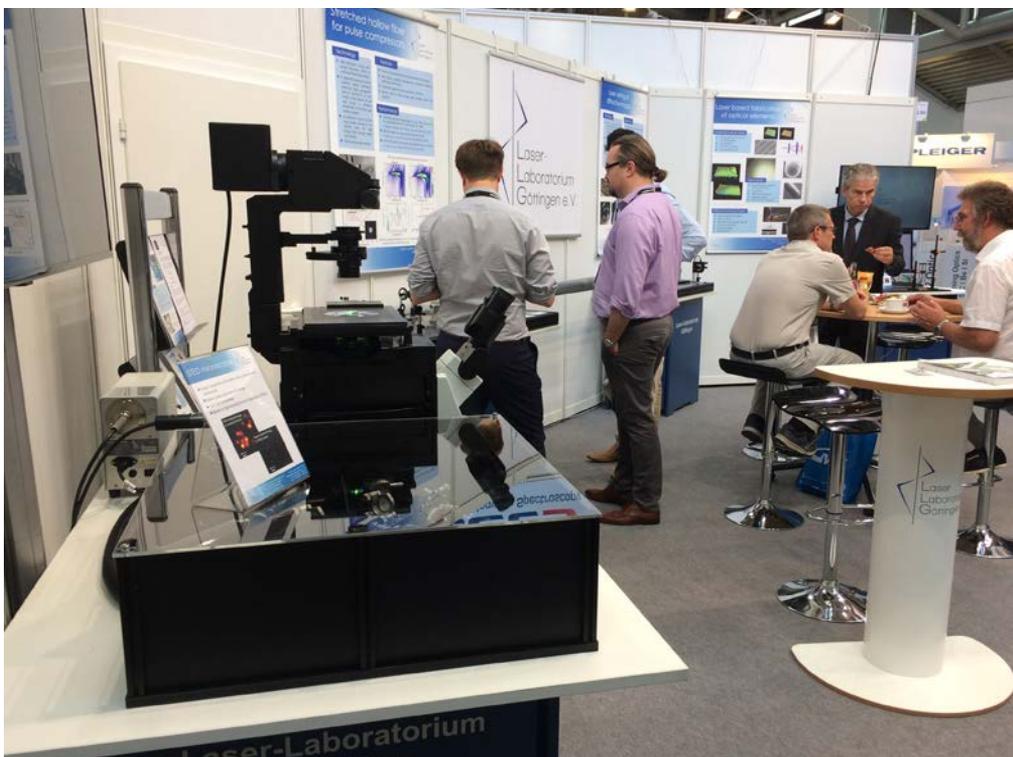
Messen und Veranstaltungen

Exhibitions and Events

Laser World of Photonics

The biggest exhibition in the field of photonics again attracted thousands of visitors. The exhibition is a meeting point for scientists and experts from all over the world with a special focus on optics and photonics. In five large exhibition halls, the newest products and ideas in the fields of biophotonics, laser manufacturing and life sciences were presented.

The laser laboratory showed its wide range of expertise and presented innovations in the field of laser research and laser application. Its exhibits spanned a broad range of topics including the generation, characterisation and application of laser light. The generation of ultrashort fs-pulses with a unique arrangement of hollow waveguides was presented as well as the wavefront characterisation in quasi real-time and with high spatial resolution. Applications of laser light included super-resolution microscopy beyond the diffraction limit, detection of trace amounts of organic substances in water and a novel method for diffractive marking of arbitrary materials, which is also suited for industrial applications due to its flexibility and speed.



▲
Team des LLG auf der Laser World of Photonic.
Team of the LLG of the Laser World of Photonics.

Messen und Veranstaltungen

Exhibitions and Events

Besuch vom Goethe Institut

Ein natur- oder ingenieurwissenschaftliches Studium in Deutschland – dies ist das erklärte Ziel von 23 Jugendlichen aus Osteuropa, die sich am 6. Juli in Göttingen aufhielten.

Sie lernten Deutsch am Goethe-Institut und erkundeten den Technikstandort Göttingen sowie Wissenschaftseinrichtungen in der Region. Die Schülerinnen und Schüler aus Russland, Weißrussland, Armenien, Georgien, Tadschikistan, Kasachstan und der Ukraine im Alter von 14 bis 17 Jahren konnten im Laser-Laboratorium Göttingen zusammen mit ihren Lehrern erste Eindrücke von komplexen optischen Apparaturen und von praktischen Laseranwendungen gewinnen. Hochauflösende Mikroskopie, extremes Ultraviolett, Spurenanalytik und die Laserbeschriftung von Oberflächen mit schillernden Mustern standen auf dem Programm.



Dr. Markus Muchow gibt Einblicke in die neusten Entwicklungen der EUV Technologie.
Dr. Markus Muchow gives insight in latest developments in EUV technologies.

Messen und Veranstaltungen

Exhibitions and Events

Visit from the Goethe Institut

Studying science or engineering in Germany - this is the goal of 23 young people from Eastern Europe who are currently at the 6 of July in Göttingen have set themselves.

They learned German at the Goethe-Institut and explored. Göttingen, a city known for technology, as well as scientific institutions in the region. The students from Russia, Belarus, Armenia, Georgia, Tajikistan, Kazakhstan and Ukraine aged 14 to 17 were able to gain first impressions of complex optical equipment and practical laser applications together with their teachers at Laser-Laboratorium Göttingen. High-resolution microscopy, extreme ultraviolet, trace analysis and laser marking of surfaces with dazzling patterns were part of the programme.



▲
Christian Niklas erklärt nicht-dispersive Infrarotspektroskopie für die Bestimmung des Treibhausgases Kohlendioxid.
Christian Niklas explains non-dispersive infrared spectroscopy for the determination of the greenhouse gas carbon dioxide.

Messen und Veranstaltungen

Exhibitions and Events

XLAB International Science Camp

14 Teilnehmerinnen und Teilnehmer des XLAB International Science Camp besuchten am 16. August 2017 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 präsentierte.

Im Anschluss haben die Schülerinnen und Schüler im Alter von 16 bis 18 Jahren im Rahmen einer ausführlichen Führung durch das Institut spannende Eindrücke von komplexen Messaufbauten und praktischen Laseranwendungen gewonnen.

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.



▲ Teilnehmer des XLAB International Science Camp im Laser-Laboratorium Göttingen.
Visitors from the XLAB International Science Camp at the Laser Laboratory Göttingen.

Messen und Veranstaltungen

Exhibitions and Events

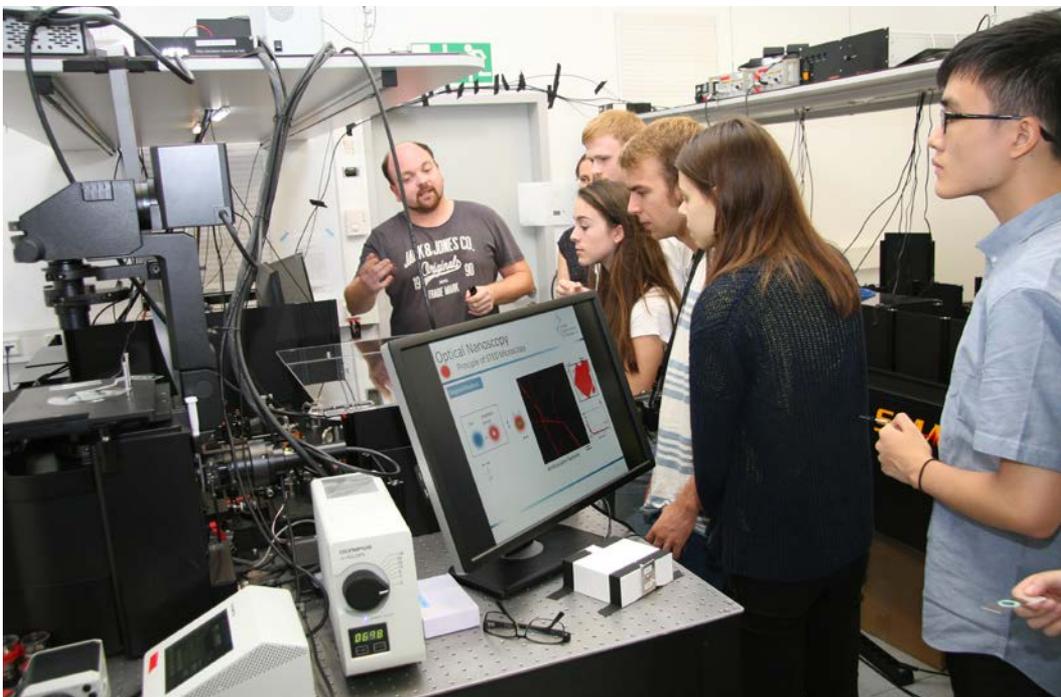
XLAB International Science Camp

14 participants of the XLAB International Science Camp visited the LLG on 16 August 2017

The international group was welcomed by Matthias Müller, who first presented the institute in a lecture and gave an overview of the wide-ranging applications of laser radiation.

Afterwards, pupils aged 16 to 18 gained exciting impressions of complex measurement set-ups and practical laser applications as part of a detailed tour of the institute.

It was clearly demonstrated how super-resolution fluorescence microscopy (STED) works, what significance extreme ultraviolet radiation has for the future production of smartphones, tablets and computers, how microplastics can be detected efficiently and reliably in the ocean and how laser-machining of surfaces succeeds in the forgery-proof marking of original parts .



▲ Explanation and demonstration of super-resolution microscopy (STED) to the Science Camp participants.

Erklärung und Demonstration hochauflösender Mikroskopie (STED) für die Teilnehmer des Science Camps.

Messen und Veranstaltungen

Exhibitions and Events

Schülerbesuch aus der Ukraine

Zehn Schülerinnen und Schüler aus der Ukraine besuchten zusammen mit ihrer Lehrerin Ende November das Laser-Laboratorium Göttingen (LLG). Sie erweiterten ihre Deutschkenntnisse am Goethe-Institut und erkundeten wissenschaftliche und technische Einrichtungen in Göttingen und Umgebung. Ihr Ziel ist es, nach dem Schulabschluss zum Studium wieder nach Deutschland zu kommen. Für manche ist das Studienfach schon klar (z. B. Informatik), andere haben sich noch nicht festgelegt. Auf dem Besichtigungsprogramm im LLG standen hochauflösende Mikroskopie, extremes Ultraviolett, Gasanalytik und die Laserbeschriftung von Oberflächen. Trotz der dargestellten komplexen Zusammenhänge bekundeten die Schülerinnen und Schüler hinterher, das meiste gut verstanden zu haben.



Eine Schülergruppe informiert sich über die Forschungsgebiete des Laser-Laboratorium Göttingen.
A visitor and staff member at the Stand of Laser Laboratorium Göttingen.

Messen und Veranstaltungen

Exhibitions and Events

Pupil visit from Ukraine

Ten pupils from Ukraine and their teacher visited the Laser-Laboratorium Göttingen (LLG) at the end of November. They were improving their German language skills at the Goethe-Institut and are exploring scientific and technical facilities in and around Göttingen. Their goal is to return to Germany to study after finishing school. For some, their subject of choice is already clear (for example, computer science), others have not yet decided. The programme of the visit to LLG included high-resolution microscopy, extreme ultraviolet, gas analysis and the laser marking of surfaces. Despite the complex interrelations presented, the pupils stated afterwards that they had understood most of them well.



Eine Schülergruppe schaut sich Exponate zur diffraktiven Laserbeschriftung von Oberflächen an.
A group of students looks at exhibits for the diffractive laser marking of surfaces.

