

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)

Jahresbericht 2016

Redaktion: PD Dr. Alexander Egner

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

Koordination/Gestaltung und Layout: Tatjana Kasten

Bei Abdruck ist die Einwilligung der Redaktion erforderlich.

Inhaltsverzeichnis

Contens

Inhalt

Vorwort	4
Das Institut im Profil	8
Institutsstruktur	9
Vorstand und Kuratorium	10
Das Institut in Zahlen	12
Die Abteilungen	14
Optische Nanoskopie	17
Kurze Pulse/Nanostrukturen	35
Optik/Kurze Wellenlängen	53
Photonische Sensorik	69
Projekte	80
Patente	91
Publikationen	92
Konferenzbeiträge	94
Buchbeiträge	99
Abschlussarbeiten	100
Ausgewählte Kooperationspartner	101
Messen und Veranstaltungen	102
Pressemitteilungen und Neuigkeiten	108

Contents

Preface	4
The LLG Profile	8
Institute Structure	9
Executive Board and Board of Trustees	10
Statistics of the Institute	12
The Departments	14
Optical Nanoscopy	17
Short Pulses/Nanostructures	35
Optics/Short Wavelengths	53
Photonic Sensor Technologies	69
Projects	80
Patents	91
Publications	92
Conference contributions	94
Book contributions	99
Final Thesis	100
Selected cooperation partners	101
Exhibitions and events	102
Press Releases and news	108

Vorwort

Preface



PD Dr. Alexander Egner
Institutsdirektor

Liebe Leserin, lieber Leser,

als "Erfolgsfaktor der deutschen Wirtschaft" stuft ein aktuelles Dossier des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie den Mittelstand ein. Zu ihm gehören auch 90 Prozent der deutschen Photonik-Unternehmen. Der Mittelstand, so das Dossier, erwirtschaftet mehr als die Hälfte der Wertschöpfung in Deutschland, stellt mehr als 60 Prozent der Arbeitsplätze und mehr als 80 Prozent der betrieblichen Ausbildungsplätze. Zudem bildet er den "wichtigsten Innovations- und Technologie-motor" des Landes. Um ihre Wettbewerbsfähigkeit und Innovationskraft zu stärken, suchen die Unternehmen die Zusammenarbeit mit Wissenschaftseinrichtungen. Sie erzeugen so Wachstum und schaffen oder sichern Arbeitsplätze.

Zu den Forschungsinstituten, die als Mittler zwischen Wirtschaft und Wissenschaft tätig sind, zählt das Laser-Laboratorium Göttingen. Selbst mittelständisch geprägt, haben wir seit unserer Gründung in 1987 auf unterschiedlichen Feldern der angewandten Optik geforscht, industrielle Problemstellungen gelöst und Prototypen erstellt. Wir entwickeln derzeit, unter anderem berührungslos arbeitende Lasermesstechniken, veredeln Produkte mit Lasern oder lösen Fragestellungen der Lebenswissenschaften oder der Medizintechnik.

Um unsere Interessen besser zu vertreten, schlossen wir uns im Februar 2016 der neu gegründeten Industrieforschungsgemeinschaft Konrad Zuse e.V. an. Sie versteht sich als Sprachrohr von derzeit 76 wirtschaftsnah aufgestellten Instituten und setzt sich nicht zuletzt für eine kontinuierliche und verlässliche Förderung transferorientierter Forschung ein. Wie der Transfer gelingen kann, zeigten mehr als 60 Aussteller, darunter das Laser-Laboratorium, im Juni 2016 bei einer Leistungsschau der Zuse-Gemeinschaft in Berlin. Zahlreiche Besucher informierten sich dort über "Forschung die ankommt".

Eine wichtige Rolle bei der Organisation und der Finanzierung des Wissenstransfers spielt das Zentrale Innovationsprogramm Mittelstand (ZIM) des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie. Das Laser-Laboratorium beteiligte sich 2016 an vier ZIM-Netzwerken und führte sechs ZIM-Projekte durch. Beim Innovationstag Mittelstand im Mai vergangenen Jahres gehörten wir mit zwei unserer Projekte zu den mehr als 300 Ausstellern.

Darüber hinaus stellte das Laser-Laboratorium seine wissenschaftliche Exzellenz in zahlreichen weiteren Forschungsprojekten unter Beweis. Unter anderem im Rahmen von Sonderforschungsbereichen und Exzellenzclustern mit Partnern des Göttingen Campus.

Vorwort

Preface

Dear Reader,

A recent dossier by Germany's Federal Ministry for Economic Affairs and Energy describes small and medium-sized enterprises (SMEs) as a "success factor for the German economy". 90 per cent of German photonic companies are SMEs. According to the dossier, small and medium-sized businesses generate more than half of the national gross product in Germany as well as providing over 60 per cent of jobs and more than 80 per cent of the in-company vocational traineeships. In addition to this, they are the "most important motor of innovation and technology" in the country. To strengthen their competitiveness and innovativeness, the companies seek to collaborate with scientific institutions. This enables them to generate growth and create or safeguard jobs.

One of the research institutions which is an intermediary between science and business is the Laser-Laboratorium Göttingen. An SME ourselves, we have performed research in different fields of applied optics, solved industrial problems and produced prototypes ever since our establishment in 1987. Amongst other things, we are currently developing contact-free laser measuring technology, refining products with lasers, and addressing questions arising in the life sciences or medical technology.

We joined the newly established industrial research association Konrad Zuse e.V. in February 2016 for better the representation of our interests. The association is a mouthpiece for its currently 76 application-oriented member institutes – and is committed to issues such as continuous and reliable funding for transferable research. In June 2016, more than 60 exhibitors including the Laser-Laboratorium showed how this transfer can take place at the Zuse community presentation in Berlin. Numerous visitors attended the show to find out more about "research that makes a difference".

The Central Innovation Programme for SMEs (Zentrale Innovationsprogramm Mittelstand or ZIM) run by the Federal Ministry for Economic Affairs and Energy plays an important role in organizing and financing knowledge transfer. The Laser-Laboratorium participated in four ZIM networks and carried out six ZIM projects in 2016. We were among the more than 300 exhibitors at the SME Innovation Day last May, where we presented two of our projects.

In addition to this, the Laser-Laboratorium proved its scientific excellence in numerous other research projects, for example by performing research in special areas and excellence clusters with partners from the Göttingen Campus.

Vorwort

Preface

Zum Technologietransfer gehören auch Ausgründungen. Der vom Laser-Laboratorium mitbegründete Photonik Inkubator, der seinen Sitz in unserem Technologiezentrum hat, unterstützt gründungswillige Forscher dabei, vielversprechende Ideen zu marktreifen Produkten weiterzuentwickeln. Die Teams erarbeiten zudem ein tragfähiges, unternehmerisches Konzept. Das erste Projekt hat der Inkubator 2016 erfolgreich abgeschlossen und vier weitere Projekte zur Inkubation aufgenommen. Unter ihnen befindet sich das Vorhaben "Patientensicherheit 4.0" des Laser-Laboratoriums. Die Forschergruppe wird den Prototypen eines Messsystems entwickeln, das auf Intensivstationen Infusionen vor der Verabreichung kontrolliert und hilft Behandlungsfehler im hektischen Klinikalltag zu vermeiden.

Für unsere regionalen und nationalen Industriepartner, führte das Laser-Laboratorium im vergangenen Jahr zahlreiche Veranstaltungen durch. So befasste sich beispielsweise ein Seminar, das wir gemeinsam, mit dem in Göttingen ansässigen Netzwerk für Produkt- und Prozesssicherheit mittels spektroskopischer Analytik ausrichteten, mit der Finanzierung von Unternehmen. Weitere Beispiele sind zwei Workshops die wir gemeinsam mit dem PhotonicNet durchführten. Einmal ging es um Laserstrahlausbreitung durch Hochleistungsoptiken, das andere Mal um Mikroskopietrends.

Wir freuen uns, dass wir schon seit Jahren von einer nachhaltig positiven Geschäftsentwicklung berichten können. Mit einer Drittmittelquote von 70 Prozent setzte das LLG diesen Trend fort und erreichte nach dem Rekordjahr 2015 das zweitbeste Ergebnis der Institutsgeschichte.

All das wäre ohne das Engagement und den Ideenreichtum unserer qualifizierten Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter nicht möglich gewesen. Ihnen gilt mein herzlichster Dank.

Der vorliegende Jahresbericht vermag hoffentlich, Ihnen einen Einblick in unsere Forschungskompetenz zu geben. Sollten Sie in Ihrem Unternehmen vor anspruchsvollen Problemstellungen stehen, die einen Einsatz modernster optischer Technologien erfordern, würden wir uns freuen, Ihnen als Geschäfts- beziehungsweise Kooperationspartner fachlich zur Seite stehen zu dürfen und gemeinsame Lösungen auf dem höchsten Niveau aktueller Forschung zu entwickeln.

Ich wünsche Ihnen viel Freude bei der Lektüre!

Ihr



Vorwort

Preface

Spin-offs play an important role in transferring technology. The Photonik Inkubator, which was co-founded by the Laser-Laboratorium and is based at our technology centre, helps business-minded researchers to further develop promising ideas into marketable products. The teams also draw up a workable business concept. The incubator successfully completed its first project in 2016 and accepted four further projects into its incubation programme. They include the Laser-Laboratorium's "Patientensicherheit 4.0" (Patient Safety 4.0) initiative. The group of researchers will develop the prototype of a measuring system which checks drips in intensive care units before they are administered and helps to prevent treatment errors in hectic healthcare day to day surroundings.

The Laser-Laboratorium organised numerous events for our regional and national industry partners last year. For example, one seminar which we organized in conjunction with the Göttingen-based innovation network for "product and process safety by means of spectroscopic analysis" was dedicated to business funding. Other examples include two workshops we conducted with the PhotonicNet. One focused on the spreading of laser beams upon passage through high-performance lenses while the other looked at trends in microscopy.

We are delighted that we have been able to report consistent positive business developments for a number of years. The LLG continued this trend with an external funding rate of 70 per cent and posted its second-best result in the institute's history after the record-breaking performance in 2015.

None of this would have been possible without the dedication and inventiveness of our skilled employees, thank them wholeheartedly.

I hope that this annual report will give you an insight into our research expertise. Should you face complex problems at your company which require the use of state-of-the-art optical technologies, we would be delighted to have the opportunity to support you as a business or cooperation partner. We look forward to the chance to jointly develop solutions at the cutting edge of research.

I wish you much pleasure reading this reports!

Yours



Das Institut im Profil

The LLG Profile

Der Laser-Laboratorium Göttingen e.V. ist seit der Gründung des Trägervereins im Jahr 1987 eine vom Land Niedersachsen institutionell geförderte Forschungseinrichtung.

Derzeit gliedert sich das Institut in die Abteilungen Optische Nanoskopie, Kurze Pulse / Nanostrukturen, Optik / Kurze Wellenlängen, und Photonische Sensorik. Diese Abteilungen haben mit ihren Forschungsprojekten und Entwicklungen auf unterschiedlichen Feldern der Laserphysik, Lasermesstechnik und Laseranwendung weltweite Anerkennung erlangt. Diese findet ihren Ausdruck in zahlreichen internationalen Kooperationen und Entwicklungsaufträgen.

Zudem werden Synergien zwischen den Universitäten und Fachhochschulen, den Instituten der Max-Planck-Gesellschaft und der regional ansässigen feinmechanisch-optischen Industrie entwickelt. Die Forschungsaktivitäten reichen von der Entwicklung von berührungslos arbeitenden Lasermesstechniken für umweltrelevante Bereiche über Produktveredelung und Herstellung neuer Produkte unter Verwendung von Lasern bis zur Entwicklung neuer Lasersysteme. Forschungs- und Entwicklungsergebnisse werden von lokalen Firmen vermarktet oder in Lizenz vertrieben.

The Laser-Laboratorium Göttingen is since the founding of LLG e.V. in 1987 a non-profit special-purpose enterprise which is institutionally supported by the State of Lower Saxony, Germany.

The institute currently has four scientific departments: Optical Nanoscopy, Short Pulses / Nanostructures, Ultrashortpulse-Photonics, Optics / Short Wavelengths and Photonic Sensor Technologies. They have gained worldwide reputation for research and development in the fields of laser physics, laser measurement techniques and use of lasers. This reputation is reflected in a multitude of international cooperations and development orders.

Synergies between the universities, the institutes of the Max Planck Society and the regional precision mechanics and optics industries have developed. The research activities range from the development of contact-free laser measurement techniques used for environment relevant areas to product processing, as well as the manufacturing of new products using laser radiation and the development of new laser systems. The research and development results are commercialized by local companies or distributed under a licensing agreement.

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

Das Institut im Profil

The LLG Profile

Vorstand

Prof. Dr. Jürgen Troe

Vorsitzender

Niedersachsenprofessor, emeritierter Professor für physikalische Chemie an der Georg-August-Universität Göttingen und am Max-Planck-Institut für biophysikalische Chemie

Dr. Bernd Stoffregen

Vorstandsmitglied, Schatzmeister

Prof. Dr. Stefan Hell

Vorstandsmitglied

Direktor am Max-Planck-Institut für biophysikalische Chemie in Göttingen

Prof. Dr. Claus Ropers

Vorstandsmitglied

Professor am IV. Physikalischen Institut der Georg-August-Universität Göttingen

Executive Board

Prof. Dr. Jürgen Troe

Chairman

Lower Saxony Professor, emeritus Professor of physical Chemistry at the Georg August University of Göttingen and at the Max Planck Institute for biophysical Chemistry

Dr. Bernd Stoffregen

Board Member, Treasurer

Prof. Dr. Stefan Hell

Board Member

Director at the Max Planck Institute for biophysical Chemistry in Göttingen

Prof. Dr. Claus Ropers

Board Member

Professor of the 4th Physical Institute of the Georg August University of Göttingen

Das Institut im Profil

The LLG Profile

Kuratorium

Prof. Dr. Philippe Bastiaens

Max-Planck-Institut für molekulare Physiologie,
Dortmund

Prof. Dr. Thomas Elsässer

Max-Born-Institut für Nichtlineare Optik,
Berlin

Dr. Dietmar Gnass

Polytec GmbH, Waldbronn

Prof. Dr. Andrea Koch

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

Prof. Dr. Peter Loosen

Fraunhofer Institut für Lasertechnik,
Aachen

Prof. Dr. Tim Salditt

Georg-August-Universität, Institut für Röntgen-
physik, Göttingen

Prof. Dr. Eva-Maria Neher

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

Board of Trustees

Prof. Dr. Philippe Bastiaens

Max Planck Institute for Molecular Physiology,
Dortmund

Prof. Dr. Thomas Elsässer

Max Born Institute for Nonlinear Optics
and Short Time Spectroscopy, Berlin

Dr. Dietmar Gnass

Polytec GmbH, Waldbronn

Prof. Dr. Andrea Koch

HAWK University of Applied Science and Arts,
Hildesheim/Holzminden/Göttingen

Prof. Dr. Peter Loosen

Fraunhofer Institute for Laser Technology,
Aachen

Prof. Dr. Tim Salditt

Georg August University, Institute
for X-ray Physics, Göttingen

Prof. Dr. Eva-Maria Neher

XLAB Göttingen Experimental Laboratory
for young people e.V., Göttingen

Das Institut in Zahlen

Statistics of the Institute

Wirtschaftliche Entwicklung

Das Laser-Laboratorium Göttingen (LLG) 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 2016 im erfreulichen positiven Trend der vergangenen Jahre fortgesetzt.

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

Im Durchschnitt des Jahres 2016 beschäftigte das Laser-Laboratorium Göttingen 54 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter, davon einen überwiegenden Teil in zeitlich befristeten Ausbildungs- und Arbeitsverhältnissen.

Aufgrund der engen Vernetzung mit kleinen und mittelständischen Unternehmen, bis hin zu Großkonzernen bieten sich allen Institutsangestellten als hochqualifizierte Fachkräfte hervorragende Chancen am Arbeitsmarkt. So sind bisher 99 Prozent im Anschluss an ihre Mitarbeit am LLG sofort in verantwortungsvolle neue Anstellungen gewechselt.

Ausbildung

Über 180 am LLG erworbene wissenschaftliche Abschlüsse belegen die hervorragende Einbindung des Instituts in die Hochschullandschaft am Standort Göttingen. In der Ausbildung von Bachelor- und Masterstudenten sowie Doktoranden arbeitet das LLG eng mit der Georg-August-Universität Göttingen und 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 ausgerüsteten Werkstätten für die Bereiche Mechanik, Elektronik und Optik gut geschultes technisches Personal sowie eine serviceorientierte Verwaltung zur Seite.

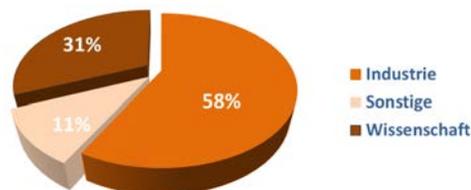


Birgit Sterr
Verwaltungsleiterin

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

Mitarbeiter Staff members

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

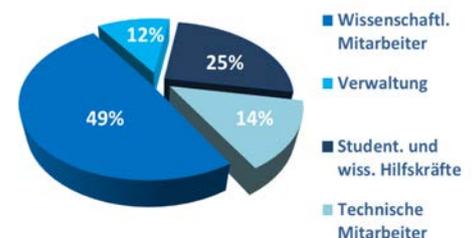


Anschlussbeschäftigungen



Anschlussbeschäftigungen unserer Mitarbeiter (Wissenstransfer).

Employment sector of our former members (knowledge transfer).



Personalstruktur



Personalstruktur in Beschäftigtenkategorien.
Personnel structure in occupational categories.

Das Institut in Zahlen

Statistics of the Institute

Economic development

The Laser Laboratory Göttingen, as an institute for application oriented basic research, is since 1987 an important partner in the area of the optical technologies for universities and enterprises. It has continued its commercial development in 2016, in a positive manner as in the previous years.

The LLG receives important basic funding as institutional sponsorship from the Federal State of Lower Saxony. Furthermore, as a world-wide renowned research institution in applied optics, it continuously receives a large share of third party funding for contract research from the industry as well as from projects of the Federal Government and the DFG (German Research Association).

Human Resources Development

On the average the LLG had 54 employees in 2016, most of them in limited training and work contracts.

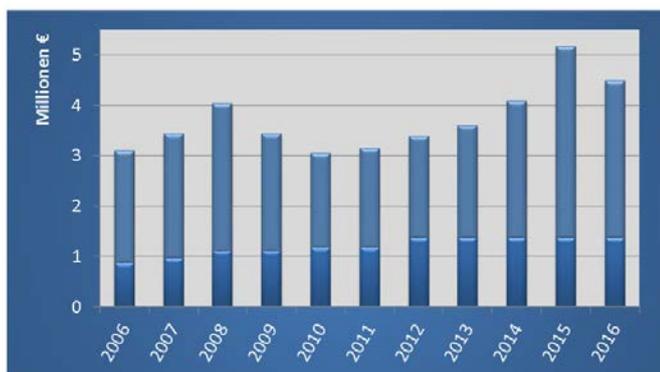
Resulting from the close networking with small and medium sized enterprises as well as conglomerates, there are excellent possibilities for every employee of the institute in the labour market. Until now, 99 % of the employees have found new employment directly after leaving the LLG.

Training

The more than 180 successfully acquired scientific degrees demonstrate the excellent inclusion of the Institute in Göttingen. In the education of Bachelor and Master as well as Ph. D. students, the LLG collaborates closely with the Georg August University, Göttingen and the HAWK (Hochschule für Angewandte Kunst) Hildesheim/Holzminden/Göttingen. Furthermore, it regularly offers insights to modern laser research to trainees.

Infrastructure

For the upkeep of innovative and efficient research, a manifold support is necessary. Therefore there are well equipped mechanics, electronics and optics workshops as well as well-trained technical staff and a service-oriented administration.

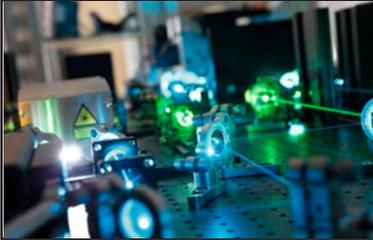


Betriebshaushalt: Grundfinanzierung durch das Land Niedersachsen. Eigene Einnahmen durch Projekte und Industrieaufträge.

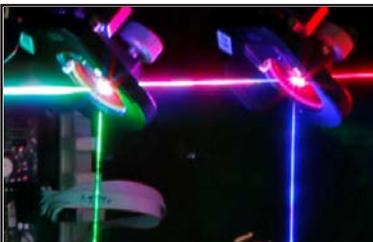
Operating budget: basic funding by the State of Lower Saxony. Own income through projects and industrial contracts.

Die Abteilungen

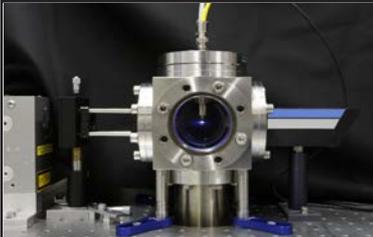
The Departments



Optische Nanoskopie
Optical Nanoscopy



Kurze Pulse / Nanostrukturen
Short Pulses / Nanostructures

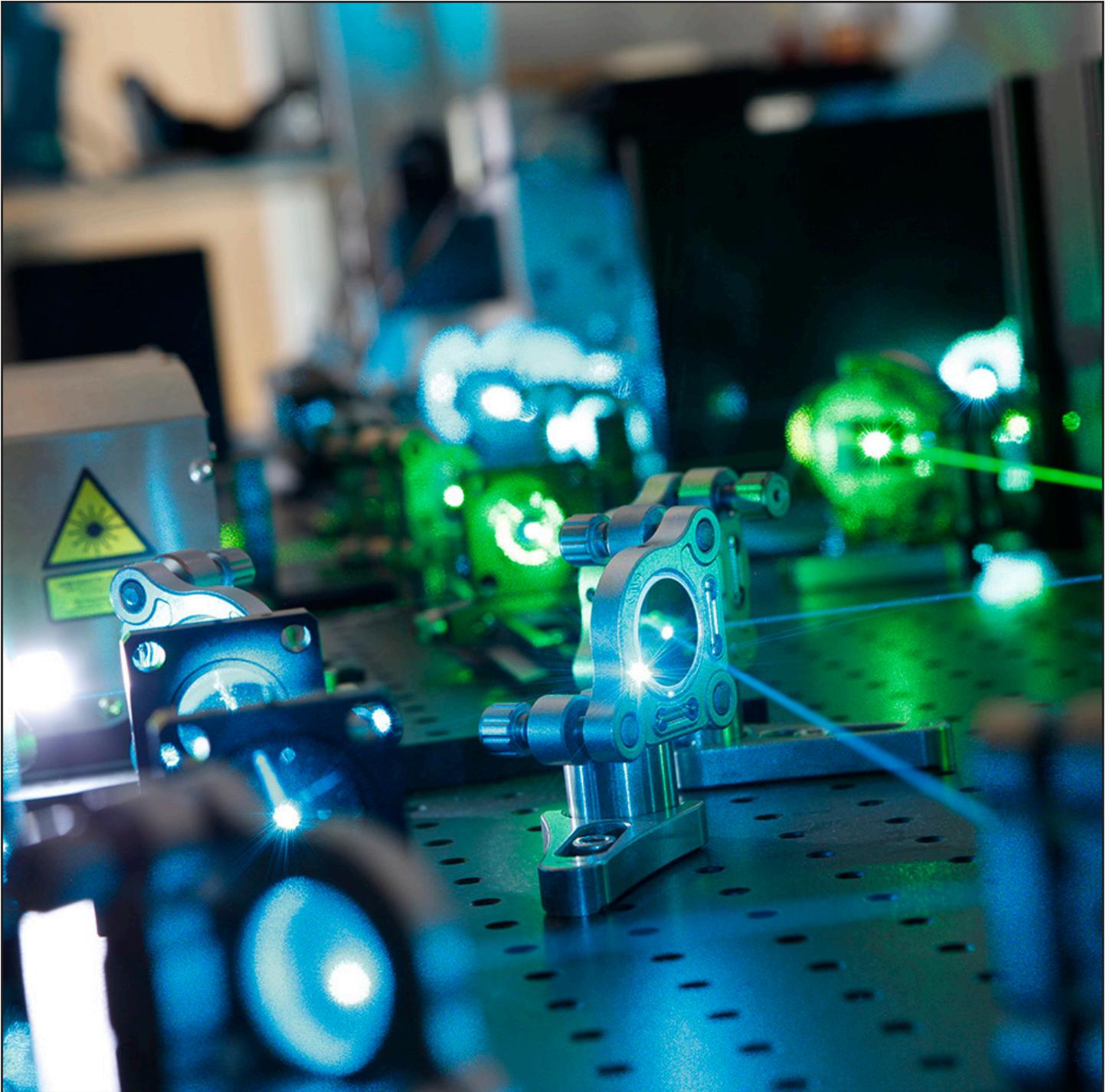


Optik / Kurze Wellenlängen
Optics / Short Wavelengths



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, 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 Hell, Eric Betzig and William E. Moerner were awarded the Nobel Prize in 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
Dr. Francesco Rocca
David Köhne
Oskar Laitenberger
Haugen Mittelstädt
Melissa Schenker
Jennifer-Rose Krüger
René Siegmund
Britta Vinçon

Optische Nanoskopie

Optical Nanoscopy

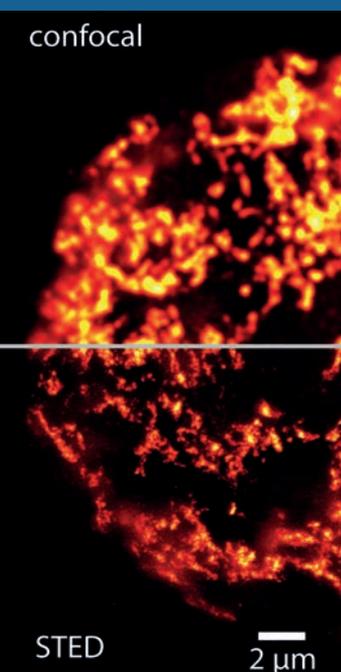
STED-Mikroskopie

Der Schlüssel zur Umgehung der Beugungsgrenze mit frei propagierenden Lichtstrahlen liegt darin, die Eigenschaften der Markermoleküle derart auszunutzen, dass sie von einem hellen, also detektierbaren Zustand in einen dunklen, also nichtdetektierbaren Zustand oder umgekehrt überführt werden. Dies geschieht in einer solchen Art und Weise, dass der Bereich, innerhalb dessen die Markermoleküle im hellen Zustand sind, räumlich eingeschränkt wird.

Das Prinzip STED (Stimulated Emission Depletion, stimulierte Fluoreszenzlöschung) verwendet den Prozess der stimulierten Emission, um Fluoreszenzmarker vom hellen angeregten elektronischen Zustand S_1 in den dunklen elektronischen Grundzustand S_0 zu überführen. Um den Bereich, in dem Marker fluoreszieren können, jenseits des Beugungslimits zu verkleinern, werden ein beugungslimitierter Anregungsfokus und ein donutförmiger STED-Fokus überlagert. Mit Ersterem wird ein Ensemble von Markermolekülen angeregt, mit Letzterem werden die Moleküle über den Prozess der stimulierten Emission so schnell wieder "ausgeschaltet", dass sie kein Fluoreszenzphoton emittieren können. Nur in der Mitte des STED-Donuts, in der die STED-Intensität gleich null ist, können die Moleküle noch fluoreszieren. Die Position dieser Intensitätsnullstelle in der Probenebene kann durch eine Rastereinheit, welche ein Strahlscanner oder eine Probenpositioniereinheit sein kann, verändert werden. Zur Bildaufnahme wird das Bildfeld pixelweise abgerastert, wobei das Fluoreszenzsignal, welches konfokal auf einen empfindlichen Punktdetektor abgebildet und von diesem in ein elektrisches Signal umgewandelt wird, der jeweiligen Nullstellenposition zugeordnet wird. Typischerweise dauert die Aufnahme eines Bildes mit 500×500 Pixeln nur wenige Sekunden. Die Auflösung des 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 kann theoretisch beliebig gut werden. Experimentell werden derzeit problemlos wenige 10 Nanometer erreicht, was einer Auflösungsverbesserung um über eine Größenordnung entspricht.

- ◀ Verteilung des Proteins Mortalin in nichtadhärenten K562-Zellen. Oben: konfokales Bild, unten: hochaufgelöstes STED-Bild.

Distribution of the protein mortalin in non-adherent K562 cells. Top: Confocal image, bottom: High-resolution STED image.



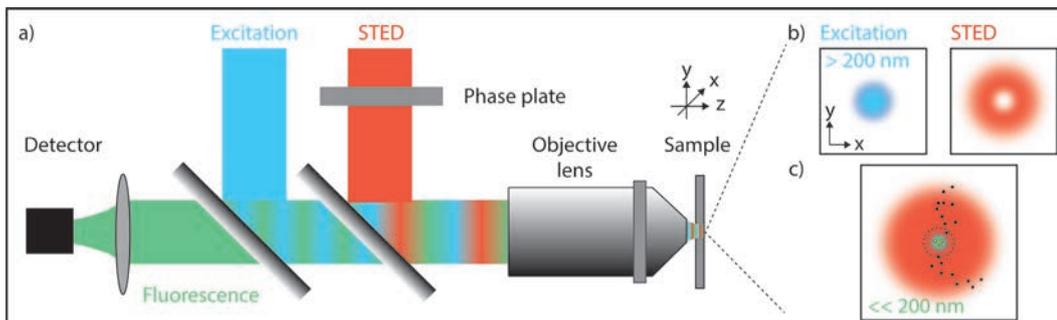
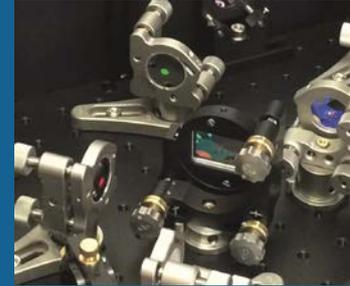
Optische Nanoskopie

Optical Nanoscopy

STED microscopy

The key to overcoming the diffraction barrier with freely propagating light waves is to use the properties of fluorescent markers such that they are transferred between a bright, detectable state and a dark, non-detectable state or vice versa. This is done in such a way that the region in which the markers can exist in their bright state is spatially confined.

The STED (stimulated emission depletion) principle uses stimulated emission to "switch" the fluorescent markers from their (bright) excited electronic state S_1 to the (dark) electronic ground state S_0 . In order to confine the region in which the markers are allowed to fluoresce beyond the diffraction limit, the excitation focus is superimposed with a doughnut-shaped STED focus. The former excites an ensemble of markers, while the latter switches these molecules off rapidly by stimulated emission so that they do not have time to emit a fluorescence photon. Only in the very center of the doughnut, where the STED intensity is zero, is fluorescence emission still allowed. The intensity zero can be positioned in the sample plane by the scanner unit, which may be a beam scanner or a sample positioning unit. The STED image is recorded by scanning the field of view pixelwise and by assigning the fluorescence signal to the respective position of the intensity zero. For detection, the fluorescence photons are confocally imaged on to a sensitive point detector and converted to an electrical signal. Typical recording times for an image with size of 500×500 pixels are only a few seconds. The resolution of the STED image, which is given by the extent of the fluorescent spot, depends on the applied STED intensity and the photophysical properties of the fluorophore and is theoretically not limited. Currently, a few 10 nanometers can be reached experimentally without any problems. This represents a resolution enhancement by more than one order of magnitude.



STED-Mikroskop (a). Anregungs- und STED-Laser werden überlagert und erzeugen in der Probe einen Anregungsfokus (blau) und einen donutförmigen STED-Fokus (rot) (b). Da sich die beiden Fokusse überdecken, fluoreszieren nur Moleküle im Zentrum des STED-Fokus (gelbe Punkte) (c).
 STED microscope (a). Excitation and STED Laser beams are combined and create a diffraction-limited focus (blue) and a doughnut-shaped STED focus (red) respectively (b). As both light distributions are superimposed, only molecules at the very centre are allowed to fluoresce (yellow dots) (c).

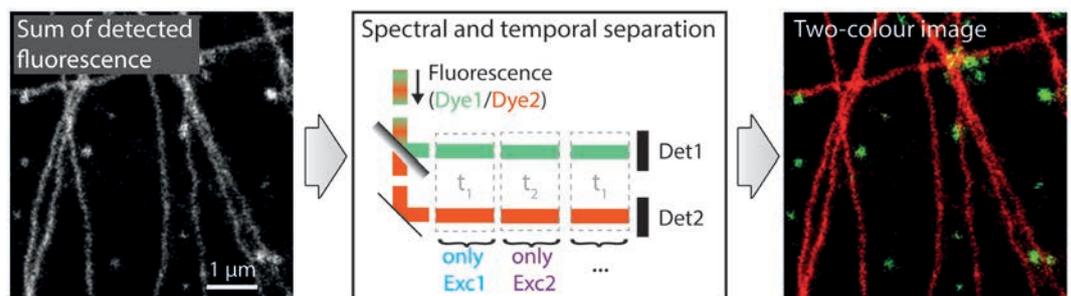
Optische Nanoskopie

Optical Nanoscopy

Farbiger Blick in die Zelle mit dem Zweifarben-STED-Mikroskop

Grauwertbilder (also einfarbige Bilder) zeigen uns die räumliche Verteilung von Markermolekülen, lassen in der Regel aber keine Differenzierung zwischen verschiedenen molekularen Spezies zu. Stattdessen wird ein Mikroskop mit der Fähigkeit aus, zwei oder mehr Farben zu unterscheiden, so erhalten wir neue entscheidende Informationen, zum Beispiel über die relative räumliche Verteilung von zwei unterschiedlichen Molekülsorten. Aus der nun farbcodierten Darstellung dieser Ortsverteilungen von zum Beispiel zwei unterschiedlichen Proteinsorten lassen sich unter anderem Schlüsse hinsichtlich deren Interaktion oder 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. Der Hauptvorteil dieses Mikroskops ist jedoch die Möglichkeit, beide Kanäle quasi-simultan bei minimalem Übersprechen aufzunehmen: Die Probe wird zu keiner Zeit in beiden Kanälen angeregt, die Laser werden sequentiell auf Basis einzelner Pixel geschaltet, die Schaltzeit liegt unterhalb einer Mikrosekunde. Die zwei Kanäle werden dadurch zum einen zeitgleich aufgenommen, was Kolokalisationsfehler aufgrund von thermischen oder mechanischen Instabilitäten während der Messzeit vermeidet. Zum anderen wird die erzeugte Fluoreszenz nicht nur spektral, sondern auch zeitlich unterschieden, so dass ein etwaiges Übersprechen der beiden Farbkanäle detektiert und später herausgerechnet werden kann. Das System bietet eine hochaufgelöste Ortsdarstellung von Emittoren mit Emissionsspektren um 620 nm bzw. 670 nm und ist in der Lage, biologisch relevante Informationen über die Kolokalisation und Wechselwirkung von Proteinen zu liefern.



▲ Vereinfachte Darstellung der Zweikanaltrennung. Mit Hilfe der spektralen und zeitlichen Information ist auch bei Übersprechen der Detektionskanäle (nicht dargestellt) eine eindeutige Zuordnung der detektierten Fluoreszenz zu den zwei verschiedenen Spezies von Fluoreszenzmarkern (und damit zu den markierten Zellstrukturen) möglich.

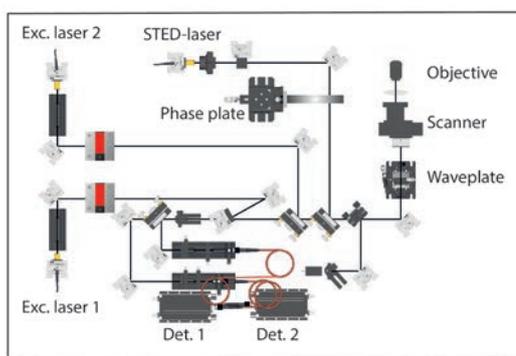
Simplified illustration of the channel separation. The gathered spectral and temporal information enables the assignment of the detected fluorescence to two different species of markers (and thereby to the marked cellular structures) even in the presence of crosstalk (not shown).

Optische Nanoskopie

Optical Nanoscopy

Quasi-simultaneous two-color imaging of cells with STED microscopy

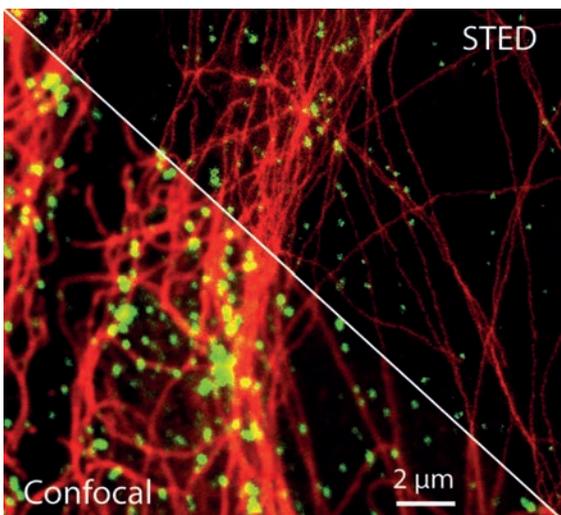
Images in shades of grey (single-color images) show the spatial distribution of marker molecules, they however usually do not differentiate between different molecular species. When a microscope is additionally equipped with the ability to recognize two or more colors and distinguish between them, it will provide decisive new information, for example knowledge about the relative spatial distribution of two different types of molecules. The resulting color-coded image of protein locations allows to draw, for example, conclusions about their interactions or their functions.



◀ Schematische Darstellung eines Zwei-farben-STED-Mikroskops, das zwei Anregungslaser mit nur einem STED-Laser kombiniert.

Schematic illustration of a custom-built dual-color STED microscope, which combines two excitation laser beams and a single STED laser beam.

Our implementation of such a STED microscope achieves super-resolution in two colors using only one single STED beam. Hereby, the overlap of both channels is independent of alignment and chromatic aberrations. The main advantage of this microscope is the possibility to acquire both channels quasi-simultaneously with minimal crosstalk: The sample is not excited with both lasers at the same time, but the two excitation sources are sequentially switched at single pixel-level with switching times below one microsecond. Therefore, the two channels are not only recorded at the same time avoiding co-localization errors due to thermal and mechanical instabilities during the measurement, but also the fluorescence can be spectrally and temporally separated at the detector, which allows to assess and compensate inter-channel cross-talk. The system acquires two-color high-resolution images of fluorophores with emission peaks around 620 nm and 670 nm and is able to provide biological relevant information on protein co-localizations and interactions in spatial super-resolution conditions.



◀ Vergleich eines zweifarbigem Konfokalbildes (links) und eines STED-Bildes (rechts). Zu sehen sind das Mikrotubulnetzwerk (rot) und Clathrin (grün) in Fibroblasten.

Comparison between a two-colour confocal image (left) and a STED image (right) of microtubules (red) and clathrin (green) in fibroblasts.

Optische Nanoskopie

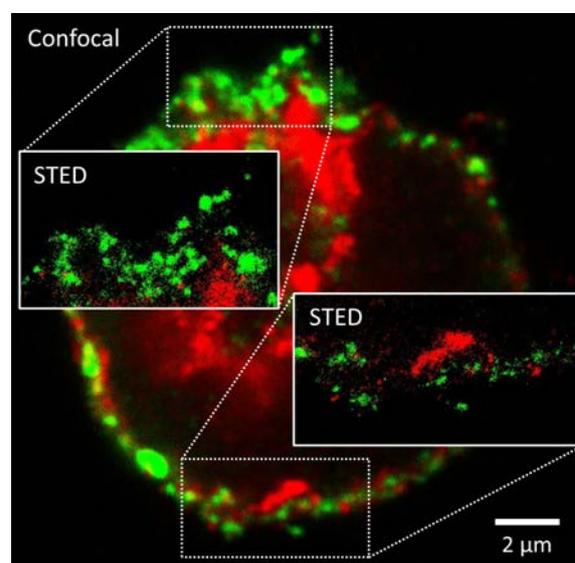
Optical Nanoscopy

Anwendung der STED-Mikroskopie: die Wechselwirkung von Mitochondrien mit der Zellmembran

Neben der Abwehr von Krankheitserregern ist es eine weitere Aufgabe des Immunsystems, fehlerhafte körpereigene Zellen unschädlich zu machen. Das Komplementsystem, welches Bestandteil des Immunsystems ist, bedient sich hierzu unter anderem des Membranangriffkomplexes (MAC, engl.: membrane attack complex). Dieser ist aus unterschiedlichen Proteinen zusammengesetzt und formt Poren in der Plasmamembran der Zielzelle, was deren Lyse nach sich zieht.

Zellen bedienen sich diverser Mechanismen, um sich vor dieser komplementabhängigen Zytotoxizität zu schützen, insbesondere in Krebszellen sind diese Mechanismen stark ausgeprägt. Als Reaktion auf den MAC-Angriff können zum Beispiel Gegenmaßnahmen eingeleitet werden, die den Komplex von der Zellmembran entfernen oder gar dessen Bildung verhindern. Das Protein Mortalin spielt hierbei eine entscheidende Rolle. Es ist bekannt, dass es die Fähigkeit besitzt, kritische Schritte bei der Entstehung des Komplexes zu unterbinden. Mortalin wird in den meisten Gewebearten exprimiert und ist hauptsächlich in den Mitochondrien lokalisiert. In Krebszellen ist es deutlich überexprimiert. Nach Aktivierung der zellulären Verteidigungsmechanismen wird das Protein nicht nur in den Mitochondrien, sondern auch in der Zellmembranregion gefunden.

Um die postulierte Mortalin-MAC-Interaktion in der Membranregion zu überprüfen, untersuchten wir in Kooperation mit der Universität Tel Aviv die Verteilung von Mortalin und C9, welches ein Hauptbestandteil des MAC-Komplexes ist. Hierzu wurden K562-Krebszellen, in denen beide Proteine mit Fluoreszenzfarbstoffen markiert wurden, mit einem Zweifarben-STED-Mikroskop abgebildet. Die hohe räumliche Auflösung der Bilder ermöglichte es, sowohl das Clusterverhalten von C9 als auch die Kollokalisierung beider Proteine an der Plasmamembran zu analysieren. Weiterhin konnten wertvolle Einblicke in die zeitliche Änderung der Proteinverteilungen im Verlaufe der Immunantwort gewonnen werden.



◀ 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 mortalin (red) and C9 (green) in a suspended K562 cell.

Optische Nanoskopie

Optical Nanoscopy

Application of two-color STED microscopy: Mitochondria and plasma membrane interaction in cancer cells

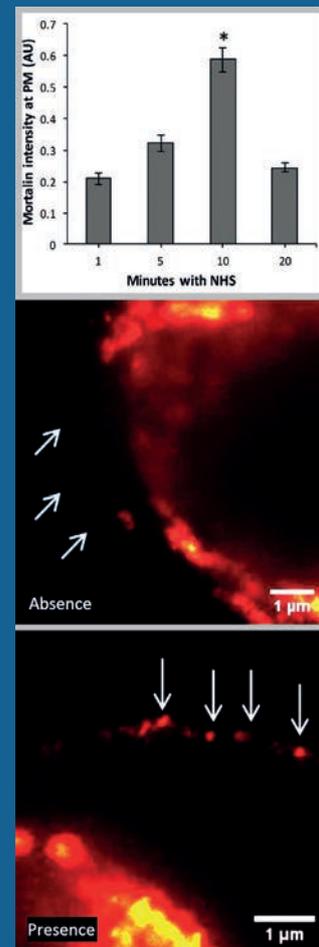
The immune system's task is not only to defend against external pathogens, but also to dispose the body's own defective cells. In order to accomplish this, the complement system, which is part of the immune system, utilizes the membrane attack complex (MAC), an assembly of several different complement proteins. Once MAC clusters are formed on the target cell's membrane, the membrane is disrupted which leads to cell death.

Cells utilize several mechanisms of protection against this complement-dependent cytotoxicity, mechanisms that are expressed at higher level in cancer cells. In response to the MAC attack, cells can activate counteractions aimed to eliminate the MAC-clusters or prevent their generation. The mitochondrial protein mortalin plays a key role in the resistance of cells. It is known to possess the ability to block critical steps in the formation of MAC. Mortalin resides mainly inside mitochondria, it is constitutively expressed in most tissues and is significantly overexpressed in cancer cells. After the cell's defensive mechanisms have been initiated, mortalin is not only found inside mitochondria, but also at the plasma membrane region.

In order to look into this postulated mortalin-MAC interaction in the membrane region, we investigated the distribution of mortalin and C9 (which is a major constituent of MAC) in cooperation with Tel Aviv University. For this, we imaged K562 cancer cells, in which mortalin and C9 were immunostained with fluorescent dyes, with a two-color STED microscope. The subdiffraction resolution enabled us to analyze not only the clustering of C9 but also the colocalization of both proteins at the plasma membrane. Moreover, it was possible to obtain valuable insight into the temporal change of the proteins' spatial distribution after triggering the immune response.

Quantifizierung des Fluoreszenzsignals von Mortalin in der Plasmamembranregion (PM) mit Hilfe der STED-Mikroskopie. Eine kinetische Analyse zeigt, dass das Signal 10 Minuten nach der Aktivierung der Immunantwort der Zelle einen Höchstwert erreicht und danach wieder abfällt. Dies deutet darauf hin, dass sich Mortalin innerhalb der ersten 5-10 Minuten von der mitochondrialen Matrix hin zur Plasmamembran umverteilt und danach (teilweise) ins extrazelluläre Medium übergeht.

Quantification of mortalin fluorescence signal at the plasma membrane (PM) region by STED microscopy. Kinetic analysis demonstrated that the mortalin signal at the plasma membrane region reaches a peak 10 minutes after activation of the cell's defensive mechanisms and declines afterwards. It is reasonable to assume that mortalin relocates within 5-10 minutes from the mitochondrial matrix to the plasma membrane and then (partly) transits to the extracellular milieu.



Optische Nanoskopie

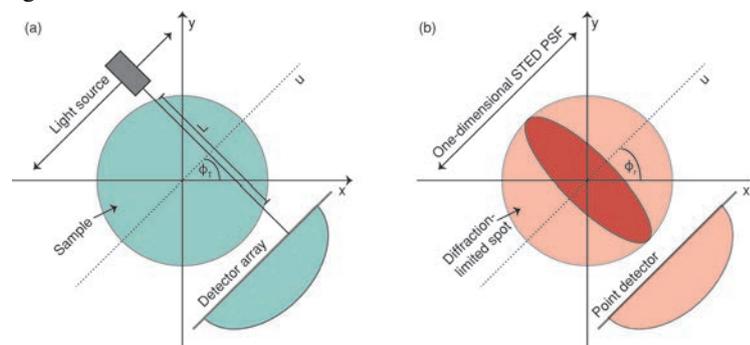
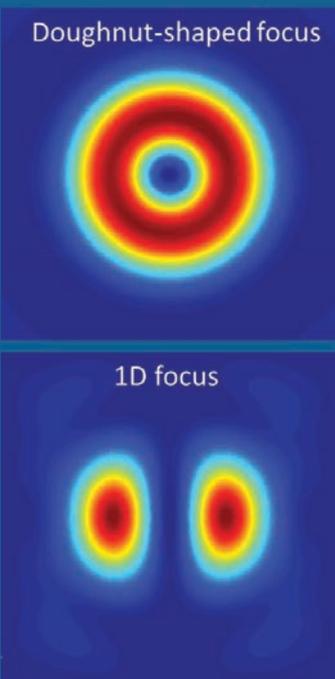
Optical Nanoscopy

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.

Die von uns entwickelte Variante der STED-Mikroskopie benötigt gegenüber der klassischen Implementierung niedrigere Laserleistungen zum Erzielen der gleichen Auflösungserhöhung. Das Grundprinzip besteht darin, den fluoreszierenden Bereich nicht in zwei, sondern nur in einer Dimension einzuschränken. Aus einer Sequenz von Einzelbildern, die für unterschiedliche Richtungen der eindimensionalen Auflösungserhöhung aufgenommen werden, lässt sich dann ein zweidimensional hochaufgelöstes Bild rekonstruieren. Da diese Verfahrensweise Analogien zu tomographischen Methoden aufzeigt, bezeichnen wir die neue STED-Variante als tomographische STED-Mikroskopie ("tomoSTED-Mikroskopie").

Das Erreichen einer identischen Hochauflösung bei geringeren STED-Laserleistungen ist nicht nur in Experimenten von Vorteil, welche über eine limitierte 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.



Prinzip der tomographischen Bildgebung (a) und der tomoSTED-Mikroskopie (b). (a) Die Projektion entlang der Strahlachse enthält keine Informationen über die axiale Struktur innerhalb der Probenausdehnung L . Die fehlende Information zur dreidimensionalen Probenrekonstruktion kann über Rotation (zum Beispiel der Probe) und Abrastern senkrecht zur Strahlachse erhalten werden. (b) Auch entlang der beugungslimitierten Richtung des effektiven tomoSTED-Fokus ist keine hochaufgelöste Information vorhanden. Eine solche kann durch Rotation der PSF und Abrastern der Probe gewonnen werden.

Principle of tomographic imaging (a) and tomoSTED microscopy (b). (a) The projection along the beam direction does not contain any information about the axial sample structure within the specimen dimension L . The missing information for three-dimensional sample reconstruction can be gained by rotating the sample and scanning perpendicular to the beam direction. (b) Similarly, there is no high-resolution information accessible along the diffraction-limited direction of the tomoSTED-PSF. This can be gained by PSF rotation and scanning along the high resolution direction.

Optische Nanoskopie

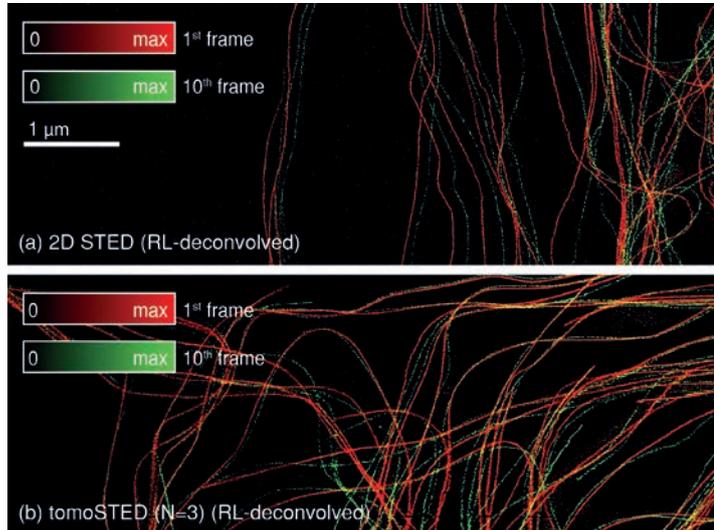
Optical Nanoscopy

Tomographic STED microscopy

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 fluorescent dye molecules.

We have developed a novel STED microscopy variant which requires lower STED laser power to obtain the same resolution enhancement as in the conventional implementation. The key principle is that the fluorescence area is not narrowed in two, but only in one direction. A two-dimensionally super-resolved image can be reconstructed from a series of single images which are recorded at different angles of the one-dimensional resolution enhancement. Since this method exhibits similarities to tomographic imaging, it is referred to as tomographic STED microscopy ("tomoSTED microscopy").

Realizing identical laser conditions at lower STED laser powers is not only valuable 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.



Visualisierung des Mikrotubulinetzwerkes in einer lebenden Zelle zu unterschiedlichen Zeitpunkten mittels konventioneller STED-Mikroskopie (a) und tomoSTED-Mikroskopie. Gezeigt sind jeweils das erste (rot) und das zehnte Bild (grün) 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 (red) and the tenth (green) frame of a time series are shown. Although the tomoSTED image was taken with half the STED power and in half the acquisition time, it features the same image quality as the conventional STED image.

Optische Nanoskopie

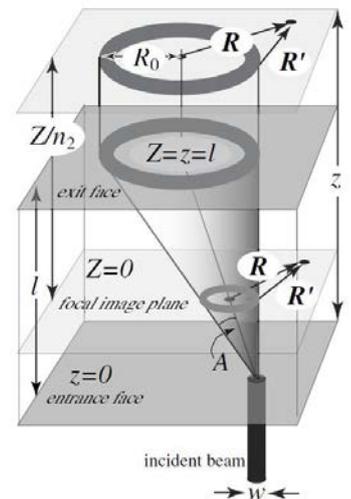
Optical Nanoscopy

Ultraschnell umschaltbare Abregungsverteilungen für die tomoSTED-Mikroskopie

Die tomoSTED-Mikroskopie profitiert von einer schnellen, idealerweise pixelweisen, Rotation der Orientierung der Abregungsverteilung, da ein zweidimensional hochaufgelöstes Bild aus mehreren Einzelbildern mit unterschiedlicher Richtung der Auflösungsrichtung rekonstruiert wird. Wir untersuchten den Effekt der konischen Diffraktion, der in biaxialen Kristallen mit drei verschiedenen Brechungsindizes auftritt, um geeignete Intensitätsverteilungen zu erzeugen. Für Licht mit einer Ausbreitungsrichtung entlang der optischen Kristallachse kann ein austretender Strahlkegel beobachtet werden. Die Intensitätsverteilung hängt von r_0 , dem Verhältnis der Radien des austretenden und des einfallenden Strahls, von der Distanz Z von der Fokalebene im Kristall wie auch von der Polarisationsrichtung des einfallenden Strahls ab. 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 abhängig und kann daher bei Verwendung elektrooptischer Geräte ultraschnell mit Raten von bis zu mehreren 100 kHz umgeschaltet werden. Ultraschnelles Schalten mittels konischer Diffraktion wird es ermöglichen, die Abregungsverteilung pixelweise zu verändern. Dies verbessert die Stabilität des tomoSTED-Mikroskops gegenüber Probenbewegungen und macht es somit zu einem vielversprechenden Kandidaten für Lebendzellmessungen.

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

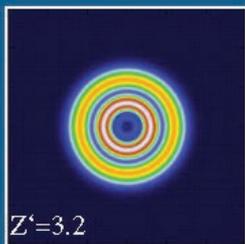
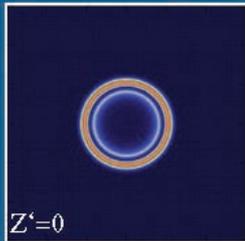
Sketch of the divergent ray cone which forms inside a biaxial crystal (from Berry, J. Opt. A: Pure Appl. Opt. 6, 2004).



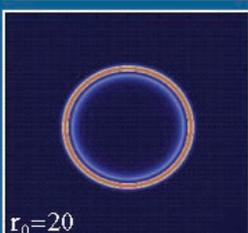
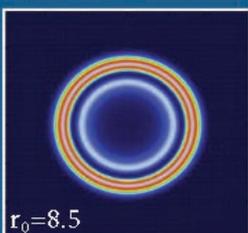
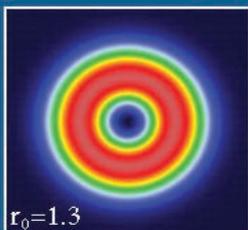
- ◀ Simulierte Intensitätsverteilungen für verschiedene Abstände Z' (oben) und Strahlradienverhältnisse r_0 (unten) für zirkulare Eingangspolarisation. Oben: Für $Z' = 0$ können zwei Ringe beobachtet werden, von denen der innere mit zunehmendem Z' Oszillationen ausbildet. Für große Z' werden die Ringe breiter und es bildet sich eine axiale Intensitätsspitze aus. Unten: Der Ringradius nimmt mit zunehmendem r_0 zu, ein zweiter Ring bildet sich aus.

Simulated intensity distributions for different distances Z' (top) and radius ratios r_0 (bottom) for circular polarization of the incident beam. Top: For $Z' = 0$, two rings can be observed, with the inner ring exhibiting oscillations with increasing Z' . For large Z' the rings widen and an axial spike forms. Bottom: The ring radius increases with increasing r_0 and a second ring forms.

Variation of Z'



Variation of r_0

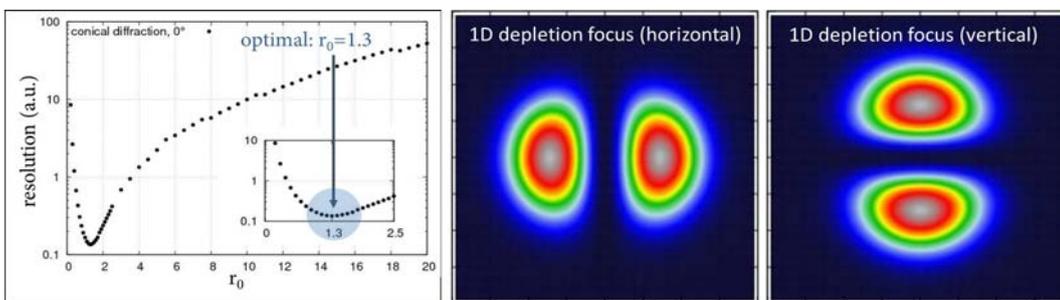


Optische Nanoskopie

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 for different orientations of the resolution increase. For realizing a fast rotation of the depletion pattern, we studied the effect of conical diffraction, which can be observed in biaxial crystals with three different refractive indices. For light propagating along the crystal optic axis, an emergent ray cone is observed. The intensity distribution is determined by r_0 , the ratio between the radius of the emergent and of the incident beam, the position Z within the crystal as well as the polarization of the incident beam. By varying these parameters in both simulations and experiments, the intensity distribution was optimized to yield the best resolution using these depletion patterns for tomoSTED microscopy. It was shown that for the optimal choice of 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 polarization and can therefore be ultrafast switched with rates up to several 100 kHz by using electro-optical devices. Ultrafast switching by conical diffraction will therefore allow changing the pattern orientation on the single pixel level enhancing the tomoSTED microscope's robustness against sample drift and making 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 und des Polarisators 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 both the polarization of the incident beam and the polarizer, the pattern can be arbitrarily rotated by arbitrary angles.

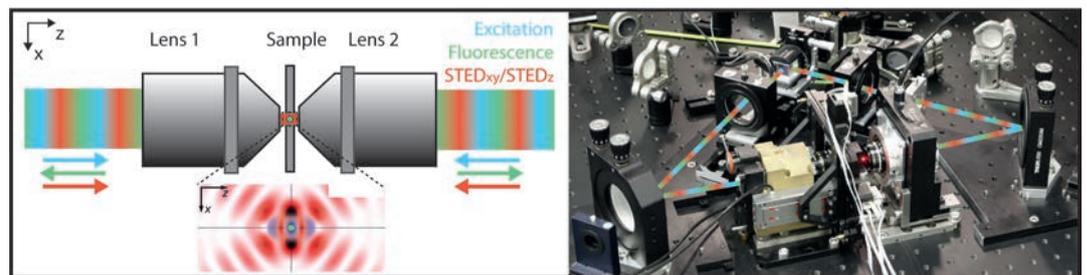
Optische Nanoskopie

Optical Nanoscopy

Isotrope Hoचाuflösung 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.

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



▲
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).

Optische Nanoskopie

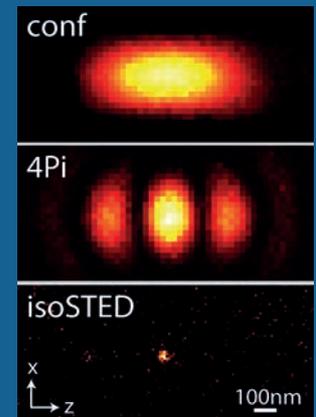
Optical Nanoscopy

Isotropic super-resolution with the isoSTED microscope

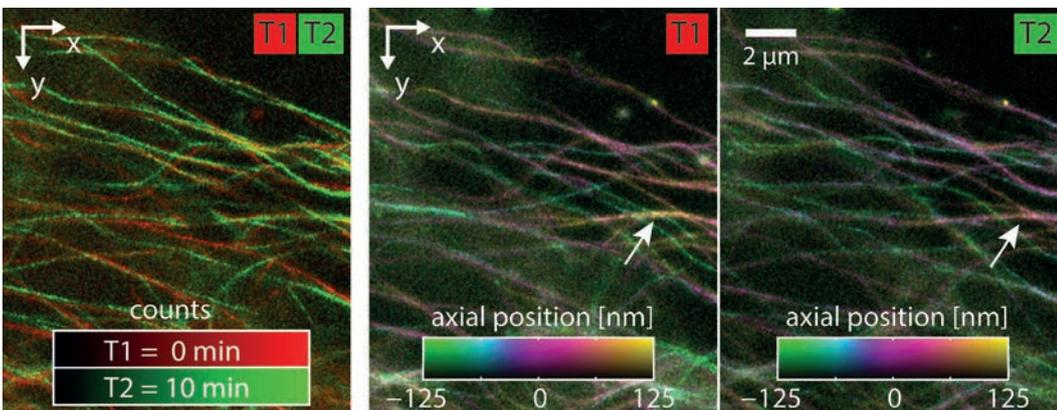
In order to achieve an isotropic resolution in all three spatial dimensions isoSTED microscopy combines 4Pi and STED microscopy. The coherent use of two opposing objective lenses (4Pi configuration) reduces the axial dimension of the excitation focus by a factor of 3–5 as compared to the confocal (single 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.

Vergleich des zigarrenförmigen konfokalen Fokus (oben), des 4Pi-Fokus (mittig) und des isotropen isoSTED-Fokus (unten).

Comparison of the cigar-shaped confocal focus (top), the 4Pi focus (middle) and the isotropic isoSTED focus (bottom).



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 Mikrotubulinetzwerkes in einer lebenden Zelle zum Zeitpunkt T1 und 10 Minuten 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 10 minutes 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

SMS-Mikroskopie

Die Mikroskopie vom Typ SMS (Single Marker Switching) umfasst viele moderne Nanoskopievarianten (zum Beispiel PALM, STORM, FPALM, PALMIRA, GSDIM, dSTORM), die alle auf dem gleichen Prinzip beruhen: Sie nutzen die photo-physikalischen 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 wurden, 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.

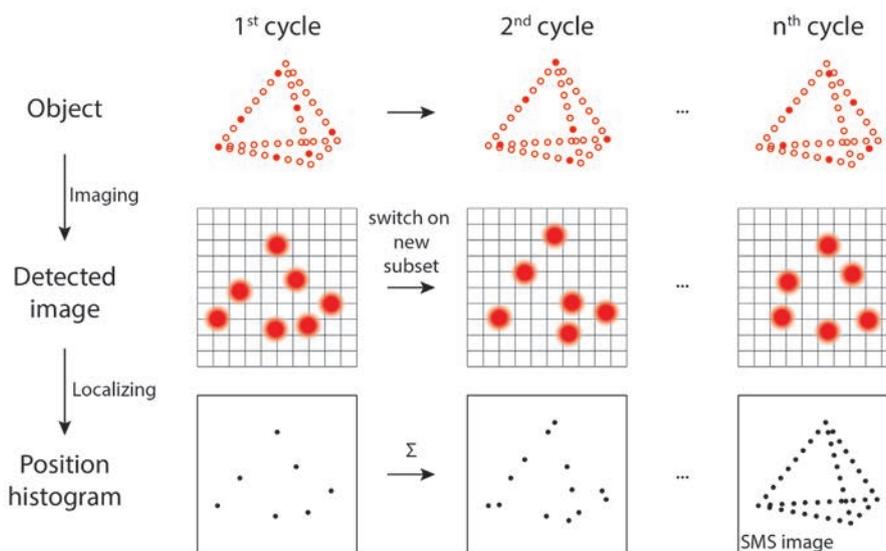
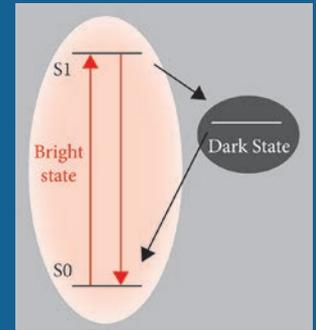
Die verwendeten molekularen Schaltprozesse sind vielfältig und hängen von der Wahl der Markermoleküle ab. PALM schaltete in seiner ersten Implementierung beispielsweise photoaktivierbare fluoreszierende Proteine irreversibel an. STORM nutzt als photoinduzierten Schaltvorgang die reversible cis-trans-Isomerisierung 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 switching-on 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-activatable 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 spiroamides 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.

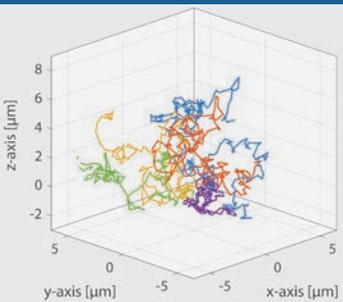
Optische Nanoskopie

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 in die zwei Dimensionen, 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. In die 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 Interferentechniken auf dünne Schichten von ca. 0,25 μm für die iPALM- bzw. 1 μm für die 4Pi-SMS-Implementierung beschränkt.



Wir haben aus diesem Grund ein 3D-SMS-Mikroskop entwickelt, welches auf dem Prinzip der Stereoskopie beruht und nicht dieser axialen Einschränkung unterliegt. Es kommt dabei ohne Modifikationen der Detektions-PSF und komplizierte Interferenzmuster aus und verwendet stattdessen vier niedrignumerische 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. Der 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 aufgrund der Abhängigkeit der vier Beobachtungswinkel überbestimmt ist. Mit unserem Mikroskop können nicht nur fluoreszenzmarkierte Zellen aufgenommen, sondern auch die Bewegung einzelner Fluoreszenzmarker verfolgt werden. Aus den einzelnen Trajektorien lassen sich Diffusionskonstanten ermitteln, aus denen zum Beispiel auf die Größe der Teilchen oder die Viskosität des umgebenden Mediums geschlossen werden kann.

Die 3D-Ansicht der Verteilung von Mitochondrien in einer HeLa-Zelle zeigt die isotrope Auflösung des TetraSMS-Mikroskops über einen großen axialen Bereich. Der Gitterabstand beträgt 500 nm.

The 3D view of the distribution of mitochondria in a HeLa cell shows the isotropic resolution of the TetraSMS microscope over a large axial range. The grid spacing is 500 nm.

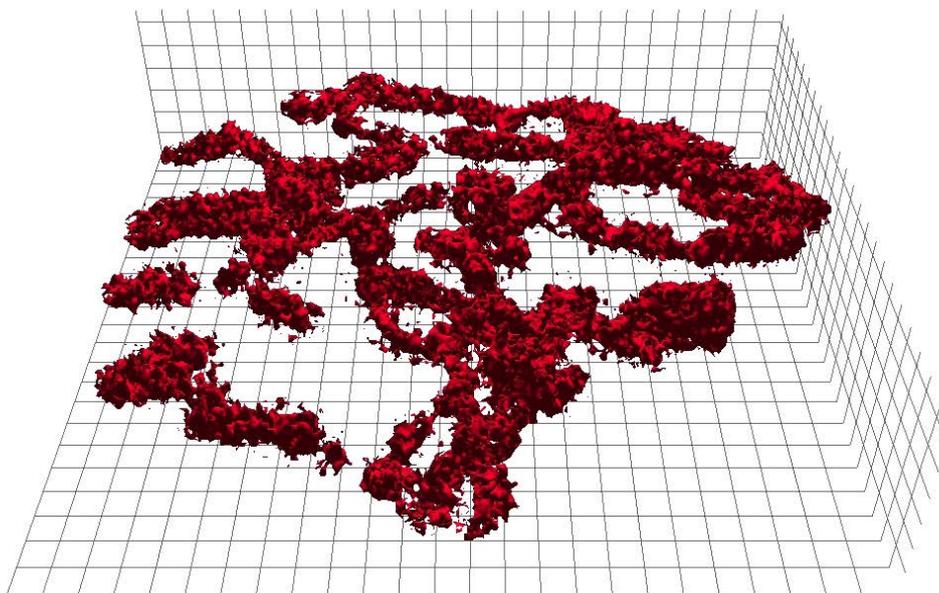
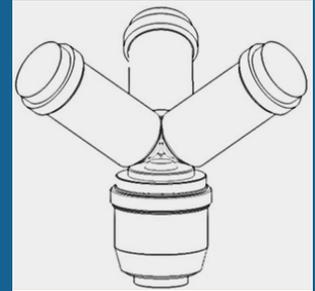
Optische Nanoskopie

Optical Nanoscopy

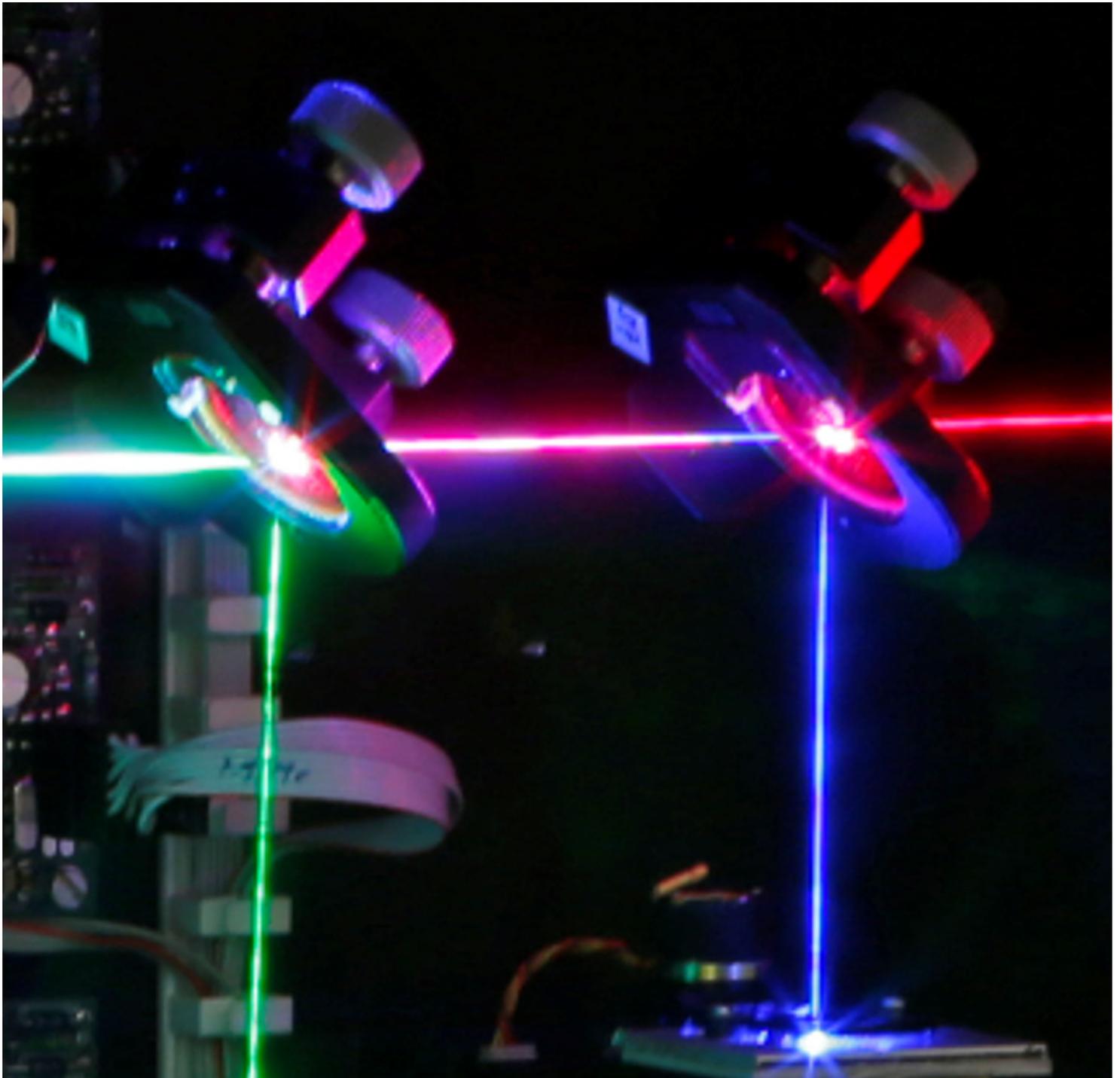
TetraSMS microscopy: isotropic resolution over large axial range

While the expansion of STED microscopy to the third dimension (3D-STED, isoSTED) is based on the same principle as in 2D, 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, such methods are restricted to thin layers which are in the range of ~ 0.25 μm and ~ 1 μm for the iPALM and the 4Pi-SMS implementation, respectively.

We have developed a 3D SMS microscope based on the stereo view principle which clearly overcomes this axial restriction. It even makes detection PSF modifications as well as delicate interference patterns obsolete. By simultaneously observing an emitter through four low numerical aperture (NA) objectives which are oriented in a tetrahedron-like shape, our microscope allows acquiring super resolved 3D images within an axially extended volume of at least $6 \times 6 \times 6$ μm^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 the greatly overdetermined set of linear equations in the recalculation algorithms which take the four different perspectives into account. Our system allows not only to image fluorescently labelled cells, but also permits to track individual fluorescent markers. By analyzing the recorded trajectories, the diffusion coefficients can be determined which give information for example about the size of the markers or the viscosity of the surrounding medium.



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 hoch-effiziente Verfahren zu deren Herstellung dar. Mittels Maskenprojektion oder Interferenzverfahren wird bei geeigneter Laserwellenlänge und Pulsdauer Sub- μm -Präzision erreicht. Strukturdetails mit Abmessungen im Bereich von 50 nm sind realisierbar. Dabei gewinnt der Einsatz ultrakurzer Pulse in immer mehr Anwendungsgebieten zunehmend an Bedeutung. Mittlerweile sind kompakte, industrietaugliche Ultrakurzpulslaser verfügbar, und dennoch ist die in unserer Abteilung betriebene Weiterentwicklung ultrakurzpulsbasierter Techniken für ein nachhaltiges Wachstum dieses Technologiebereichs unabdingbar. Dabei stehen die Erzeugung energetischer ultrakurzer Pulse sowie die Erzeugung von periodischen Nanostrukturen auf technischen Oberflächen im Mittelpunkt.

Aktuelle Themen sind die grundlegende Untersuchung der Dynamik der Laserablation mittels ultrakurzer UV-Pulse, die diffraktiv wirksame Markierung von Werkstoffflächen und die Oberflächenfunktionalisierung von medizinischem Edelstahl. Weitere Arbeiten befassen sich mit der Glasnanostrukturierung sowie der Erzeugung plasmonischer Nanopartikel in Glas. Darüber hinaus wird die laserbasierte Herstellung von mikrooptischen Komponenten und Si-Nanokristallen untersucht.

Micro- and nano-structured surfaces give rise to numerous functionalities for fluidic, tribological, medical or optical applications. Laser ablation or surface modification are 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. A 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 summarized. First, recent results about the ablation dynamics of solid surfaces by ultrashort UV pulses will be surveyed. Then, our latest developments on diffractive marking by direct laser writing will be sketched and progresses in the surface functionalization of medicinal stainless steel will be presented. Additional research is focused on the micro- and nano-patterning of glass and the generation of plasmonic nanoparticles in glass. Furthermore, laser based fabrication of micro optical elements as well as the fabrication of Si 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. Thomas Fricke-
Begemann
Dr. Jörg Meinertz
Dr. Tamas Nagy
Andreas Blumenstein
Frederick Kleinwort
Jan-Hendrik
Klein-Wiele
Till Schröder
Simon Schulze

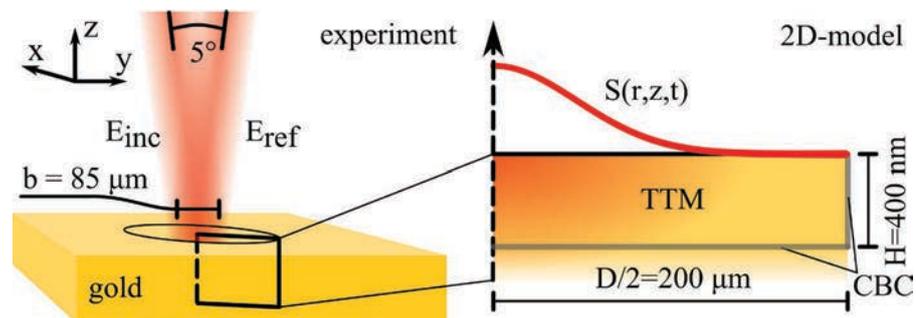
Kurze Pulse / Nanostrukturen

Short Pulses / Nanostructures

Reflektionsverhalten von Gold unter Strukturierungsbedingungen

Für eine präzise Bearbeitung von Oberflächen durch ultrakurze Laserpulse ist das detaillierte Verständnis der beteiligten physikalischen Prozesse essentiell wichtig. Bei der Bearbeitung durch direkten Materialabtrag (Laserablation) herrschen im Festkörper infolge der starken Anregung extreme Bedingungen, die unter anderem eine dynamische Änderung der Reflektivität während der Bestrahlung bewirken können.

Um die in den Festkörper eingebrachte Energie genau bestimmen zu können, muss der Reflektivitätsverlauf im Detail untersucht werden. Dies geschieht im Rahmen eines von der DFG geförderten Forschungsprojektes in Zusammenarbeit mit zwei Theoriegruppen der Universitäten Kassel und Kaiserslautern. In diesem Projekt werden dazu am LLG Experimente durchgeführt und mit Simulationen verglichen, wodurch ein durchgehendes Verständnis der involvierten Prozesse während und nach der Bestrahlung möglich ist. Dabei liefern die Simulationen extrem detaillierte Ergebnisse mit einer Ortsauflösung auf atomarer Skala und einer zeitlichen Auflösung im Pikosekundenbereich. Somit steht ein leistungsstarkes Tool zur Verfügung, das eine verlässliche Simulation der Laserstrukturierung auf Oberflächen ermöglicht.



Skizze des simulierten Querschnitts bei der Bestrahlung der Oberfläche mit einem Laserpuls. Die Simulation ermöglicht die Berechnung der Elektronentemperatur und somit der Reflektivität zu jedem Zeitpunkt an jedem Ort.

Sketch of the simulated cross section by irradiation of the surface by a laser pulse. The simulation allows the determination of the electronic temperature and thus the reflectivity at any given time at any location.

Anwendungsbeispiel einer Molekulardynamiksimulation eines Volumenelements von Gold, in der die dynamische Änderung der Reflektivität einen entscheidenden Einfluss auf die eingebrachte Energie hat (D. Ivanov, Universität Kassel). Gezeigt werden das Fluenzprofil des einstrahlenden Pulses beschrieben durch $S(r,z,t)$ und der CSP-Parameter des Materials, der den Aggregatzustand angibt (blau für kristallin, grün für flüssig und rot für gasförmig).

Example of a molecular dynamics simulation of a volume element of gold, where the dynamic change of the reflectivity has a significant impact on the absorbed energy (D. Ivanov, University Kassel). The fluence profile of the incident pulse is shown, described by the source term $S(r,z,t)$ and the CSP-parameter of the material, indicating the phase of matter (blue for crystalline, green for liquid, and red for gaseous phase).

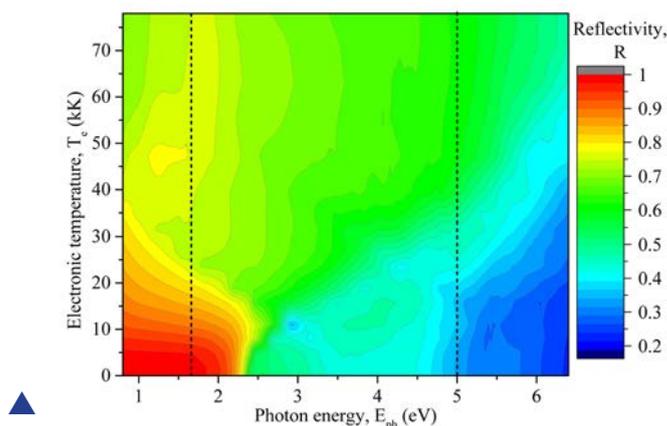
Kurze Pulse / Nanostrukturen

Short Pulses / Nanostructures

Reflectivity of gold under structuring conditions

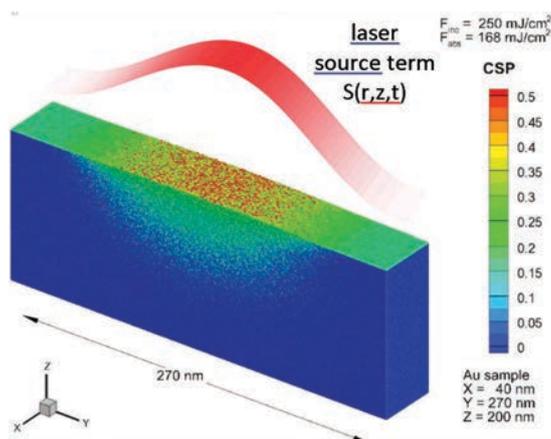
For the fabrication of high precision structures on surfaces by ultra-short laser pulses a detailed understanding of the involved physical processes is essential. During direct processing by material removal (laser ablation) the solid state material is under extreme conditions due to the strong excitation, which may lead to a dynamic change of the reflectivity during the structuring process.

For precise determination of the energy deposited into the solid material, the reflectivity change needs to be studied in detail. This is accomplished within a DFG funded research project in collaboration with two theoretical groups from the Universities of Kassel and Kaiserslautern. Within this project, experiments are conducted at the LLG and compared with simulation results, allowing a complete understanding of the underlying processes during and after laser irradiation. The simulations provide very accurate results with a spatial resolution on an atomic level and a temporal resolution in the picosecond range. Thus, we established a powerful tool which allows a detailed and reliable simulation of laser structuring of surfaces.



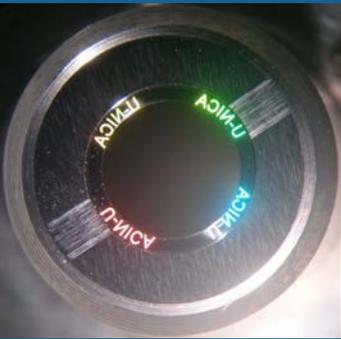
Darstellung der Reflektivität von Gold in Abhängigkeit von der eingestrahlichten Photonen-Energie und der Elektronentemperatur. Die Daten wurden aus einer Ab-initio-Dichtefunktionaltheorie-Rechnung (E. Zijlstra, Universität Kassel) in Kombination mit einem modifizierten Drude-Modell gewonnen.

Map of the reflectivity of gold as a function of the incident photon energy and the electronic temperature. The data are obtained using a combination of ab-initio density functional theory calculations (done by E. Zijlstra, University of Kassel) and a modified Drude model.



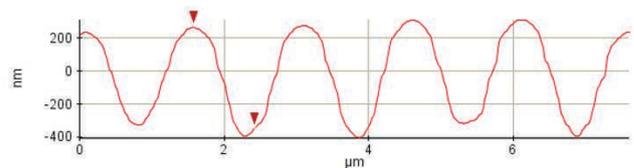
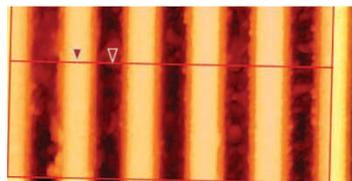
Kurze Pulse / Nanostrukturen

Short Pulses / Nanostructures



Diffraktive Laser-Direktbeschriftung zur Erzeugung komplexer holographischer Sicherheitsmerkmale auf Hartmetall und Hartbeschichtungen

Diffraktive Sicherheitsmerkmale, wie sie von Banknoten oder Konto-karten bekannt sind, eignen sich zur individuellen, fälschungssicheren Kennzeichnung von Originalteilen und sind zusätzlich als Designelement interessant. Solche Sicherheitssiegel in Form von metallisierten Folien, die auf Produkte und Produktverpackungen aufgeklebt werden, haben sich fest etabliert und sind weit verbreitet. Um vergleichbare Markierungen direkt auf hochwertige Metallgegenstände aufzubringen, haben wir in den vergangenen Jahren ein laserbasiertes Direktschreibverfahren entwickelt. Somit lassen sich wertvolle Bauteile, wie sie zum Beispiel im Anlagenbau, in der Automobilindustrie, der Luft- und Raumfahrtindustrie und der Medizintechnik zu finden sind, ohne die Einbringung von Fremdmaterialien diffraktiv kennzeichnen.



▲ Lineare Gitterstruktur auf Glaskohlenstoff.
Linear grating structure on glassy carbon.

Im Rahmen eines vom BMBF geförderten Verbundprojektes (HoloMark II) wird das Verfahren insbesondere für Spritzgusswerkzeuge weiter entwickelt und optimiert. Hierdurch eröffnet sich die Möglichkeit, Kunststoffbauteile mit diffraktiven Sicherheitskennzeichnungen in industrietauglicher Prozessgeschwindigkeit zu versehen. Hierbei ist ein zentraler Punkt die Haltbarkeit des Prägestempels (Zahl der Abformzyklen). Sie lässt sich durch zwei Maßnahmen effektiv erhöhen, um eine optimale Wirtschaftlichkeit zu erzielen. Einerseits soll eine große Strukturtiefe realisiert werden, andererseits sollten Hartbeschichtungen für das Stempelwerkzeug eingesetzt werden. Wir konnten zeigen, dass unsere kurzpulslaserbasierte Beschriftungstechnologie beide Bedingungen in idealer Weise erfüllen kann.

Neben der Strukturierung von Hartmetall wurde auch die Bearbeitung harter Beschichtungen, wie laskohlenstoff und ZrO_2 , demonstriert. Die Strukturierung dieser Materialien wurde in Abhängigkeit der Laserparameter untersucht und optimiert. Dabei wurden die Erzeugung diffraktiver Strukturen mit einer Strukturtiefe von bis zu 1 μm und eine hervorragende Haltbarkeit (mehr als 1 Mio. Abformzyklen) nachgewiesen. Darüber hinaus haben wir die Erzeugung komplexer Strukturen durch Mehrfachbestrahlung demonstriert.

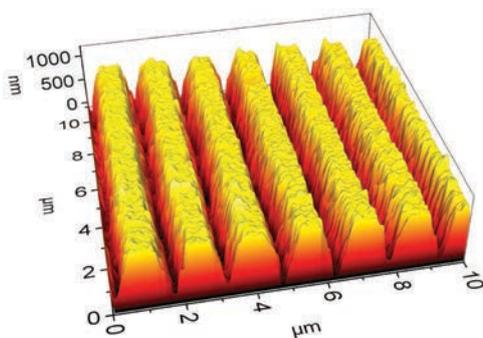
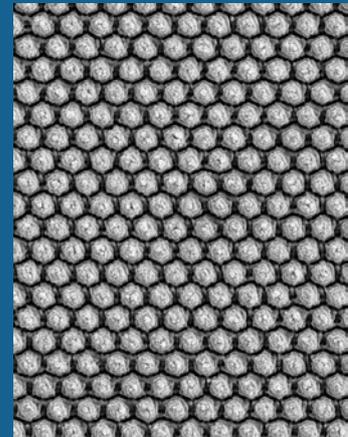
Komplexe diffraktive Struktur, erzeugt durch Mehrfachbestrahlung. ►
Complex diffractive structure fabricated by repeated irradiation.

Kurze Pulse / Nanostrukturen

Short Pulses / Nanostructures

Diffractive patterning by laser direct writing of complex holographic security features on hardened steel and hard coatings

Holographic security features, as known from banknotes or bank cards, are well suited for fraud resistant labeling of genuine parts and can additionally be used as interesting design elements. Today, such holographic labels, in form of metalized polymer foils, bonded to the surface of products and packages are well established and widespread. In order to produce a similar security marking integrated directly into high value metal parts, we developed a laser based direct-writing technology. In this way, diffractive marking of massive metallic parts for e.g. the automotive, aerospace or medical industry became possible, without the need of extraneous material.

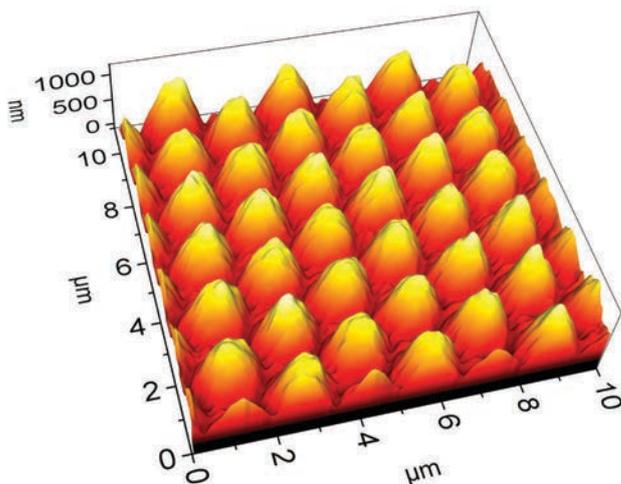


◀ Lineare Gitterstruktur auf ZrO_2 mit einer Strukturtiefe von ca. $1 \mu m$.
Linear grating structure on ZrO_2 with a structural depth of $\sim 1 \mu m$.

In a research project funded by the German Federal Ministry of Education and Research (BMBF) our laser-based direct-writing technology is being further developed and optimized, in particular for stamping tools. This enables the fabrication of holographic security features on injection molded plastic parts with very high process velocities.

In this application, a central figure of merit is the durability of the injection molding tool (number of injection cycles). This can be improved by realizing a large depth of the structures and applying hard coatings on the stamping tools. We demonstrated that our technology fulfills both criteria in an ideal manner.

Besides hard metals, the processing of hard coatings like glassy carbon and ZrO_2 was successfully demonstrated. The structure formation on these materials was examined and optimized. A structural depth of up to $1 \mu m$ and excellent durability (over 1 million injection cycles) was verified. In addition, the generation of complex diffractive structures by repeated irradiation was also demonstrated.

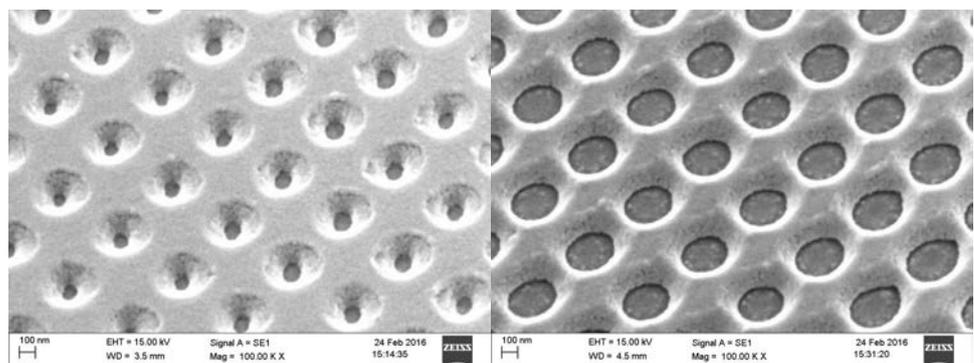


Kurze Pulse / Nanostrukturen

Short Pulses / Nanostructures

Glas-Nanostrukturierung

Die Laserstrukturierung von Glas mit 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 IR 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 dazu geeignet, kontrolliert 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 der diffraktiven Markierung von Glasoberflächen. Für die Bearbeitung von Quarzglas ist selbst eine Wellenlänge von 193 nm nicht perfekt geeignet. Erst bei 157 nm wird eine hinreichende Absorption erreicht, die präzise Strukturierungen ermöglicht. Alternativ können Strukturen in Quarzglas mit folgendem Verfahren erzeugt werden: Das Quarzglas wird mit substöchiometrischem Siliziumoxid (SiO_x) beschichtet. SiO_x ist stark UV-Licht-absorbierend und kann somit bei 193 nm oder 248 nm laserstrukturiert werden. Anschließend wird das Material in einem Temperprozess unter Erhalt der eingebrachten Struktur zu SiO_2 , also Quarzglas, oxidiert. Unter Verwendung einer Kreuzgitterphasenmaske konnte so das parallele Nanolochbohren mit einem ArF-Laser demonstriert werden (R. Karstens et al., Optics and Laser Technology 83, 16 (2016)). Lochraster mit 500 nm Rasterabstand und mehr als 100 nm Lochtiefe wurden auf diese Weise hergestellt. Dabei können Lochform und Lochgröße über die lokale Laserfluenz gesteuert werden.



▲
Lochraster in Siliziumoxid, hergestellt durch Laserablation bei 193 nm mittels Phasenmaskenprojektion. Links: moderate Laserfluenz, rechts: niedrige Laserfluenz.

Hole arrays in silicon oxide, made by laser ablation at 193 nm using phase mask projection.

Left: moderate laser fluence, right: low laser fluence.

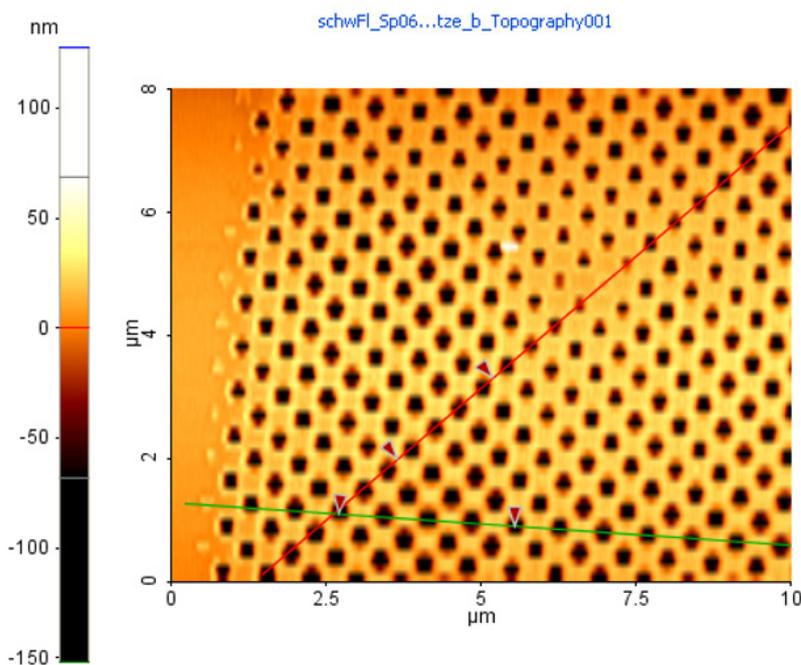
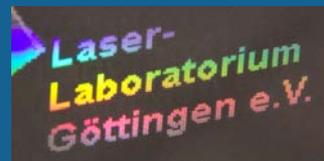
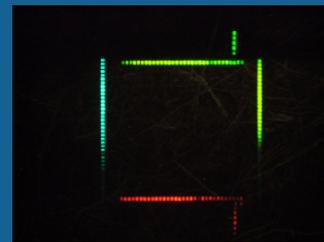
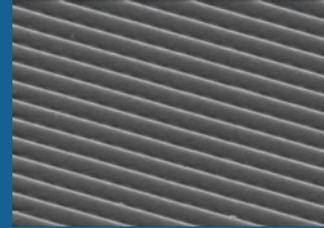
Kurze Pulse / Nanostrukturen

Short Pulses / Nanostructures

Nanopatterning of glass

Precise, high-resolution laser patterning of glass materials is still a challenging task. As glass is transparent from the near UV, through the visible, to the near infrared spectral ranges, for the ablative structuring of glass either IR or deep-UV lasers are applied. As 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 reliably obtain 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.

For the processing of pure fused silica, even the laser wavelength of 193 nm does not fit well. Only at 157 nm is the absorption sufficient for precise ablation. Alternatively, fused silica can be patterned by the following method: the silica glass is coated with substoichiometric silicon oxide (SiO_x). SiO_x is strongly UV-absorbing and can be processed with a standard laser at 193 nm or 248 nm. Afterwards the material is oxidized to SiO_2 by an annealing process while preserving the generated pattern. Using a cross-grating-mask, parallel hole drilling with an ArF-excimer laser has been demonstrated (R. Karstens et al., Optics and Laser Technology 83, 16 (2016)). Hole arrays with 500 nm pitch and more than 100 nm depth could be fabricated in this way. The size and shape of the holes can be controlled by the local laser fluence.



AFM-Aufnahme eines Lochrasters in Kalk-Natron-Glas, hergestellt durch Laserablation bei 193 nm.

AFM-record of a hole array in soda-lime glass made by laser ablation at 193 nm.

Kurze Pulse / Nanostrukturen

Short Pulses / Nanostructures

Laserbasierte Herstellung von Mikrooptik

Die Herstellung von Mikrooptiken für hochintegrierte Mikrosysteme kann in vielen Fällen durch die direkte Bearbeitung und Strukturierung mittels Laserablation erfolgen. Zur Bearbeitung von Glaswerkstoffen sind in der Regel Wellenlängen im kurzwelligen UV-Bereich (zum Beispiel 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 Anwendung liegt in der optischen Verbindungstechnik für komplexe Datenkommunikationssysteme, in denen die Signale über optische Wellenleiter geführt werden. Für die effiziente Kopplung des Lichts zwischen Lichtquellen, Wellenleitern und Detektoren sind Mikrolinsen erforderlich. Die Linsen müssen in die Leiterplatte bzw. in so genannte Glas-Interposer integriert werden und werden idealerweise als Fresnel-Linsen ausgeführt.

Ein weiteres Beispiel sind hybride mikrooptische Abbildungssysteme, in denen Elemente Gradientenindex (GRIN) 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 werden. Durch geeignete Laserbearbeitung können zylindrische Mikrooptiken wie GRIN-Linsen, Stablinen oder optische Fasern auch mit refraktiven (Freiform) Flächen versehen werden. Die hybriden optischen Elemente können zum Beispiel in Abstandssensoren oder in farbkorrigierten Mikroobjektiven mit hoher numerischer Apertur für die Endoskopie eingesetzt werden.



◀ Schematische Darstellung einer hybriden Mikrooptik, die eine Gradientenindex-Linse mit einer Fresnellinse kombiniert. Schematic representation of a hybrid microoptical element combining a gradient index lens with a Fresnel lens on the front surface.

Phasenmasken oder Phasenplatten aus Quarzglas werden zum Beispiel als diffraktive Masken in der Lasermikrostrukturierung oder für die strukturierte Beleuchtung und die Erzeugung bestimmter Fokusgeometrien in der hochauflösenden Mikroskopie eingesetzt. Da Quarzglas nicht mit ausreichender Präzision durch direkte Laserbearbeitung strukturiert werden kann, wird ein Verfahren angewendet, bei dem ein Quarzglassubstrat mit Siliziumsuboxid (SiO_x) beschichtet wird. Die Dicke dieser Schicht wird dabei auf die benötigte Phasenverzögerung abgestimmt. Um das gewünschte Phasenprofil zu erhalten, wird die im UV absorbierende Schicht durch Laserablation abtragend strukturiert und in einem anschließenden Temperprozess in UV-transparentes SiO_2 umgewandelt, so dass man eine hochtransparente und strahlungsfeste Phasenmaske aus reinem Quarz mit Beugungseffizienzen nahe am theoretischen Maximum erhält.

Kurze Pulse / Nanostrukturen

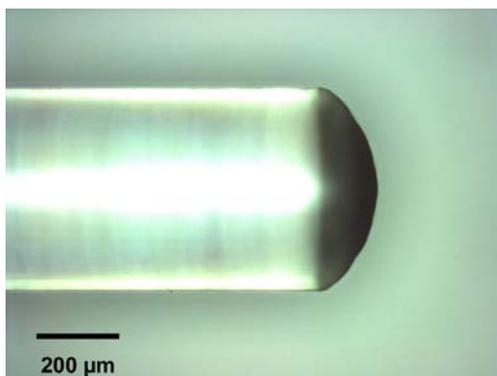
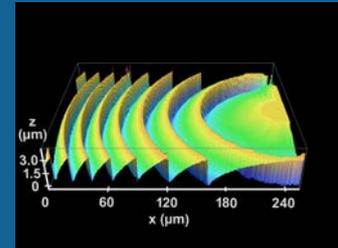
Short Pulses / Nanostructures

Laser based fabrication of micro optics

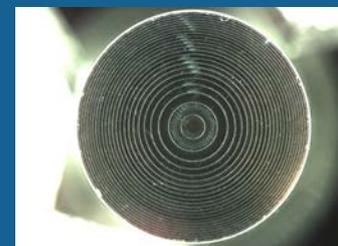
The fabrication of micro optical components for highly integrated microsystems can often be accomplished by direct laser processing. The machining of glass materials usually requires wavelengths in the deep UV range (193 nm or 157 nm).

One example for the laser based fabrication of micro-optical elements is the fabrication of Fresnel lenses. Due to their flat design, they allow a low construction height in the range of a few micrometers and easy integration with planar surfaces. An application example is the provision of optical interconnects for data communication systems based on optical waveguides. For the efficient coupling between light sources, waveguides and detectors, micro lenses are required. The lenses need to be integrated into the electro-optical circuit boards or in so-called glass interposers.

Another example is hybrid micro-optical imaging systems 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 vital benefit of the laser-structured lenses is the monolithic bonding to the GRIN-elements, leading to significantly simplified adjustment and packaging, and improved durability. Using suitable laser processing, cylindrical micro-optics such as GRIN lenses, rod lenses or optical fibers might also be provided with refractive (free-form) surfaces. The hybrid optical elements can serve as a basis for optical sensors or color-corrected microscope objectives with high numerical aperture.



◀ Mikroskopaufnahme einer refraktiven Linse auf der Endfläche einer Gradientenindex-Linse.
Microscope image of a refractive lens on the end face of a gradient index lens.



Phase masks or phase plates from fused silica are used in the form of diffractive masks for laser micro processing or for structured illumination or the generation of specific focus geometries in high-resolution microscopy. As fused silica cannot be patterned with sufficient precision by direct laser machining, we established a patented process using a precursor layer of silicon suboxide (SiO_x) on a quartz glass substrate. The thickness of the SiO_x layer has to match the required phase delay. To obtain the desired phase profile, the UV absorbing layer is structured by spatially resolved laser ablation and converted into UV transparent SiO_2 in a subsequent annealing process. The result is a highly transparent and highly resistant pure quartz mask with diffraction efficiencies close to the theoretical maximum.

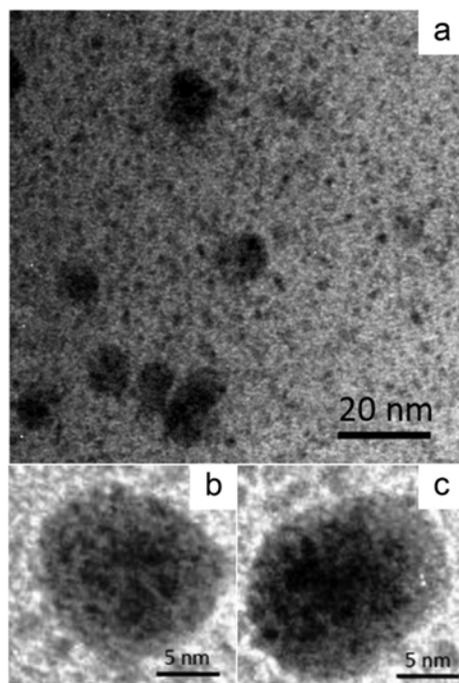
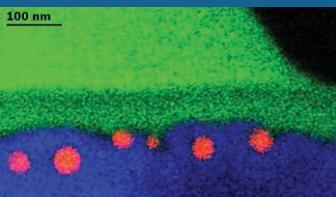
Kurze Pulse / Nanostrukturen

Short Pulses / Nanostructures

Erzeugung plasmonischer Nanopartikel in Glas

Erzeugung und kontrollierte Anordnung metallischer Nanopartikel sind Grundvoraussetzungen für die Herstellung plasmonischer Komponenten. Silbernanopartikel in einer Glasmatrix sind besonders interessant, da ihre Plasmonenresonanz (SPR) spektral deutlich vom Bereich der Interbandübergänge getrennt ist, so dass 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.

Um die Herstellung von Silbernanopartikeln in präzise definierten Bereichen zu ermöglichen, wurden Laserexperimente in Kooperation mit dem Institut für Physik der Universität Halle-Wittenberg durchgeführt. Dazu wurde ionenaustauschtes Glas mit einem ArF-Excimerlaser (Wellenlänge 193 nm) bei Fluenzen unterhalb der Ablationsschwelle im Multipulsbetrieb bestrahlt. Transmissionselektronenmikroskopische Untersuchungen zeigen, dass sich kleine Silbernanopartikel (1-3 nm) und größere Agglomerationen von kleinen Partikeln mit Abmessungen von 5-16 nm bilden. Die Extinktionsspektren zeigen einen Anstieg des Plasmonenresonanzpeaks bei 435 nm mit zunehmender Pulszahl. Eine strukturierte Bestrahlung der Glasoberfläche mittels Projektion einer Phasenmaske erlaubt die räumlich definierte Partikelbildung mit μm -Auflösung (M. Heinz et al., *Journal of Alloys and Compounds* **681**, 307 (2016)).



Transmissionselektronenmikroskopische Bilder von Silbernanopartikeln nach Bestrahlung von ionenaustauschtem Glas mit 5000 ArF-Laserpulsen bei $100 \text{ mJ}/\text{cm}^2$. (a) Überblick, (b, c) Detailansicht von Agglomerationen kleiner Partikel.

Transmission electron microscope images of Ag nanoparticles formed by 5000 ArF-laser pulses at $100 \text{ mJ}/\text{cm}^2$. (a) Overview, (b,c) detailed view of agglomerations of small particles.

Optische Absorptionsspektren von laserbestrahltem Ag/Na-ionenaustauschtem Glas. Simulationen (gepunktete Linien) zeigen, dass Silberpartikel, -ionen und -atome sowie Defektzentren (HTC) zu dem gemessenen Spektrum (durchgezogene Linie) beitragen.

Optical absorption spectra of laser irradiated Ag/Na ion-exchanged glass. Simulations (dotted lines) show that Ag particles, Ag ions, Ag atoms and defect centers (HTC) contribute to the measured spectra (solid lines).

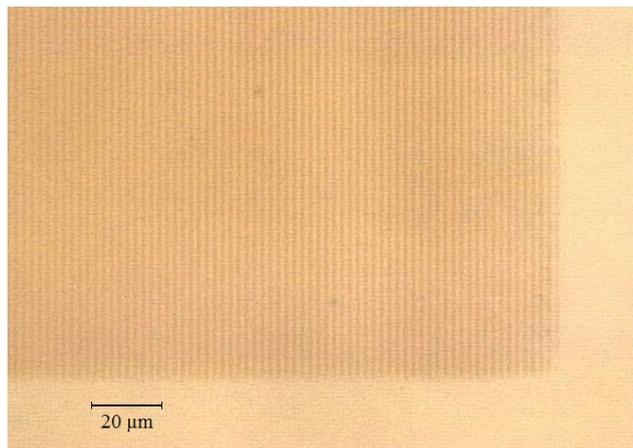
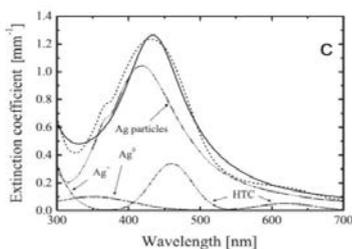
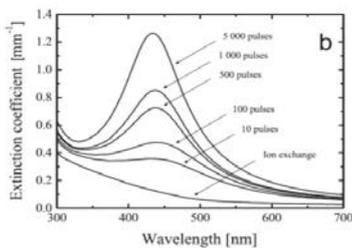
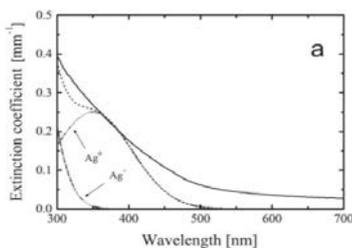
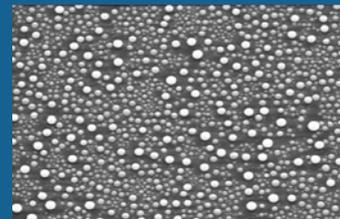
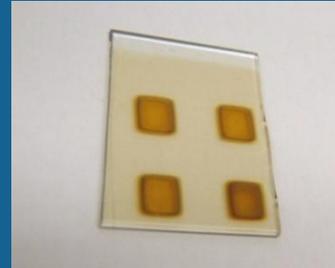
Kurze Pulse / Nanostrukturen

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 nanoparticles in glasses are attracting particular attention since the wavelength of their surface plasmon resonance (SPR) is distinctively separated from the wavelengths of interband absorption, making such materials promising candidates for applications in optoelectronics and nanoplasmonics. Typically, silver nanoparticles in sodium silicate glasses are prepared by $\text{Ag}^+ \leftrightarrow \text{Na}^+$ ion exchange process and subsequent thermal treatment. However, this method does not allow creating nanoscaled arrays of particles localized in a certain way.

In collaboration with the Institute of Physics of the University of Halle-Wittenberg, laser experiments have been performed in order to develop a locally controlled process. The formation of silver nanoparticles near the surface of ion exchanged sodium silicate glasses is accomplished by multipulse excimer laser irradiation (ArF, 193 nm) at fluences below the ablation threshold. Transmission electron microscope (TEM) investigations show that small Ag particles (1-3 nm) and larger agglomerations of small particles (5-16 nm) are formed. Extinction spectra show a growing plasmon absorption peak around 435 nm with increasing pulse number. Patterned irradiation of the glass using phase mask projection allows the localized formation of particles with μm -resolution (M. Heinz et al., Journal of Alloys and Compounds **681**, 307 (2016)).



▲
Linienmuster aus Bereichen mit und ohne Silberpartikel, das durch strukturierte Bestrahlung mit einer Phasemaske hergestellt wurde.
Line pattern of laser modified glass (with/without Ag particles) obtained by structured irradiation with a phase mask.

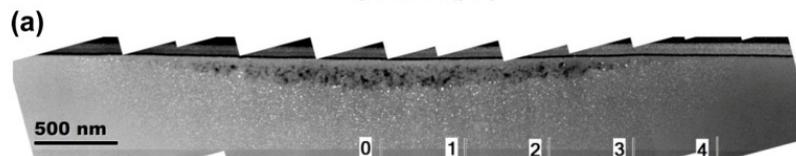
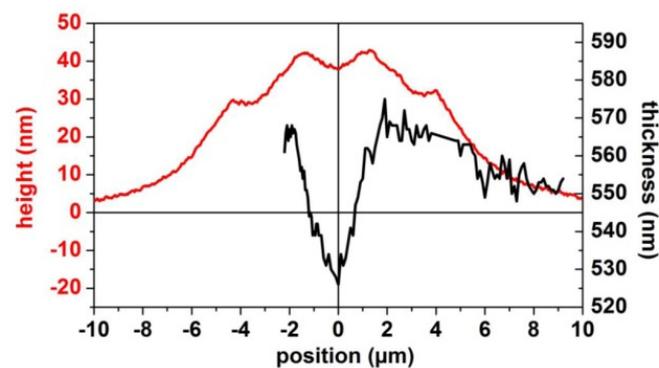
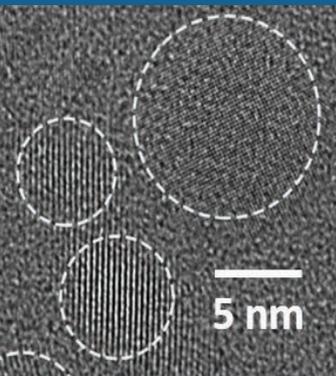
Kurze Pulse / Nanostrukturen

Short Pulses / Nanostructures

Si-Nanokristalle

Si-Nanokristalle (Si-NC) sind als potentielle 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 den in der Regel verwendeten 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 Ofentempnern erforderlichen Temperaturen nicht vertragen (zum Beispiel Borosilikatgläser). In unserem Ansatz wird ein kontinuierlich emittierender Laser mit 405 nm Wellenlänge für die Phasenseparation von SiO_x verwendet (T. Fricke-Begemann et al., J. Appl. Phys. 118, 124308 (2015)). Dabei konnte die Bildung von Si-Nanokristallen ohne die bei bisherigen Laserversuchen beobachtete Oberflächenschädigung erreicht werden. Dies belegen Photolumineszenz- und Ramanmessungen sowie transmissionselektronenmikroskopische (TEM) Untersuchungen (IV. Physikalisches Institut, Georg-August-Universität Göttingen). Bei höheren Intensitäten bildet sich im Zentrum der Bestrahlung poröses SiO_2 -Material, die Oberfläche bleibt weiterhin intakt. Amorphe Si-Cluster bilden sich bei geringeren Laserleistungen vorwiegend in den Randbereichen der Bestrahlung. Derartige zerstörungsfreie Prozessbedingungen sind für die Herstellung von Bauteilen für photonische Anwendungen wie zum Beispiel Lichtwellenleiter erforderlich.



Die Bildung von Si-Nanokristallen wird von Oberflächen- und Volumenänderungen mit Abmessungen im 10-nm-Bereich begleitet. Oben sind das mit dem AFM gemessene Oberflächenprofil (rot) und die im TEM gemessene lokale Schichtdicke (schwarz) aufgetragen. Unten eine TEM-Aufnahme mit Nanokristallen (weiß) und poröser Zone (schwarz).

The formation of Si-nanocrystals is accompanied by changes of the surface and the volume in the 10-nm-range. Top: surface profile measured with AFM (red) and local film thickness measured with TEM (black). Bottom: TEM cross section with nanocrystals (white) and porous zone (black).

Kurze Pulse / Nanostrukturen

Short Pulses / Nanostructures

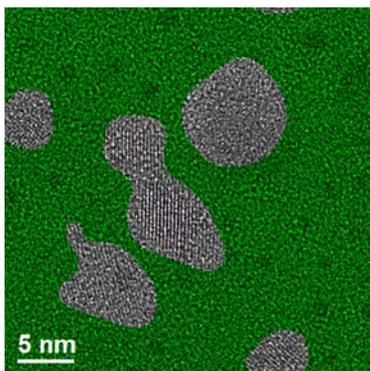
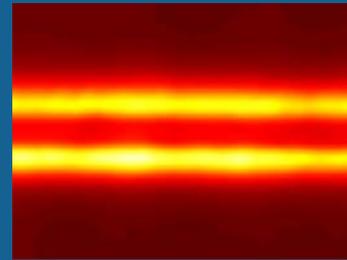
Si nanocrystals

Silicon nanocrystals (Si-NC) are of interest as integrated light emitters in silicon based photonics. They are mainly fabricated by high temperature annealing of substoichiometric SiO_x , also known as silicon-rich silicon 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 via a spatially selective process. Furthermore, the thermal load of the substrate can be reduced, thereby allowing materials and components that do not permit high temperatures (e.g. borosilicate glass).

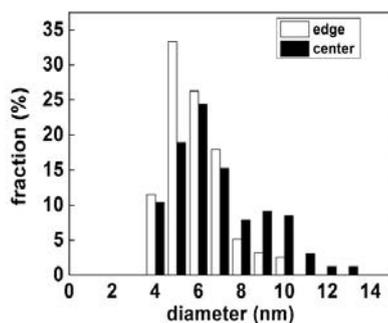
In a new approach we apply a continuous wave laser emitting at 405 nm for the laser induced phase separation in SiO_x films (T. Fricke-Begemann et al., J. Appl. Phys. 118, 124308 (2015)). In this way, the formation of Si-nanocrystals could be accomplished without any deterioration of the surface, which has been observed in most of the previously performed laser annealing experiments. This is proved by photoluminescence and Raman measurements and by transmission electron microscopy (University of Göttingen). At higher laser power the central irradiated region is oxidized to SiO_2 and exhibits a porous character, while the surface remains optically smooth. Amorphous Si-nanoclusters are formed mainly at lower laser power and at the margin of the lines written at higher power.

The results show that appropriate laser parameters can lead to the formation of Si-nanocrystals without degrading the optically smooth surface. Such conditions are necessary for fabricating devices like waveguides for photonic applications.



- ◀ Hochaufgelöste transmissionselektronenmikroskopische Aufnahme von kristallinen Si-Nanopartikeln. Mit Hilfe eines Mustererkennungsalgorithmus ermittelte Si-NC-Bereiche (in Grau) weisen eine unregelmäßige Form auf (M. Seibt, Univ. Göttingen).

High resolution transmission electron microscope image showing crystalline Si-nanoparticles. Pattern recognition reveals crystalline particles (grey) embedded in an amorphous matrix (green). (M. Seibt, Univ. Göttingen).



- ◀ Größenverteilung der Si-Nanokristalle nach Laserbestrahlung mit $1,4 \times 10^5 \text{ W/cm}^2$ im Zentrum (schwarze Balken) und am Rand (weiße Balken) der Nanokristalle enthaltenden Region.

Size distribution of Si nanocrystals after laser irradiation at $1.4 \times 10^5 \text{ W/cm}^2$ obtained from the center (filled bars) and edge (open bars) of the nanocrystal containing region.

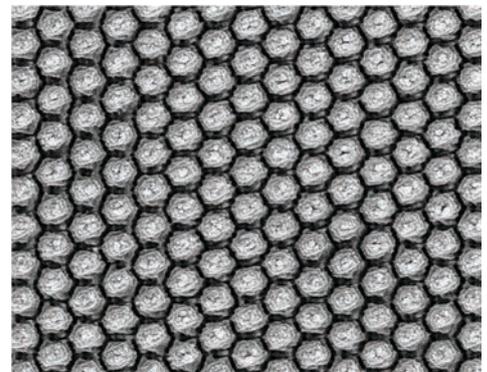
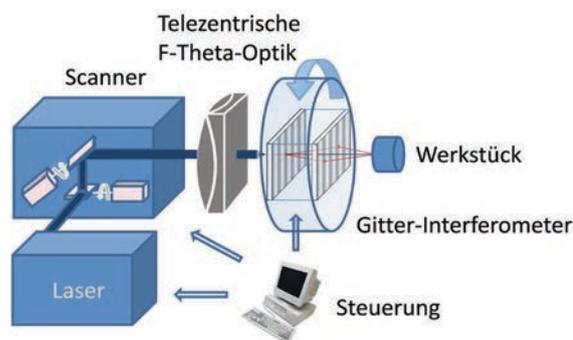
Kurze Pulse / Nanostrukturen

Short Pulses / Nanostructures

Adhäsionsreduzierte Traumaimplantate

Die am LLG entwickelte Beschriftungstechnologie zur direkten Erzeugung periodischer Mikro- und Nanostrukturen mittels Laserablation kann auch zur Biofunktionalisierung von Oberflächen eingesetzt werden. Dies wurde im Rahmen eines IGF-Projektes in Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung (IFAM) in Bremen erfolgreich gezeigt. Medizinischer Edelstrahl, wie er für Traumaimplantate oder Marknägel bei der Osteosynthese verwendet wird, wurde mit verschiedenen periodischen Mustern versehen und dann wurde die Initialadhäsion von Osteoblasten untersucht. Ziel war es, eine Oberfläche mit reduzierter Zelladhäsion zu erzeugen, da für die Implantatentnahme ein Anwachsen von Knochenzellen am Implantat von großem Nachteil ist.

In der Vergangenheit wurde eine Reduzierung der initialen Zelladhäsion bereits für lineare Gitter von 1-1,5 μm Periode auf medizinischem Edelstahl nachgewiesen. Durch die Erweiterung des Versuchsaufbaus um eine hochpräzise Rotationsachse konnten durch Mehrfachbestrahlung nun auch gekreuzte Gitter erzeugt werden, wodurch sich je nach Verstellwinkel und Anzahl der Bestrahlungen komplexe Geometrien ergeben. Dabei kamen als Grundperiode 1,5 μm -Gitterlinien zum Einsatz.



▲ Links: Aufbau des Gitterinterferometers mit Laserscanner und hochpräziser Rotationsachse; rechts: REM-Aufnahme einer durch Dreifachbestrahlung (-60° , 0° , 60°) erzeugten hexagonalen Struktur.
left: Setup for the grating interferometer with laser scanner and high-precision rotation stage; right: SEM-image of a hexagonal structure produced by threefold laser irradiation (-60° , 0° , 60°).

Kurze Pulse / Nanostrukturen

Short Pulses / Nanostructures

Trauma implants with reduced cell adhesion

The marking technology developed at the LLG for direct writing of periodic micro- and nanostructures through laser ablation can be used for the bio-functionalisation of surfaces. This has been shown successfully during a project in collaboration with the Fraunhofer Institute for Manufacturing Technology and Advanced Materials (IFAM) in Bremen. Different periodic structures were fabricated on the surface of medicinal stainless steel, which is used for trauma implants or intramedullary rods in the osteosynthesis, and then the initial adhesion of osteoblasts was observed. The aim was to create a surface with reduced cell adhesion, because for implant removal the adherence of cells onto the implant poses a great disadvantage.

In the past we could show a reduction of the initial cell adhesion in case of linear grating structures with periods of 1 to 1.5 μm on medicinal stainless steel. The setup has since been retrofitted with a high-precision rotation stage such that repeated laser treatment allows for the creation of crossed gratings which can result in complex geometries. The underlying base period was a 1.5 μm linear grating.

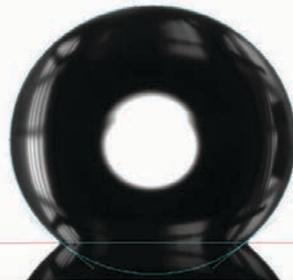
Thus, a series of different structures (e.g. crossed lines at various angles, hexagonal geometries) was biologically tested with MG63 osteoblasts-like cells, in order to study the initial adhesion after 24 h. Here all tested microstructures showed a clear reduction of the cell-coated area by up to 40 %, as well as of the cell number by up to 30 %. The best structure was a crossed grating configuration of 1.5 μm periodicity with a crossing angle of 45°.

Referenz: $\Theta = 142(3)^\circ$

25 kGy: $\Theta = 143(2)^\circ$

50 kGy: $\Theta = 139(2)^\circ$

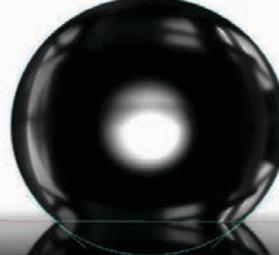
Referenz



50 kGy



25 kGy



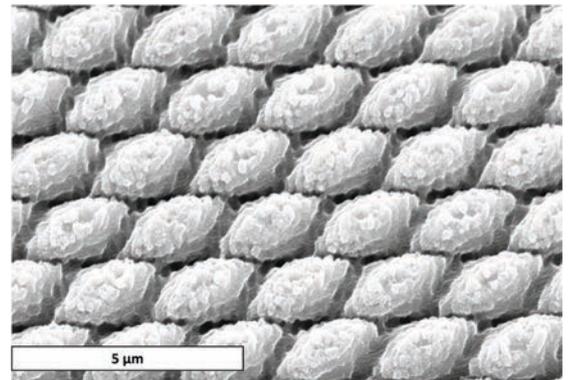
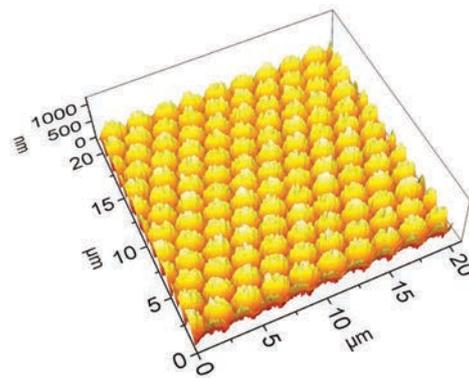
▲ Kontaktwinkelmessungen mikrostrukturierter Edelstahlproben nach Gammasterilisation. Es zeigt sich keine signifikante Änderung gegenüber der Referenz.

Contact angle of the micro structured stainless steel sample after gamma-irradiation. There are no significant changes compared to the reference.

Kurze Pulse / Nanostrukturen

Short Pulses / Nanostructures

Auf diese Weise konnten eine Reihe verschiedener Strukturen (zum Beispiel gekreuzte Linien unterschiedlicher Winkel, hexagonale Geometrien) zellbiologisch mit Osteoblasten der Zelllinie MG-63 (humane Osteoblasten) getestet werden, um die Initialadhäsion der Zellen nach 24 Stunden zu untersuchen. Dabei zeigten alle getesteten Mikrostrukturen eine deutliche Reduzierung der zellbedeckten Fläche um bis zu 40 % sowie der Zellzahl um bis zu 30 %. Als Optimum ergab sich eine Struktur mit gekreuzten Linien der Grundperiode 1.5 μm und einem Kreuzungswinkel von 45°.



links: AFM-Aufnahme der Struktur mit der bislang besten Zelladhäsionsreduktion. Linien mit 1,5 μm Periode im 45°-Winkel gekreuzt, Strukturtiefe ca. 800 nm. rechts: zugehörige REM-Aufnahme.

left: AFM-image of the structure with the best reduction of cell adhesion achieved so far. Line gratings of 1,5 μm periodicity, crossed at 45° angle, structural depth approx. 800 nm.

right: corresponding SEM-image.

Zu Demonstrationszwecken wurde erstmals auch ein echtes Traumaimplantat mit den lasererzeugten Mikrostrukturen versehen und die Wirtschaftlichkeit der Laserbeschriftung abgeschätzt. Die Kosten für die Strukturierung bei einer industriellen Umsetzung des Verfahrens konnten für das verwendete Implantat (20 cm^2) auf 2,70 € pro Werkstück für lineare Gitter und auf 4,30 € für gekreuzte Gitter abgeschätzt werden.

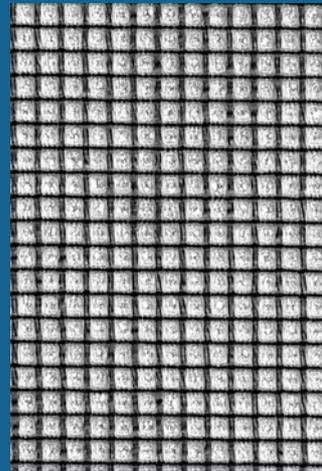
Es wurde zudem überprüft, ob die Strukturen beständig gegenüber dem Prozess der Gammasterilisation sind, der in der Medizin für Implantate üblich ist. Hier zeigt sich der Vorteil einer Oberflächenfunktionalisierung durch Laserablation gegenüber additiven Verfahren, bei denen eine Beschichtung aufgetragen wird. Da das Ausgangsmaterial praktisch unverändert bleibt und nur die Struktur der Oberfläche geändert wird, ist die Oberflächenmodifikation unabhängig vom Ausgangsmaterial sehr beständig. Für den verwendeten medizinischen Edelstahl konnte keine Veränderung der Mikrostrukturierung nach der Sterilisation bei mikroskopischem Vergleich mit Referenzproben (Lichtmikroskop und REM) festgestellt werden. Auch die Messung des Kontaktwinkels von Wasser zeigte keine signifikante Änderung der strukturierten Oberfläche durch den Prozess der Gammasterilisation.

Kurze Pulse / Nanostrukturen

Short Pulses / Nanostructures

For demonstration purpose an actual trauma implant was covered with laser ablated microstructures and the cost effectiveness of the laser marking process was estimated. The costs for the structuring of the considered implant (20 cm² surface area) in case of an industrial implementation of the process was estimated at 2.70 € per piece for linear gratings and 4.30 € for crossed gratings.

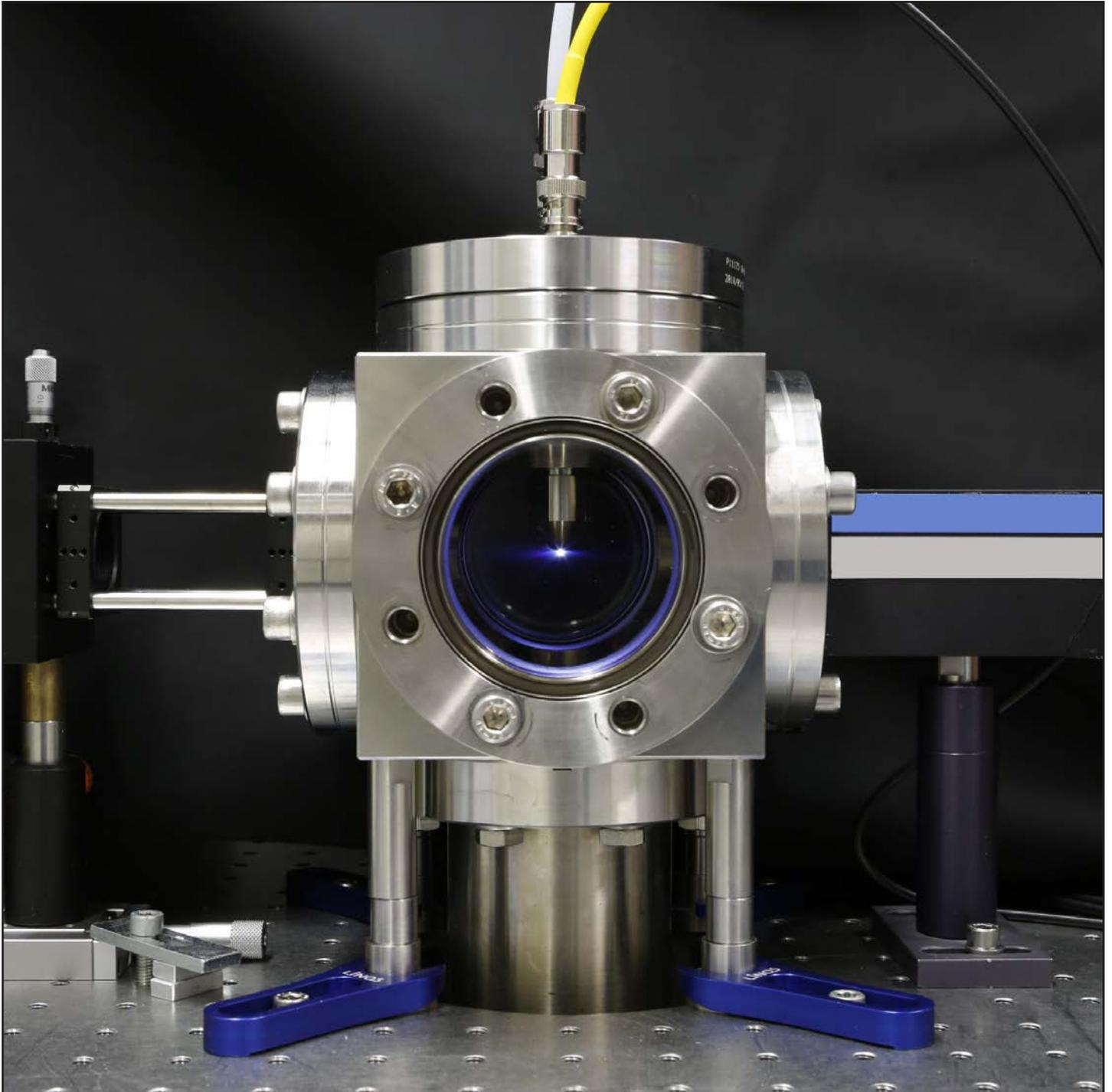
Further, it was examined if the microstructures are durable when subjected to irradiation with gamma rays, which is used for the sterilisation of implants in medicine. Here, surface functionalisation by laser ablation shows an advantage over additive procedures where a coating is applied. Since only the surface structure is modified while the original material is preserved, the durability of the surface modification only depends on the original material. For the tested medicinal stainless steel, the sterilisation through gamma-irradiation showed no changes in the microstructures compared to reference samples (by optical microscope and SEM). The contact angle for water also showed no significant change of the structured surface due to the gamma-irradiation process.



Anschauungsmuster eines laserstrukturierten Traumaimplantates mit reduzierter Adhäsion von Knochenzellen.

Illustrative sample of a laser structured trauma implant with reduced adhesion of osteoblasts.

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, das heißt einerseits mit dem Abstrahlverhalten von Lasern, andererseits auch mit der Charakterisierung von Hochleistungsoptiken zur Strahlführung. Der Schwerpunkt liegt auf den für die Halbleiterlithographie relevanten tiefen UV-Wellenlängen, alle anderen gebräuchlichen Laserwellenlängen sind aber ebenso verfügbar.

Es werden Messapparaturen zur umfassenden Bewertung der Qualität und der Strahlungsstabilität optischer Komponenten betrieben. Damit lassen sich unter anderem deren Absorption, thermische Linseneffekte, Zerstörungsschwellen sowie das Langzeitdegradationsverhalten präzise ermitteln. Zusätzlich werden die Propagations- und Kohärenzeigenschaften von Laserstrahlung vermessen, unter anderem 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 von 13,5 nm.

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

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

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



Dr. Klaus Mann
Abteilungsleiter

☎ +49 551/5035-41
☎ +49 551/5035-99
✉ klaus.mann@llg-ev.de

Mitarbeiter Staff members

Dr. Wilhelm Hüttner
Dr. Tobias Mey
Dr. Bernd Schäfer
Jens-Oliver Dette
Jonathan Holburg
Damian Jaster
Frank Christian Kühl
Maik Lübbecke
Matthias Müller
Meike Schellhorn
Martin Stubenvoll
Marvin Tammen

Optik / Kurze Wellenlängen

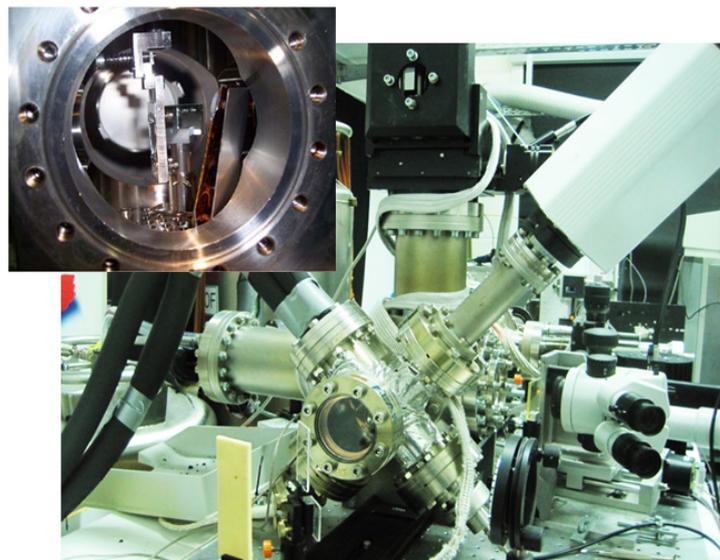
Optics / Short Wavelengths

Charakterisierung von Laseroptiken - Langzeitbestrahlungstests

Das Ziel der seit ca. 20 Jahren betriebenen Aktivitäten zur Optikcharakterisierung 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, zum Beispiel durch Farbzentrenbildung oder nichtlineare Effekte, von großer Bedeutung, vor allem bei den für die Halbleiter-Lithographie relevanten Wellenlängen von 248 nm und 193 nm.

Es werden diverse Messapparaturen zur quantitativen Erfassung der Verluste und der Stabilität laseroptischer Komponenten betrieben, wie zum Beispiel Laserkalorimeter, Photothermiemessplätze, Streulichtaufbauten und ratiometrische Transmissions-/ Reflexionsmessplätze. 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 von 1064 nm, 532 nm und 355 nm mit bis zu 150 Millionen Pulsen bestrahlt.



Teststand zur Bestimmung laserinduzierter Zerstörschwellen (LIDT) und für Langzeitbestrahlungstests unter Vakuumbedingungen.

Setup for measurement of laser-induced damage thresholds (LIDT) and for longterm irradiation tests under vacuum.

Optik / Kurze Wellenlängen

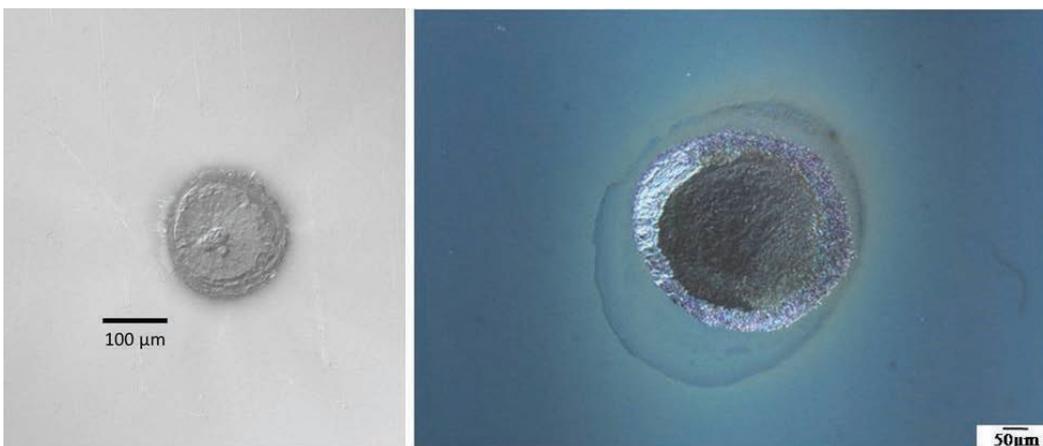
Optics / Short Wavelengths

Laser optics characterization - Long term irradiation tests

The aim of the activities on optics characterization, carried on for about 20 years now is to provide a deeper understanding of the basic mechanisms of interaction between intense laser radiation and optical materials in order to optimize the manufacturing and coating processes. While in earlier times major focus had to be put on measuring of short-term damage thresholds, now the degradation of UV optical materials e.g. by color center formation or non-linear effects is of great importance, especially for the semiconductor lithography wavelengths 248 nm and 193 nm.

Various setups 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.

As contract work for 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.
Morphologic damage of optical components during LIDT measurements.

Optik / Kurze Wellenlängen

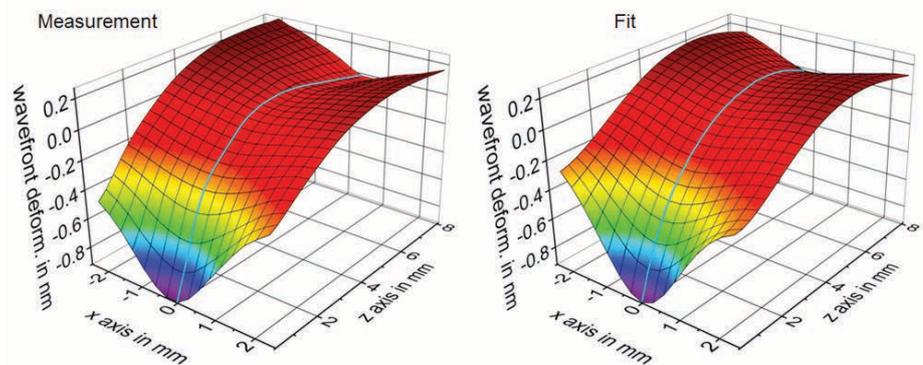
Optics / Short Wavelengths

Photothermische Absorptionsmessungen an anisotropischen Kristallen

Die Absorption von Laserstrahlung hoher Intensität an den Oberflächen oder Beschichtungen sowie im Volumen eines optischen Elements verursacht darin eine räumlich und zeitlich variierende Temperaturverteilung. Dies wiederum führt zu Brechungsindexgradienten im Material und damit zu einer "thermischen Linse". Bei nichtlinearen Kristallen für optisch-parametrische Prozesse resultiert daraus eine Verschiebung der Phasenanpassungsbedingung und folglich eine abnehmende Konversionseffizienz. Bei Anwendung als Pockelszelle in elektrooptischen Schaltern wirkt sich die thermisch induzierte Depolarisation durch ein verringertes Kontrastverhältnis nachteilig auf die Funktion aus. Obwohl die Absorption von Kristallen für diese Anwendungsbereiche in der Regel sehr gering ist, gewinnen die beschriebenen Phänomene bei höheren Laserleistungen bis in den Kilowattbereich immer größere Bedeutung.

Zur Beurteilung der thermischen Effekte im Kristall und einer möglichen Berücksichtigung im Systemdesign ist es erforderlich, die Absorptionseigenschaften durch eine umfassende Charakterisierung bei den verwendeten Wellenlängen zu bestimmen. Um sowohl Oberflächen- als auch Volumenabsorption bei nichtlinearen Kristallen zu trennen und quantitativ erfassen zu können, wurde ein bei optischen Gläsern bewährtes photothermisches Absorptionssystem für die Anwendung auf anisotrope optische Medien angepasst.

Das System basiert auf einem hochsensitiven Hartmann-Shack-Sensor, mit dessen Hilfe die Wellenfront eines Teststrahls beim Durchgang durch die Seitenflächen einer längs durchstrahlten Quaderprobe in Echtzeit überwacht wird. Durch die Temperaturabhängigkeit des Brechungsindex sowie die thermische Ausdehnung der Probe wird die zunächst ebene Wellenfront lokal unterschiedlich verzögert und dadurch deformiert. Mittels thermomechanischer Simulationsrechnungen lassen sich die transienten Wellenfrontmessungen kalibrieren und somit quantitative Werte für die Volumen- und Oberflächenabsorptionskoeffizienten ermitteln. Das Verfahren wurde sowohl an Kaliumtitanylphosphat (KTP) als auch an Betabariumborat (BBO) demonstriert.



▲
Vergleich zwischen gemessener und simulierter Wellenfront an KTP.
Comparison between measured and simulated wave front for KTP.

Optik / Kurze Wellenlängen

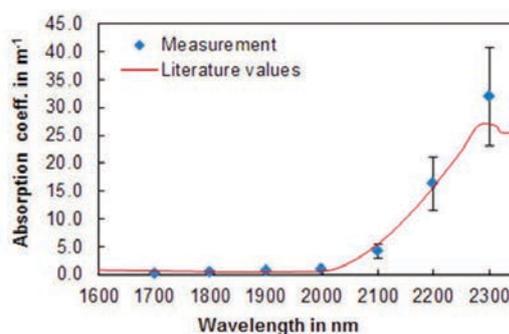
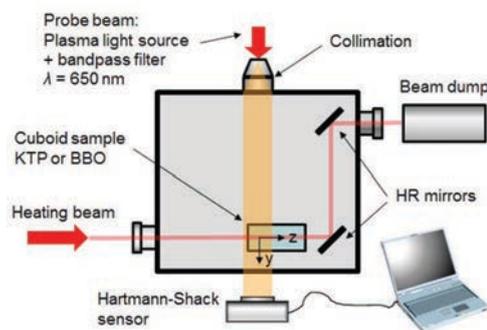
Optics / Short Wavelengths

Photothermal absorption measurements in anisotropic crystals

Absorption within the bulk and on the surfaces or dielectric coatings of an optical element under high power laser irradiation causes a spatially and temporally varying temperature distribution in the sample. In turn, this leads to local changes of the refractive index and thus results in the development of a "thermal lens". Moreover, in nonlinear crystals this has consequences on increased phase mismatch in optical parametric processes such as second harmonic generation which result in a decrease of conversion efficiency. If the anisotropic crystal is used in electro-optical devices such as Pockels cells, the thermally induced depolarization downgrades its performance and reduces the contrast ratio. Although the absorption of the anisotropic crystal is usually very low, with output powers at kilowatt level, the related effects can be significant.

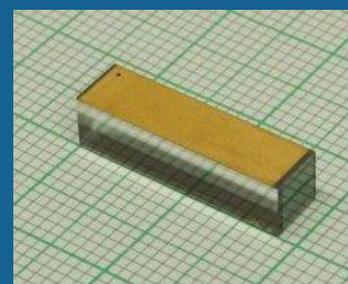
In order to estimate the influence of thermal effects and, possibly taking it into account in the optical system design, the comprehensive knowledge of material absorption at the operation wavelength is highly demanded. For quantitative determination of both surface and bulk absorptions in nonlinear optical crystals, a well-proven photo-thermal absorption measurement system for optical glasses has been extended to anisotropic optical media.

The system is based on a highly sensitive Hartmann-Shack wavefront sensor, accomplishing precise on-line monitoring of wavefront deformations of a collimated test beam transmitted through the side faces of a laser-irradiated cuboid sample. Caused by the temperature dependence of the refractive index as well as thermal expansion, the initially plane wavefront of the test beam is distorted. By comparison with thermal theory, a calibration of the acquired data is possible, yielding an absolute measure of bulk and surface absorption losses from the transient wavefront distortion. Measurements were performed for different KTP and BBO crystals.



▲ Versuchsaufbau zur photothermischen Absorptionsmessung an nichtlinearen Kristallen.
Experimental setup for photothermal absorption measurement on non-linear crystals.

▲ Vergleich zwischen gemessener und simulierter Wellenfront an KTP.
Comparison between measured and simulated wave front for KTP.

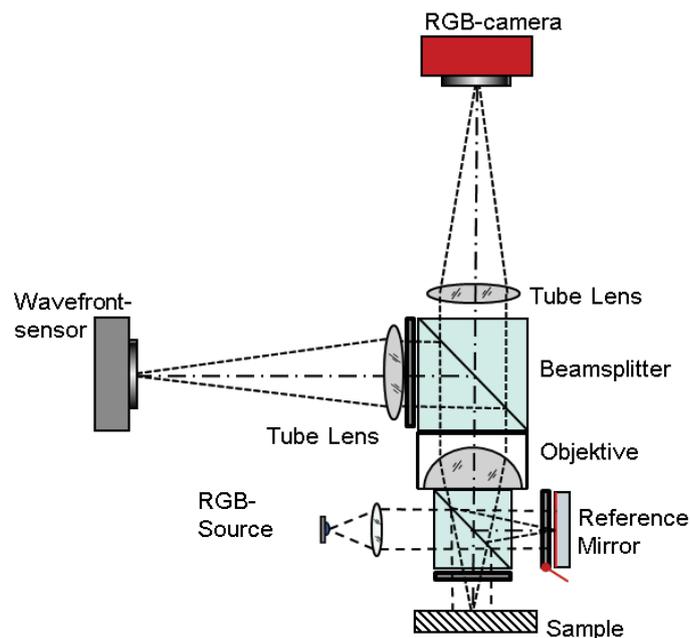


Optik / Kurze Wellenlängen

Optics / Short Wavelengths

Wellenfrontmikroskopie an optischen Oberflächen und Präzisionsbauteilen

Im Jahr 2016 startete zusammen mit den Projektpartnern Mahr GmbH, Universität Kassel und der 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.



Prinzip des RGB-Interferometers mit integriertem Wellenfrontmikroskop zur Oberflächenuntersuchung optischer Elemente und technischer Präzisionsbauteile. Durch den Teleskopstrahlengang 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.

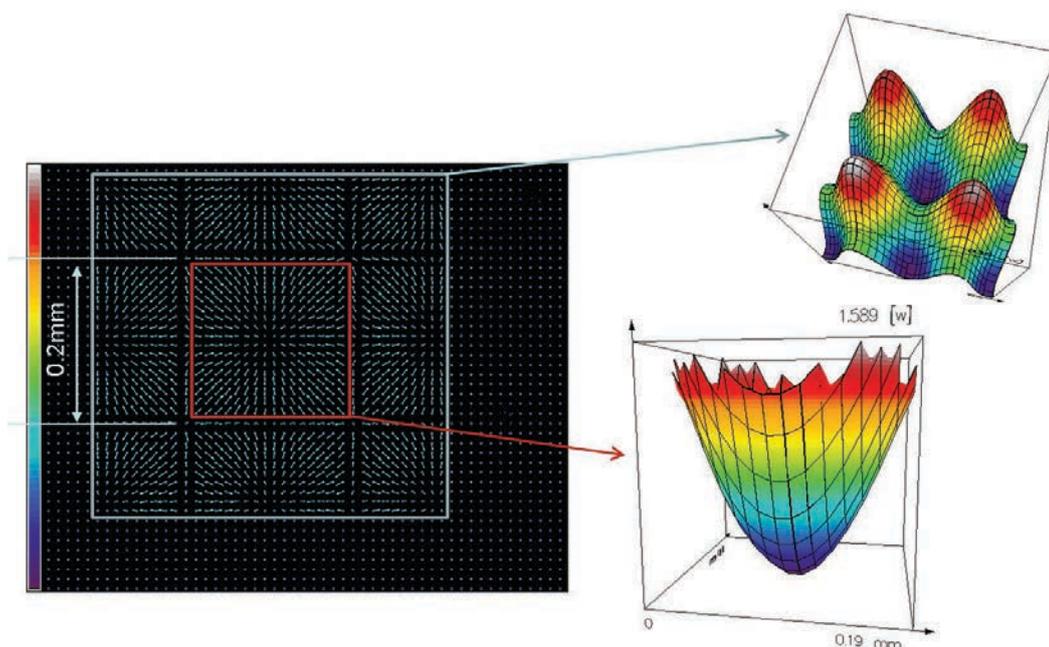
Experimental setup of the combined RGB-interferometer and wavefront microscope. The telescopic optical layout in 4f-arrangement enables the simultaneous imaging of amplitude and phase of the test beam. By a simple modification, the system can be operated either in reflection or in transmission mode.

Optik / Kurze Wellenlängen

Optics / Short Wavelengths

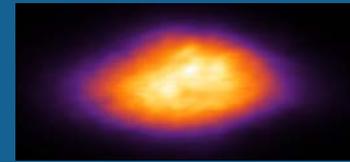
Wavefront microscopy for characterization of optical surfaces and precision assemblies

In 2016 the LLG commenced activities within the framework of the BMBF joint project FIHSIW. Main issue will be the development of a Hartmann-Shack based wavefront microscope for the 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), and as the wavefront sensor yields a unique albeit less detailed topography signal over the complete measurement area.



▲ Mit dem Wellenfrontmikroskop in Transmission aufgenommene Verteilung der Teilstrahlauslenkungen (linkes Bild) sowie der rekonstruierten Wellenfront (rechts) eines Teststrahls nach Passieren eines Mikrolinsenarrays (Linsenabstand $150\ \mu\text{m}$, Brennweite $5,2\ \text{mm}$). Der Abbildungsmaßstab von $18\times$ erlaubt die Charakterisierung der optischen Eigenschaften einzelner Mikrolinsen. Die im Bild unten rechts dargestellte Wellenfront des zentralen Ausschnitts einer einzelnen Mikrolinse besitzt einen Krümmungsradius von $5,3\ \text{mm}$.

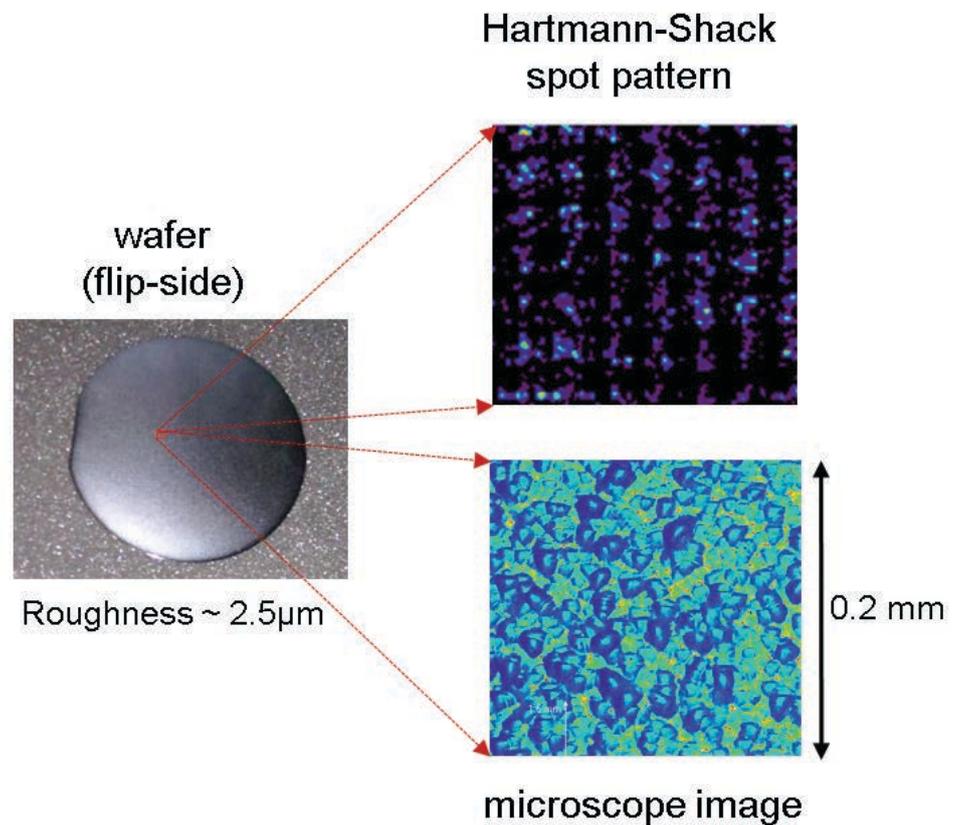
Spot pattern (left picture) and the wavefront deformation (diagrams on the right side) of a $450\ \text{nm}$ test laser introduced by a microlens-array (pitch $150\ \mu\text{m}$, focal length $5.2\ \text{mm}$) measured with the wavefront microscope in transmission. The lateral magnification of $18\times$ enables the characterization of the optical properties of single micro-lenses. The reconstructed wavefront distribution shown in the lower right yields a curvature radius of $5.3\ \text{mm}$.



Optik / Kurze Wellenlängen

Optics / Short Wavelengths

Entscheidende Bedeutung für die Anwendungsbreite des Wellenfrontmikroskops sowohl hinsichtlich des Einsatzes im Projekt FHISIW als auch darüber hinaus hat die präzise Bestimmung und eindeutige laterale Zuordnung der Schwerpunkte der einzelnen Teilstrahlen. Eine Problematik ergibt sich einerseits aus der Tatsache, dass technische Präzisionsbauteile häufig deutlich größere Oberflächenrauheiten als optische Elemente aufweisen. 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 Strahlableitung 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.



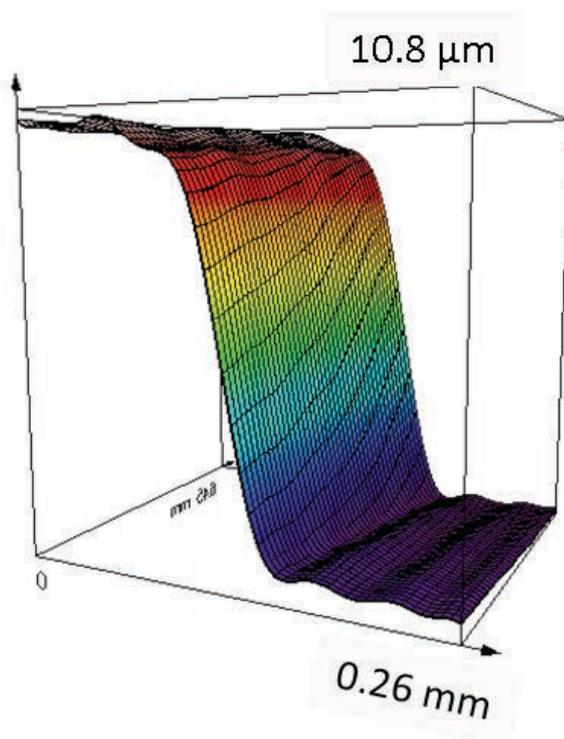
▲ Mit dem Wellenfrontmikroskop aufgenommene Verteilung der Wellenfront zur Vermessung der Oberflächenrauigkeit eines Wafers. Im Bild rechts oben sind die Verbreiterung der Spotgröße und das Auftreten von Speckles im Hartmann-Shack-Bild erkennbar. Die durch das Wellenfrontmikroskop rekonstruierte Oberfläche des Wafers ist rechts unten abgebildet.

Wavefront deformation of a wafer for surface roughness measurements. Spot blurring and speckles in the Hartmann-Shack spot pattern are shown in the upper right picture. The reconstructed wafer surface is displayed in the lower right image.

Optik / Kurze Wellenlängen

Optics / Short Wavelengths

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 as surface edges or refractive index jumps may cause large ray aberrations, thereby exceeding the dynamic range of the sensor. Both problems shall be tackled within the LLG part of the project by a combination of refractive and diffractive structures, as well as by the development of adapted deconvolution algorithms.



▲
Mit dem Wellenfrontmikroskop aufgenommene Verteilung der Wellenfront eines 543 nm Teststrahls unmittelbar hinter der ringförmigen Brechzahlinhomogenität einer Preform für optische Fasern. Der Abbildungsmaßstab von $\sim 30 : 1$ ermöglicht eine hinreichend gute räumliche Auflösung ($\sim 5 \mu\text{m}$), um den Verlauf des Brechungsindex über den Brechzahlssprung hinweg zu rekonstruieren.

Wavefront deformation of a 543 nm test laser beam introduced by the ring shaped refractive index barrier at the core-cladding interface of the preform for optical fibers. The magnification of 30 x yields a spatial resolution ($\sim 5 \mu\text{m}$) which is high enough to resolve the refractive index distribution over the interface.

Optik / Kurze Wellenlängen

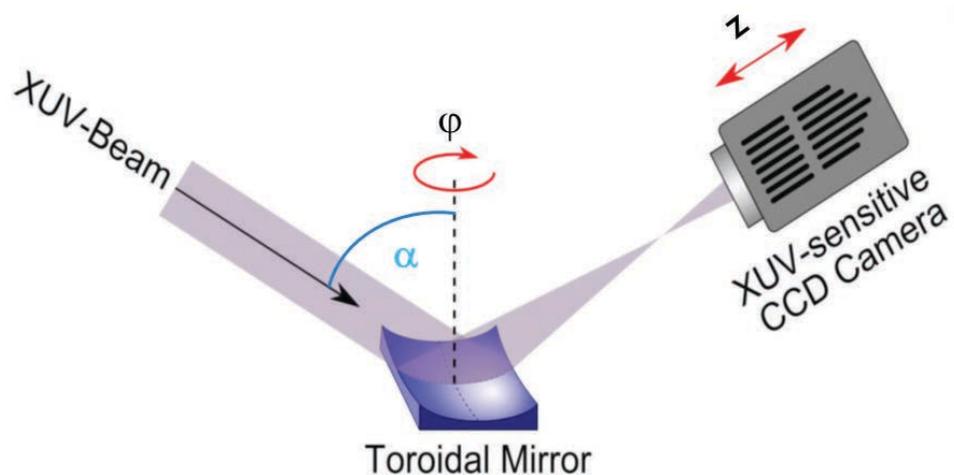
Optics / Short Wavelengths

Wignermessverfahren für den Freien-Elektronen-Laser FLASH

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

Zur Fortsetzung der Kooperation mit dem DESY in Hamburg wurde in den Jahren 2014-2016 ein experimenteller Aufbau unter Einsatz eines drehbaren Toroid-Spiegels zur Bestimmung der 4D-Wignerverteilung 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 Freie-Elektronen-Lasern geschaffen.



▲ Prinzip des experimentellen Aufbaus für die Messung der 4D-Wignerverteilung am Freie-Elektronen-Laser. Durch Verwendung eines drehbaren Toroidspiegels in Kombination mit einer in Propagationsrichtung positionierbaren EUV-empfindlichen CCD-Kamera ergibt sich die Möglichkeit einer vollständigen Abtastung des vierdimensionalen Phasenraums.

Principle of the experimental setup for 4D Wigner measurements at the FEL beam. Utilizing a rotating toroidal mirror in combination with a movable EUV-sensitive CCD-camera enables a complete mapping of the 4D phase space.

Optik / Kurze Wellenlängen

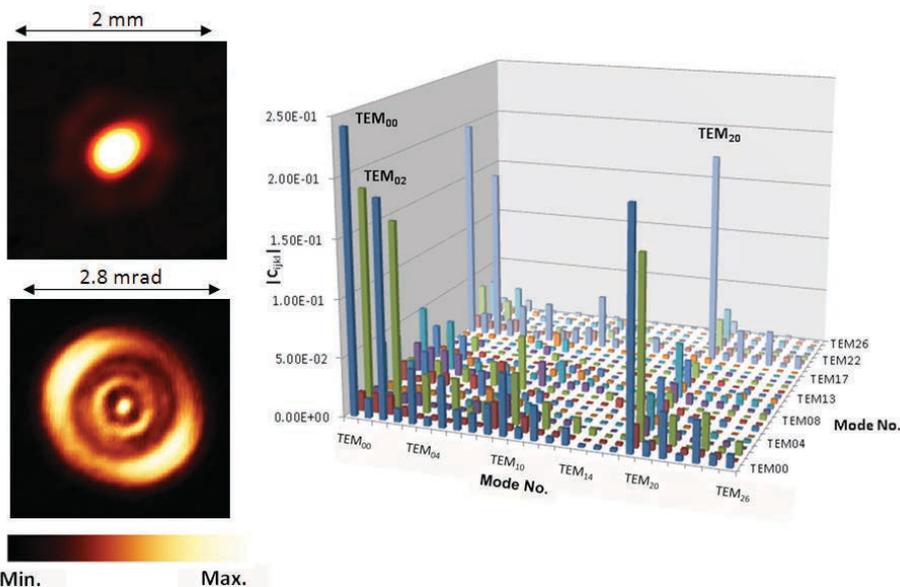
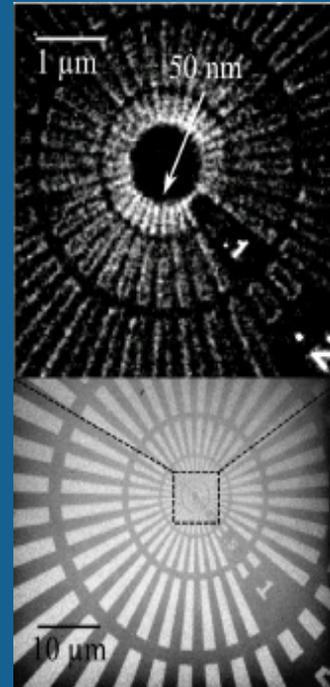
Optics / Short Wavelengths

Wigner measurement technique for the free-electron laser FLASH

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

In continuation of a cooperation with DESY / Hamburg, a measurement technique for determination of 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 e.g. wavefront, 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.



Rekonstruierte Intensitätsverteilungen in der Strahltaile und im Fernfeld eines räumlich kohärenten Laserdioden-Strahls bei 659 nm (links oben bzw. unten) sowie Struktur der Hermite-Gauss Modenzusammensetzung (rechtes Bild).

Reconstructed distributions of near- and far-field intensity (upper and lower left) of a spatially coherent diode laser beam of 659 nm as well as the corresponding decomposition of the Hermite-Gaussian modes (right picture).

Optik / Kurze Wellenlängen

Optics / Short Wavelengths

Röntgenmikroskopie im "Wasserfenster"

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 zum Beispiel tomographische Aufnahmen aus dem Inneren von Zellen oder die Strukturaufklärung von Makromolekülen mit Ortsauflösungen auf der Nanometerskala. Allerdings stehen für derartige Untersuchungen aufgrund des Fehlens von der 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", wird derzeit ein kompaktes Laborröntgenmikroskop für den Bereich des "Wasserfensters" ($\lambda = 2,2 \text{ nm} \dots 4,4 \text{ nm}$) entwickelt. Ein in einem kurzgepulsten Gasjet erzeugtes Laserplasma wird dabei von einem Kondensormpiegel auf eine Probe fokussiert und diese wird dann mit einer Fresnel'schen Zonenplatte stark vergrößert auf eine Kamera abgebildet. Mit Stickstoff als Targetgas (Emissionswellenlänge 2,88 nm) wurde unter anderem das Bakterium *Deinococcus radiodurans* mikroskopiert: Die charakteristische Form des Bakteriums ist eindeutig zu erkennen. Darüber hinaus wurden unter anderem Mikro-Organismen und Geo-Kolloide untersucht, die aufgrund ihres Eisengehaltes eine stärkere Absorption aufweisen als zum Beispiel kohlenstoffhaltiges Material.

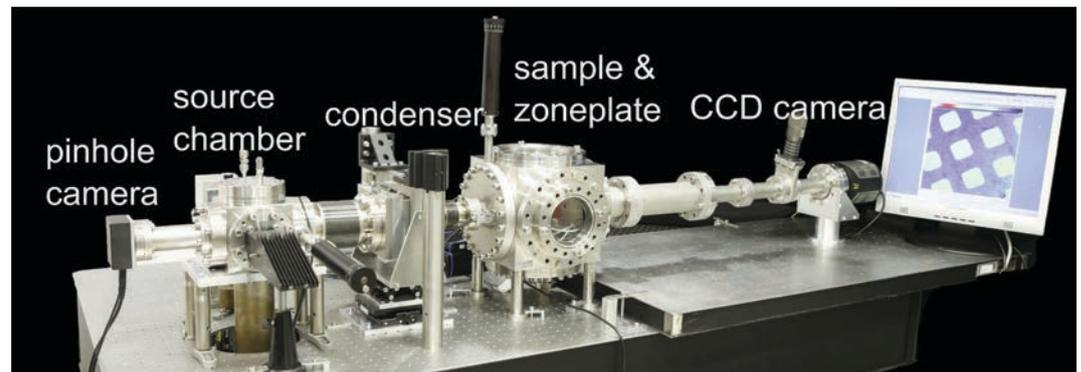


Foto des kompakten Laborröntgenmikroskops.

Photograph of the table-top soft x-ray microscope.

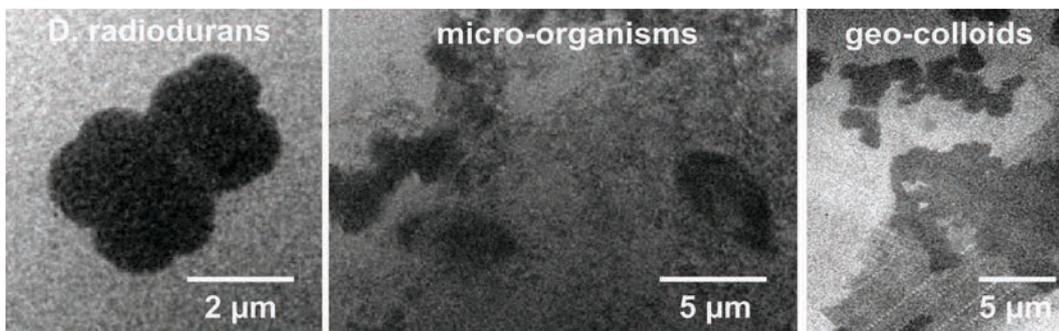
Optik / Kurze Wellenlängen

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 at synchrotron or free-electron lasers exclusively.

Within the framework of the SFB 755 "Nanoscale Photonic Imaging" a compact laboratory x-ray microscope is 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), the polyextremophilic bacterium *Deinococcus radiodurans* was imaged: the representative structure of the bacterium is clearly visible. Furthermore, micro-organisms and geo-colloids were investigated. Due to their iron content, they show a stronger absorption compared to carbon containing material.



▲
Mikroskopaufnahme (links), des Bakteriums *Deinococcus radiodurans*, (mitte), von eisenhaltigen Mikroorganismen und (rechts) von Geokolloiden aus dem Fluss Main 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 (left) bacterium *Deinococcus radiodurans*, (middle) iron-containing micro-organisms and (right) geo-colloids taken from river Main recorded at $\lambda = 2.88 \text{ nm}$ (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).

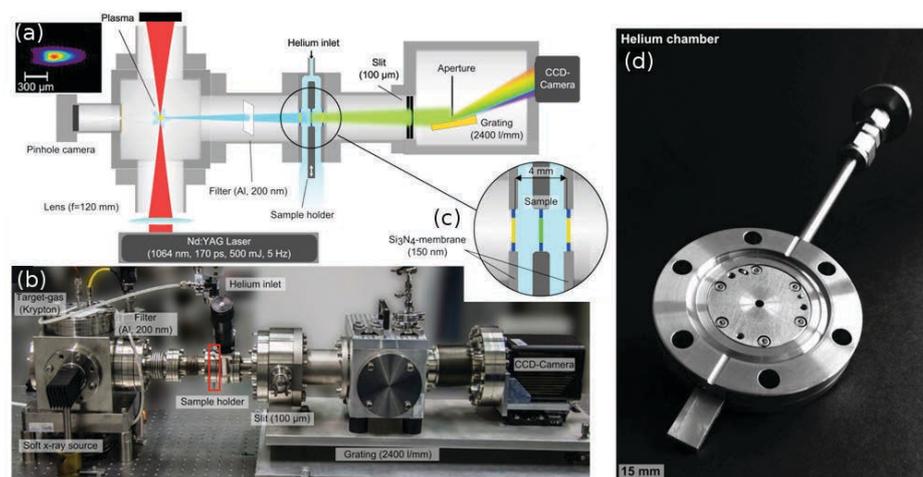
Optik / Kurze Wellenlängen

Optics / Short Wavelengths

Röntgen-Absorptionsspektroskopie (NEXAFS)

Auf Basis der Laborquelle für weiche Röntgenstrahlung wurde ein kompaktes Messsystem zur Absorptionsspektroskopie im Wellenlängenbereich des "Wasserfensters" ($\lambda = 2,2 \text{ nm} \dots 4,4 \text{ nm}$) aufgebaut. Als Quelle wird ein in diesem Bereich breitbandig emittierendes laserinduziertes Kryptonplasma genutzt. Mit dem nachfolgenden Spektrometer lässt sich an dünnen Transmissionsproben die Lage der Röntgen-Absorptionskanten verschiedener Elemente (unter anderem C, N, O, Ca, K, Ti) genau vermessen. 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.

Aufgrund der kurzen Weglänge von 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 Heliumprobenkammer in den bestehenden NEXAFS-Aufbau integriert. Sie erlaubt die Untersuchung von Proben unter Atmosphärendruck. Vergleichende Messungen des Tetrahydrats von Calciumdichlorid unter Vakuum und in Heliumatmosphäre an der Calcium-L- und der Sauerstoff-K-Kante demonstrieren, dass das Kristallwasser in Vakuum abgegeben wird und nicht detektierbar ist. Unter Heliumatmosphäre hingegen bleibt das Kristallwasser gebunden, und neben dem charakteristischen Calciumdoppelpeak wird auch die O-K-Kante des gebundenen Wassers im Spektrum sichtbar.



(a) Schematische Darstellung und (b) Foto des NEXAFS-Spektrometers mit heliumgespülter Probenkammer. Der Bildeinschub (links oben) zeigt eine CCD-Kameraaufnahme des laserinduzierten Kryptonplasmas. (c) Schematische Detailansicht und (d) Foto der kompakten heliumgespülten Probenkammer, welche zwischen Quelle und Spektrometer (rotes Rechteck) angebracht wird. (a) Schematic drawing and (b) photograph of the NEXAFS table-top setup with a helium purged sample chamber. The inset (top left) displays a pinhole camera image of the laser-induced krypton plasma. (c) Close-up sketch and (d) photograph of the compact helium purged sample chamber which is mounted between the source and the spectrometer (red rectangle).

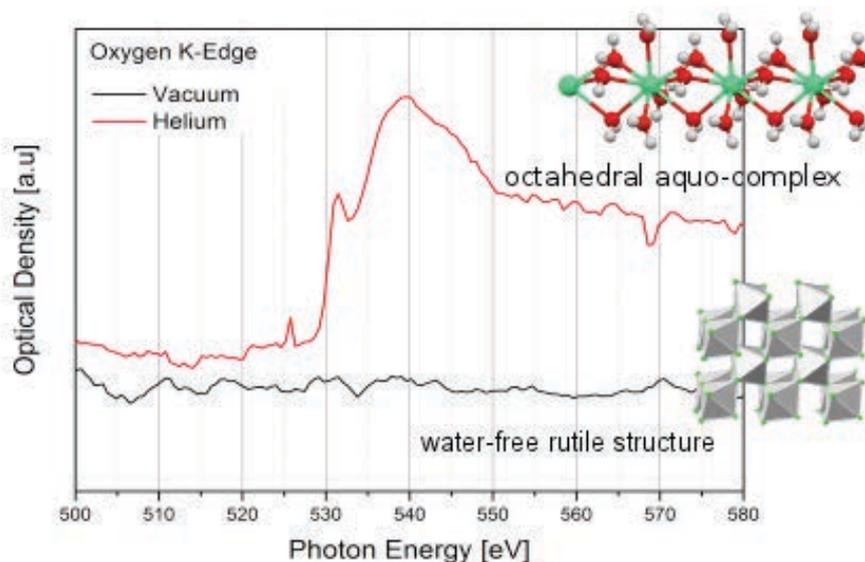
Optik / Kurze Wellenlängen

Optics / Short Wavelengths

X-ray absorption spectroscopy (NEXAFS)

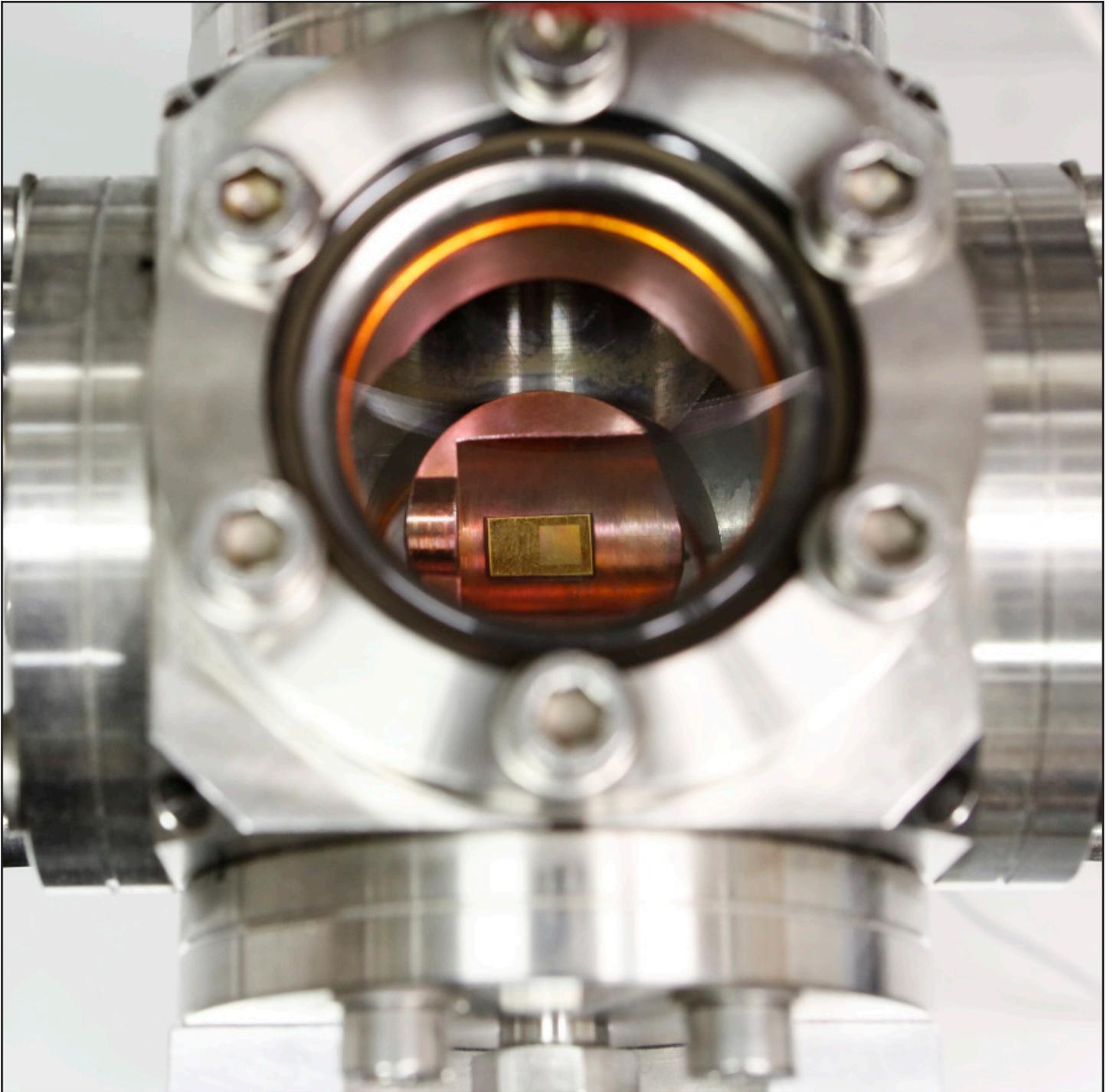
A table-top plasma source combined with a soft x-ray spectrometer is being used for analysis of the near-edge x-ray absorption fine structure (NEXAFS) of thin samples within the "water window", ranging from $\lambda = 2.2 \text{ nm} \dots 4.4 \text{ nm}$. The fine structure of the absorption edges yields 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 broad-band Krypton plasma, transmitted through a sample and divided by a reference spectrum without the sample.

Due to the short attenuation length 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 leads to structural changes this possibly altering the spectral outcome. In order to facilitate investigations of vacuum sensitive samples, a helium sample chamber was integrated into the existing NEXAFS setup. This innovation allows for measurements under ambient pressure. Comparative measurements of calcium chloride (tetrahydrate) under vacuum and in helium-atmosphere, at the Calcium L- and the Oxygen K-edge demonstrate that the water of crystallization is released under vacuum and thus not detectable. Under helium atmosphere crystal water remains in the sample. Therefore, the characteristic calcium double peak as well as the O K-edge of the bound water are visible in the spectrum.



▲
Unter Vakuum und in Heliumatmosphäre bei 1 bar aufgenommenes Spektrum von Calciumchlorid (Tetrahydrat), gemessen an der K-Absorptionskante von Sauerstoff.
Spectra of calcium chloride (tetrahydrate) recorded at the K-absorption edge of oxygen under vacuum and in helium atmosphere at 1 bar.

Berichte aus der Abteilung
Departmental Reports



Photonische Sensorik

Photonic Sensor Technologies

Die Abteilung "Photonische Sensorik" widmet sich der Entwicklung neuartige optischer Messverfahren – überwiegend basierend auf Ramanstreuung, IR-Absorption und Fluoreszenzemission, 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 in der Industrie.

Die Photonische Sensorik betreibt Forschung in den Bereichen analytische Verfahren und bildgebende optische Messtechnik. Dazu gehören insbesondere Umweltanalytik, Vor-Ort-Analytik, Bioanalytik, Verbrennungsdiagnostik und Prozesskontrolle. 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 Mikroplastiken in Abwasser und die Analyse der Gemischbildung für emissionsarme Erdgasmotoren.

The department "Photonic Sensor Technologies" devotes its research to the development of novel optical measurement procedure 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 industrial applications.

The Photonic Sensor Technologies group does research especially in the following areas: Analytical methods and optical imaging techniques; in particular, this includes environmental analysis, on-site analysis, bioanalysis, combustion diagnostics and process control. Besides recording of data by photonic sensors, exploration of automated data evaluation on complex information is a major topic. This means in the case of explosive detection: 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 micro plastics 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. Kai Golibrzuch
Dr. Christoph Lenth
Stephan Bauke
Julian Born
Fabian Dach
Finn-Erik Digulla
Lars Gundrum
Jan Hagemann
Malte Henrich
Daniel Konradt
Leonie Lakemann
Anne Ledebuhr
Martin Liebetau
Alina Mielke
Stefan Scholz
Zheng Wang
Florian Wieduwilt

Photonische Sensorik

Photonic Sensor Technologies

Ramanspektroskopische Bestimmung von Mikroplastiken in Abwässern

Als Mikroplastik werden kleine Kunststoffpartikel mit einer maximalen Größe von 5 mm bezeichnet. 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.

- ◀ Kläranlage in Emden (Urheberrecht: Stadtentwässerung Hannover).
Sewage treatment plant in Emden (Copyright, City drainage Hannover).

Ziel unserer Arbeiten ist die Erforschung und Entwicklung einer Vor-Ort-Methode zur Bestimmung der Masse an Mikroplastikpartikeln direkt auf Filtern. Eingesetzt werden soll diese Bestimmungsmethode bei der Überwachung des Ablaufes von Kläranlagen. Daher soll das Verfahren einfach zu handhaben sein. Es wird ein möglichst geringer apparativer Aufwand angestrebt.

- ◀ Mikroplastik.
Microplastics.

Das verwendete Ramanverfahren 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 Raman-spektroskopische Analyse dieser Partikel würden den hohen apparativen Aufwand eines ramanmikroskopischen Messplatzes erfordern, der in der Prozessanalytik nicht praktikabel ist. Da sich das Ramanspektrum des belegten Filters additiv aus den Ramanspektren aller auf dem Filter vorhandenen Substanzen sowie dem des Filtermaterials zusammensetzt, ist eine mathematische Separation notwendig. Hierzu wird das mathematisch-statistische Verfahren Partial Least Squares Regression (PLS) getestet. Eine große Herausforderung stellt die Analyse und Kompensation der Effekte, die die Probenmatrix verursacht, dar. Hier ist insbesondere die Fluoreszenz zu nennen. Des Weiteren sind Forschungsarbeiten zur Optimierung der Probenahme und Probenanreicherung erforderlich.



- ◀ Vorrichtung zur Analyse des mit Mikroplastik belegten Filters.
Apparatus for analyzing the microplastics on the filter.

Photonische Sensorik

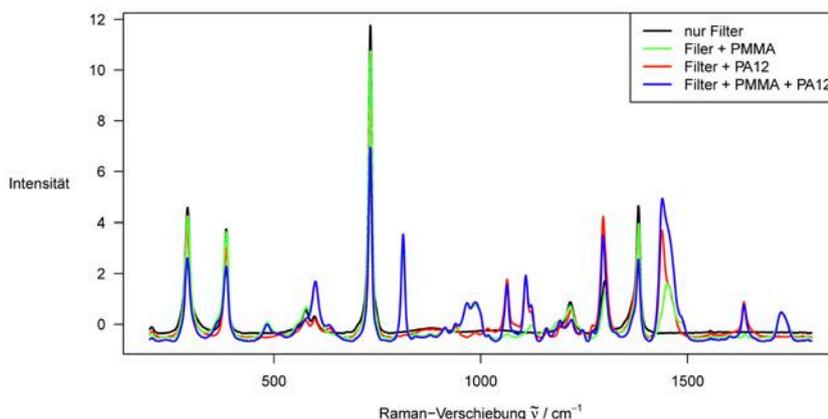
Photonic Sensor Technologies

Microplastics from sewage

Small plastic particles with a maximum size of 5 mm are referred to as microplastics. In recent years, public attention is increasingly focussed on the topic of microplastic residues in bodies of water. 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 an 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. Therefore, the method should be easy to handle. The lowest possible equipment complexity is required.

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 Partial Least Squares Regression (PLS) is tested. A major challenge is to analyse and compensate the effects caused by the sample matrix. The Fluorescence is to be especially mentioned here. Moreover, research is needed to optimize sample preparation and sample enrichment.



Spektren vom Filtermaterial PTFE mit und ohne Mikroplastik (Polyamid 12 (PA12), PMMA Polymethylmethacrylat).

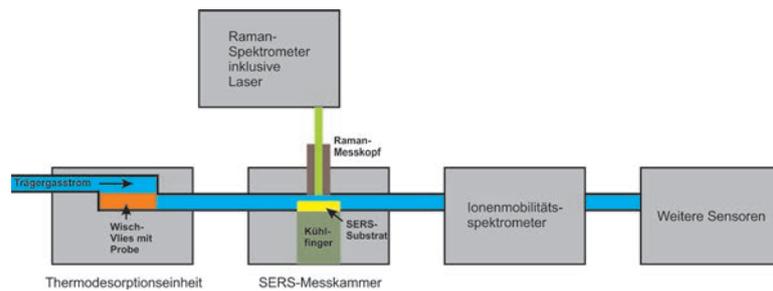
Spectra of the filter material PTFE with and without microplastic (polyamide 12 (PA12), PMMA polymethylmethacrylate).

Photonische Sensorik

Photonic Sensor Technologies

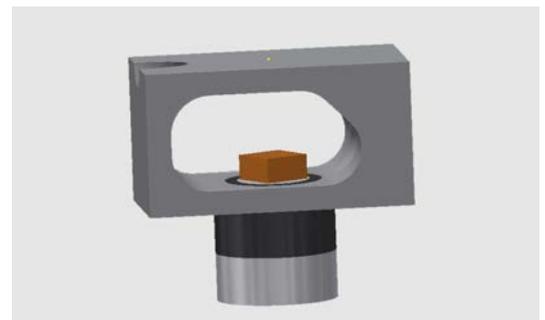
Oberflächenverstärkte Ramanspektroskopie in Kombination mit Kryo-fokussierung zur Explosivstoffdetektion

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



◀ IR-Reflexionsspektren von Moschusketon an den gelb markierten Strukturen.
IR reflection spectra of musk ketone at the yellow-marked structures.

Spuren von Explosivstoffen auf Kleidung oder an Gepäckstücken werden mittels sogenannter Wischtests von einem Vlies aufgenommen, welches aufgeheizt wird, um die verdampfbaren Komponenten zu analysieren. Die geringen Substanzmengen stellen für die Ramanspektroskopie, die so charakteristisch wie ein Fingerabdruck ist, eine große Herausforderung dar. Ein zentrales Anliegen unserer Forschung ist, die Nachweisgrenzen von ramanbasierten Analyseverfahren anhand des Oberflächenverstärkten Ramaneffekts zu senken. Erst durch die Adsorption der Moleküle an einem plasmonischen Substrat werden die Signale bei diesen Verfahren so verstärkt, dass die Detektion von geringsten Konzentrationen, sprich eine Spurenanalytik, ermöglicht wird. Als plasmonische Substrate werden nanostrukturierte Edelmetalloberflächen eingesetzt. Um die Sprengstoffmoleküle auf dem plasmonischen Substrat zu sammeln, wird das Prinzip der thermischen Abscheidung genutzt. Dazu befindet sich die nanostrukturierte Oberfläche auf einen Kühlfinger, über welchem der heiße Luftstrom aus der Thermodesorptionseinheit, welche das Flies ausgeheizt hat, geleitet wird. Dieser Vorgang wird auch Kryofokussierung genannt. Um eine signifikante Anreicherung zu erzielen muss die erforderliche Konstruktion nicht nur miniaturisiert, sondern auch strömungstechnisch optimiert werden.



▲ Messkammer mit transparenten Fenstern zur Untersuchung der Strömungsdynamik.
Measuring chamber with transparent windows to study the flow dynamics.

Photonische Sensorik

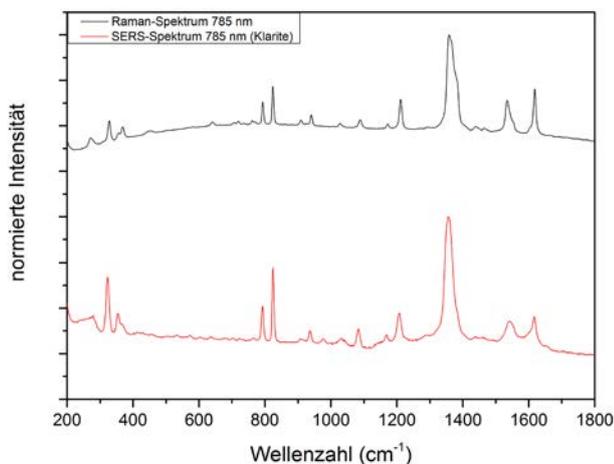
Photonic Sensor Technologies

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 - a highly topical and pressing issue. SERS-spectroscopy enables rapid, faultless detection of different classes of explosives including triacetone triperoxide, (short: TATP). This explosive was secured in Chemnitz and was used in the attacks in Paris in November 2015.

Miniatur-Kühlfinger mit nanostrukturierter Goldoberfläche.
Miniaturized cooling finger with nano-structured gold surface.

Traces of explosives on clothing or on luggage are picked up with a fleece by means of so-called wiping tests. The fleece is heated analysing 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 prerequisite for the enhancement of the Raman signals. Thereby the detection of the lowest concentrations, i.e. trace analysis, is possible. Nano-structured noble metal surfaces are used as plasmonic substrates. The principle of thermal deposition is used to gather the explosive molecules on the plasmonic substrate. For this purpose, the nano-structured surface is located on a cooling finger, to which the hot air stream is transported from the thermo-desorption unit. Where the fleece was heated. This process is also referred to as cryo-focusing. In order to achieve significant enrichment, the required design of the measuring unit must not only be miniaturized, but also the airborne analyte flow has to be optimized.



◀ Fingerprintbereich des Raman-Spektrums 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

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 denen von Otto-Kraftstoffen unterscheiden. Dies wirkt sich direkt auf Gemischbildungs- und Verbrennungsprozesse im Motor aus. Daher werden dringend Daten über die Dichten der am Motorzyklus eines Pkw-Viertaktmotors beteiligten Gase (Methan, Stickstoff, Sauerstoff, Wasserstoff und Kohlenstoffdioxid) benötigt. Da sich die Prozesse auf einer Zeitskala im Bereich von Millisekunden abspielen, müssen die Dichten mit einer hohen Zeitauflösung gemessen werden.



- ◀ 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 GmbH)

Seit Mitte 2014 arbeiten das LLG, das Institut für Verbrennungs- und Gasdynamik Duisburg sowie die Firmen LaVision GmbH und Volkswagen AG gemeinsam an der Lösung dieses Problems. Der auf IR-Absorption basierende Zündkerzensensor zur Messung der Gemischbildung im Motorbrennraum, welcher gemeinsam mit LaVision entwickelt wurde, wird im Rahmen dieses Projektes zur Messung von CNG-Luft-Gemischen weiterentwickelt. Dafür wurde unter anderem der Prototyp eines Sensorkopfes zur Adaption an den Ansaugtrakt entwickelt, erprobt und überarbeitet.

Im vergangenen Jahr wurde der erste Prototyp des neuen Sensorsystems fertiggestellt und im Rahmen einer Messkampagne bei Volkswagen ausführlich getestet. Hierbei konnte die Funktionstüchtigkeit des Systems erfolgreich validiert werden. Zusätzlich fließen die Erkenntnisse aus den Messungen in die Weiterentwicklung des Systems ein, um bei der 2. Generation des Prototypensystems die Messgenauigkeit weiter zu verbessern. Des Weiteren wurde die Möglichkeit der gleichzeitigen Messung von Temperatur und Methandichte über einen Zwei-Farben-Ansatz untersucht. Schließlich wurde eine Messstrategie zur Messung der CO₂- und H₂O-Dichte entwickelt und erfolgreich am Motorprüfstand validiert. Das Messkonzept dient zur zeitaufgelösten Bestimmung der Abgasrückführungsrate im Motor.

Photonische Sensorik

Photonic Sensor Technologies

Optical Combustion diagnostics

A new European Union (EU) regulation on the regulation of CO₂ emissions requires reducing the average emissions of new cars below 95 g/km until 2021. One way to achieve this is the use of innovative fuel saving technologies. Furthermore, 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.

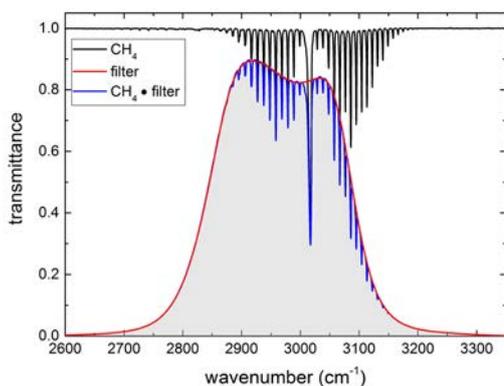
Zündkerzensensor des ICOS-Systems vor einem Druckzellenaufbau für Validierungsmessungen
Spark plug sensor of the ICOS-system in front of a pressure cell setup used for validation measurements



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. In conclusion, the acquisition of data on the gas density of each substance (methane, nitrogen, oxygen, water, carbon dioxide) involved in a motorcycle of a typical 4-stroke-engine is urgently required. Since the processes take place on a millisecond timescale, the gas densities have to be measured with a high temporal resolution.

Starting mid-2014, the LLG established a collaboration with the Institute for Combustion and Gasdynamics Duisburg and the companies LaVision GmbH and Volkswagen AG at the solution to this problem. 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 will be further developed for use with CNG/air mixtures. Therefore, a prototype sensor head for adaption of the system to the engine's inlet manifold was developed, tested and revised.

During the past year a first prototype of the new sensor system was finished and tested in detail in the scope of measurements at Volkswagen. These experiments have shown that the system is working properly. Further, the measurement results are used for further optimization of the system to achieve a higher accuracy for a 2nd generation prototype system. We also successfully examined the possibility for simultaneous determination of methane density and temperature through a 2-colour-approach. Finally, a new measurement strategy for the quantification of CO₂ and H₂O densities was developed and successfully validated at the LLG engine test station. This new concept is used for time resolved determination of exhaust gas recirculation rates inside the engine.



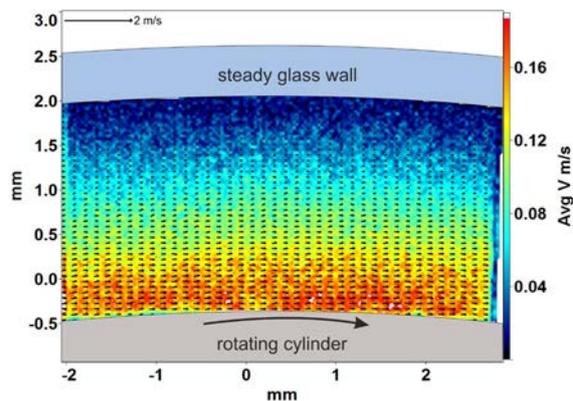
◀ Messprinzip des ICOS-Systems am Beispiel Methan: Durch einen breitbandigen Filter wird ein passender Bereich des Spektrums für die Quantifizierung der Dichte selektiert.
Measurement principle of the ICOS-system using the example of methane: a broadband filter selects a defined region of the spectrum for quantification of the density .

Photonische Sensorik

Photonic Sensor Technologies

Bildgebende optische Messtechnik

Bildgebende optische Messmethoden finden aufgrund ihres Potentials, komplexe physikalische Prozesse ortsaufgelöst darzustellen, eine breite Anwendung. Zu den eingesetzten Techniken zählen u. a. die Particle Image Velocimetry (PIV) und die laserinduzierte Fluoreszenz (LIF). Mittels PIV können komplette Strömungsfelder in Fluiden mit hoher zeitlicher Auflösung vermessen und visualisiert werden. Die Anwendungen der Messtechnik sind aufgrund der technische Relevanz von Strömungsphänomenen breit gestreut. Besondere Herausforderungen entstehen beim "Seeding", sprich Versetzen des Fluids mit geeigneten Partikeln, bei der Findung der optimalen Messparameter und der teils schwierigen optischen Zugänglichkeit der Messregion. Ein Beispiel ist die Messung in engen Spalten, beispielsweise in einem Rheometer.



◀ Strömungsfeld eines nicht-Newtonianischen Fluids in einem rheometer-ähnlichen Spalt.
Flow field of a non-Newtonian fluid in a rheometer-like slit assembly.

Die LIF-Messtechnik ermöglicht die Visualisierung unterschiedlichster physikalischer Parameter wie Konzentrations- und Temperaturverteilungen. Durch die zugänglichen Messgrößen können zum Beispiel Transportprozesse wie Gemischbildung und Wärmeleistung untersucht werden. Nicht zuletzt können chemische Reaktionen, zum Beispiel in Verbrennungsprozessen, anhand der Detektion von intermediär gebildeten Radikalen wie OH, CH oder CHO analysiert und verstanden werden. Durch hohe örtliche und zeitliche Auflösung ist der Informationsgehalt der Messergebnisse enorm.

Ein zentrales Anwendungsfeld der LIF-Messtechnik war in den vergangenen Jahren die Analyse der Gemischbildung in Verbrennungsmotoren. Der Kraftstoff wird dabei meist mit einem fluoreszierenden Molekül (Tracer) versetzt, welches zur Fluoreszenz angeregt wird. Zur Quantifizierung der Messergebnisse muss das Verhalten der Tracer durch spektroskopische Untersuchungen sehr gut charakterisiert und bekannt sein. Für gasförmige Kraftstoffe wie Erdgas stellt auch die kontrollierte Zugabe des Tracers eine signifikante Herausforderung dar. Bei erfolgreicher Anwendung des Verfahrens können detaillierte Kenntnisse über Mischungsprozesse gewonnen werden.

In diesem Zusammenhang hat die Abteilung "Photonische Sensorik" sowohl Trimethylamin (TMA) als potenziellen gasförmigen Fluoreszenzfarbstoff untersucht und charakterisiert als auch die einfache Beimischung flüssiger Tracer erforscht und das Verfahren im Strömungskanal getestet.

Photonische Sensorik

Photonic Sensor Technologies

Optical Imaging Measurement Technologies

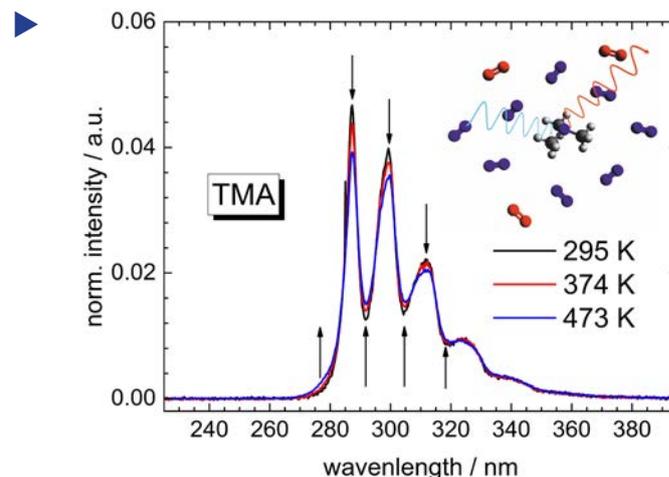
Spatially resolved optical measurement technologies have broad applications in different research and development fields resulting from their potential to visualize complex physical processes with spatial resolution. Frequently applied technologies are particle image velocimetry (PIV) and laser-induced fluorescence (LIF). PIV enables the measurement of flow fields in fluids with high time-resolution. A manifold of PIV applications arise from the key role of flow phenomena in many industrial applications. Challenges result from the identification of appropriate seeding particles for each fluid, of application matching experimental parameters and an often limited optical access to the region of interest. An example is the flow field measurement in a rheometer-like slit assembly.

LIF allows the visualization of different physical parameters like concentration and temperature. It therefore allows the investigation of transport processes like mixture formation and heat conduction. In addition, LIF detection of radicals like OH, CH or CHO is important for analysis of chemical reaction, e.g. in combustion processes. LIF measurements deliver a high density of information resulting from high spatial and temporal resolution.

The investigation of mixture formation in internal combustion engines has been one of the key LIF applications. Experiments generally involve adding a fluorescent tracer to the fuel. An exact quantification of the signal requires the knowledge of the tracer's behavior upon environmental change and needs to be spectroscopically characterized and understood. Moreover, controlled mixing of tracers with gaseous fuels, e.g. compressed natural gas (CNG), presents a significant challenge, especially under dynamic conditions. Upon successful application, the LIF data allows insights into mixture formation processes.

In this context, the department "Photonic Sensor Technology" investigated and characterized trimethylamine (TMA) as a potential gaseous tracer (vapor pressure ~ 1.8 bar at 300 K) for use with CNG. In addition, a simple method for addition of liquid tracers was developed and tested in flow channel experiments.

Temperaturabhängigkeit
des Fluoreszenzspektrums
von Trimethylamin.
*Temperature dependence of
the fluorescence spectrum
of trimethylamine.*



Projekte Projects



Erfolgreiches zweites Arbeitsjahr des Photonik Inkubators in Niedersachsen mit weiterem Preis und neuen Projekten!

Nachdem das in 2014 genehmigte Projekt "Einrichtung eines Photonik Inkubators" am LLG in Göttingen zunächst mit dem Vorhaben FiberLab aus Goslar im Herbst 2014 startete, kam es in 2016 zu zahlreichen neuen Entwicklungen: Dr. Josef Staub konnte als Standortleiter gewonnen werden, drei weitere Projekte gelangten in die Inkubation und in der letzten Sitzung des Investmentgremiums im Jahr 2016 wurde die Ausgründung des Projekts FiberLab unter dem Namen *FiberSense GmbH* mit Beteiligung des Photonik Inkubators einstimmig beschlossen. In der gleichen Sitzung wurde auch das Vorhaben Nanoscale der Universität Kassel mit Finanzierung aus Bundesmitteln mit Auflagen zur Inkubation in 2017 empfohlen.

Wie in jedem Jahr fand im Februar 2016 in San Francisco die Photonics West statt – wiederum mit einem großen German Pavilion, mit Fraunhofer Stand und Exponaten des Inkubator Teams aus Goslar. Schwerpunkt der Präsentation war in diesem Jahr die faseroptische Bewegungserfassung mittels Softhand und Cyber-Handschuh (vergl. Bild) und die Übertragung der Bewegungen einer Hand auf eine im Computer hinterlegte Roboter-Hand. Das Bild lässt beides erkennen, insbesondere auch die im Cyber-Handschuh verlegten Diagnosefasern.



Einen weiteren Preis erhielt die PI-Gruppe während der Sensortagung in Nürnberg. Sie teilte sich den renommierten AMA-Innovationspreis im Bereich Sensorik und Messtechnik mit ihrer Bewerbung mit dem Titel *Nerven aus Glas – Faseroptische 3D-Positionierung von Herzkathedern* mit einem anderen Erstplatzierten aus dem Bereich der Biomedizin. Man gewinnt mehr und mehr den Eindruck, dass die Fasertechnologie mit ihren vielfältigen, sensorischen Möglichkeiten sehr wohl mit der Funktion eines Nervenstrangs vergleichbar ist. Bei dem AMA-Preis wurde dieser Aspekt in der Begründung für den Preis hervorgehoben: *Nerven aus Glas* ist als präzises Navigation- und Trackingsystem von großer Bedeutung in der minimalinvasiven Radiologie und Chirurgie.

¹AMA steht für den Verband für Sensorik und Messtechnik e.V.

Projekte

Projects

A successful second year of operation for the Photonic Incubator in Lower Saxony with another award and new projects!

After the project entitled "Einrichtung eines Photonik Inkubators" (establishment of a photonic incubator), which was approved at LLG in Göttingen in 2014, the project FiberLab from Goslar was launched in autumn 2014. After a busy 2015 for the PI team, there were many new developments in 2016. Dr. Josef Staub came on board as site manager, three further projects joined the incubation and, in the investment board's final meeting of 2016, the spin-off company from the FiberLab project was unanimously agreed upon under the name of *FiberSense GmbH* with the involvement of the Photonic Incubator. During the same meeting, the *Nanoscale* project from the University of Kassel was also recommended with national funding for incubation in 2017.

The annual Photonics West took place in San Francisco in February 2016, again with a large German Pavilion, including a Fraunhofer stand and exhibits from the Incubator Team from Goslar. The focus of this year's presentation was fiber-optic motion capture via *Softhand* and *cyber glove* (see below) as well as the transmission of hand movements to a robot hand controlled by a computer. The image reveals both, in particular the diagnostic fibers installed in the *cyber glove*.

- ◀ Photonics West 2016: *Cyber-Handschuh und Softhand des FiberLab Teams mit gut sichtbarem Verlauf der im Handschuhgewebe eingelassenen Diagnose-Fasern und Visualisierung der Handbewegung mittels "Knochenhand" an einem Computer.*
Photonics West 2016: Cyber glove and Softhand from the FiberLab team with easily visible path of the diagnosis fibers embedded in the glove fabric and visualisation of hand movements using "Knochenhand" (bony hand) on a computer.

The PI group received a further award during the sensor conference in Nuremberg. With its application entitled *Nerven aus Glas – Faseroptische 3D-Positionierung von Herzkathedern* (nerves from glass – fiber-optic 3D positioning of cardiac catheters), it shared the prestigious AMA innovation award in sensor and measurement technology with another winner from the biomedicine section.

It is becoming increasingly evident that fiber technology with its vast range of sensory possibilities can be compared to the function of a nerve fiber. This aspect was highlighted as the rationale behind the AMA award. *Nerven aus Glas* (nerves from glass) is a precise navigation and tracking system of great importance in minimally invasive radiology and surgery.

¹AMA stands for the Verband für Sensorik und Messtechnik e.V. (association for sensor and measurement technology)

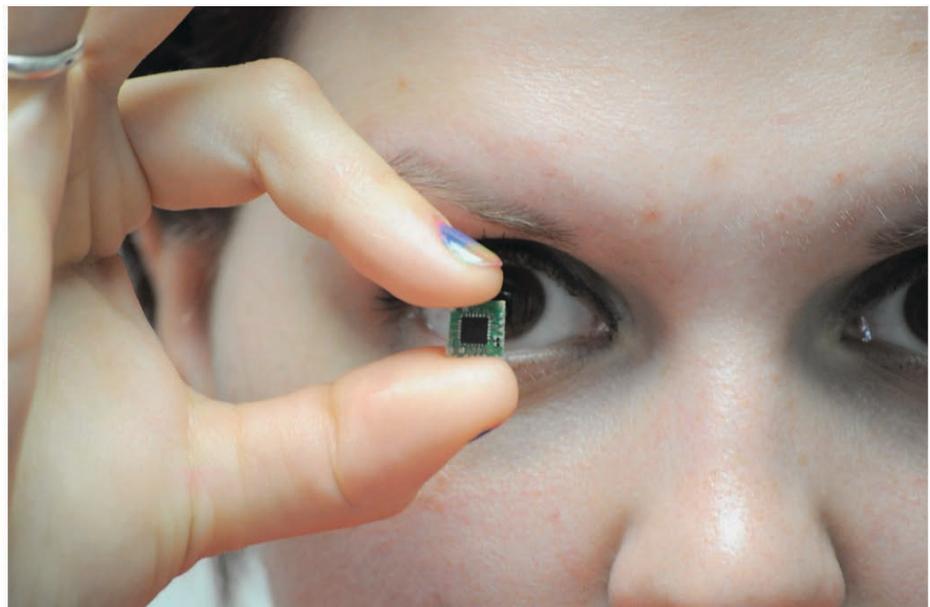
Projekte

Projects

Eine dreidimensionale Form- und Bewegungserfassung mittels faseroptischer Sensorik ermöglicht eine Repositionierungsgenauigkeit von Herzkathedern von unter einem Millimeter. Dies trägt entscheidend zur Verbesserung des Erfolgs und zur Reduzierung der benötigten Operationszeit einer zugrunde liegenden medizinischen Behandlung bei.

Besonders wichtig für die weitere Entwicklung des Photonik Inkubators in Niedersachsen ist die Besetzung der hiesigen Standortleitung: Zum 1.9.2016 konnte Dr. Josef Staub für diese Position in Göttingen gewonnen werden. Mit seiner Berufung ist die lange Suche nach einem geeigneten Kandidaten zu einem sehr guten Ende gekommen – Herr Staub mit seiner großen Industrieerfahrung konnte sich bereits erfolgreich in zahlreiche neue PI-Projekte einbringen.

Am 1. November 2016 begann das Inkubatorteam um Dr. Sönke Fündling von der TU Braunschweig mit seiner Arbeit an dem Projekt *Superlight Photonics*, welches in der Sitzung des Investitionsgremiums im Juni 2016 zur Aufnahme in die Inkubation und zur Förderung durch Bundesmittel bewilligt wurde. Das Team möchte die neuen Möglichkeiten eines selbst entwickelten Halbleiterchips (vergl. Bild) in erfolgreiche Produkte für die Sensorik, Analytik und Prozesstechnologie überführen. Dabei stützt sich das Projekt auf einige Vorteile, welche die verwendete Galliumnitrid-Technologie gegenüber alternativen Methoden mit sich bringt: Miniaturisierbarkeit, hohe Intensitäten, schnelle Schaltzeiten, lange Lebensdauer, Wellenlängen im kurzwelligen Spektralbereich sowie chemische und biologische Kompatibilität. Nicht zuletzt durch die Möglichkeit der Fluoreszenzanregung ergeben sich neue interessante Anwendungsmöglichkeiten im Bereich der Biotechnologie oder auch der Medizin.



Projekte

Projects

Three-dimensional shape and motion capture based on fiber-optic sensor technology enables repositioning accuracy of cardiac catheters to less than a millimetre. This significantly improves the success and reduces the surgery duration for an underlying medical treatment.

Of particular importance for the continued development of the Photonic Incubator in Lower Saxony was to fill the position of a local site manager. Dr. Josef Staub took on this role in Göttingen on 1 September 2016. With this appointment, the long search for a suitable candidate came to a successful conclusion. With his considerable industry experience, Dr. Staub has already successfully got involved in several new PI projects.

On 1 November 2016, the incubator team led by Dr. Sönke Fündling from Braunschweig University of Technology began working on the project *Superlight Photonics*, which was approved to join for incubation and receive national funding during the meeting of the investment board in June 2016. The team is aiming to use the new possibilities offered by a in-house-developed semiconductor chip (see image) in successful products for sensor technology, analytics and process technology. The project is based on certain advantages which the gallium nitride technology used offers compared to alternative approaches – miniaturisation, high intensities, rapid switching times, long lifespan, wavelengths from the short-wave spectral range, and chemical and biological compatibility. Fluorescence excitation enables new, interesting potential applications in biotechnology and medicine.

- ◀ Projekt "Superlight Photonics": Modell eines miniaturisierten Galliumnitrid Halbleiterchips – eine neuartige Hintergrundlichtquelle für vielfältige Anwendungen im Bereich Materialwissenschaften, Biologie und Medizin.
"Superlight Photonics" project: Model of a miniaturised gallium nitride semiconductor chip – an innovative background light source for various types of applications in materials science, biology and medicine.

Projekte

Projects

In der Sitzung des Investitionsgremiums wurde insbesondere auf die Möglichkeiten und Chancen hingewiesen, die sich durch den neuartigen Halbleiter Chip in Bezug auf eine äußerst schnelle strukturierte Beleuchtung für den Bereich der zeitaufgelösten Mikroskopie eröffnen.

In den Sitzungen des Investitionsgremiums am 26. Oktober 2016 und 29. November 2016 wurden befürwortet:

- 1.) SurPlas der HAWK in Göttingen,
- 2.) Patientensicherheit 4.0 des LLG,
- 3.) Nanoscale der Universität Kassel.

Das Projekt SurPlas will die vielfältigen Möglichkeiten der Atmosphärendruck-Plasmatechnologie zur Oberflächen-Behandlung und -Modifikation einsetzen. Dazu soll ein Baukastenkonzept entwickelt und erprobt werden, das es erlaubt, an Kunden das langjährig gewonnene Know-how und individuell zugeschnittene Rezepturen zur Lösung ihrer Probleme durch eine Plasmabehandlung weiterzugeben. Der große Bedarf an einer solchen Technologie wurde von Branchenvertretern und Fachverbänden aus der Druck- & Verpackungstechnik bestätigt. Der Marktzutritt ist mit Ende der Inkubationszeit für das Jahr 2019 geplant.



- ◀ Pflegepersonal beim (komplizierten) Wechsel von Infusionslösungen auf einer Intensivstation. Das Teilbild zeigt geplantes Laserverfahren zur Bestimmung der Richtigkeit von Infusionslösungen im Rahmen des Projekts "Patientensicherheit 4.0".
Nursing staff during the (complex) changing of infusion solutions at an intensive care unit. This partial image shows a planned laser procedure to determine the accuracy of infusion solutions as part of the "Patientensicherheit 4.0" project.

Das Projekt Patientensicherheit 4.0 – optische Überwachung von Infusionslösungen des Laser-Laboratoriums Göttingen e.V. spiegelt die wachsende Bedeutung des Themas Patientensicherheit in der öffentlichen Diskussion wieder. Insbesondere in der Intensivmedizin kommt es immer wieder zu Zwischenfällen durch die fehlerhafte Vergabe von Infusionslösungen und Medikationen oder Nichtbeachtung der Konzentrationsvorgaben. Da Medikationsfehler in der Intensivmedizin besonders dramatisch verlaufen können, muss deren Vermeidung durch speziell entwickelte Messverfahren auf der Basis der instrumentellen Analytik ein besonderes Anliegen sein. Laut Statistiken des Bundesverbands deutscher Krankenhausapotheker weicht die Bereitstellung und Verabreichung von Arzneimitteln in bis zu fünf Prozent der Fälle von der entsprechenden ärztlichen Verordnung ab. Angesichts der Komplexität der medizinischen Umgebung innerhalb einer Intensivstation (siehe Bild) sollte diese relativ hohe Fehlerrate unbedingt verringert werden, z. B. durch Einsatz moderner Analyseverfahren.

Projekte

Projects

During the meeting of the investment board, the possibilities and opportunities afforded by the innovative semiconductor chip regarding high-speed structured lighting for time-resolved microscopy was pointed out.

The following projects were approved in subsequent meetings of the investment board on 26 October and 29 November 2016:

- 1.) SurPlas from HAWK in Göttingen,
- 2.) Patientensicherheit 4.0 (patient safety 4.0) from LLG,
- 3.) Nanoscale from the University of Kassel.

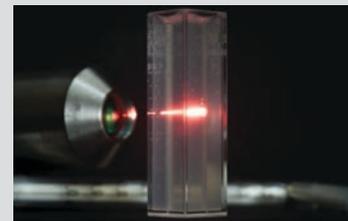
The project SurPlas aims to make use of the range of possibilities afforded by atmospheric pressure plasma technology for surface treatment and modification. A modular concept needs to be developed and tested which will enable the expertise acquired over the course of many years and individually tailored solutions to be shared with customers in order to solve their problems through plasma treatment. The high need for such a technology was confirmed by industry representatives and professional associations from the printing and packaging technology industries. Market entry is planned in 2019 on completion of the incubation period.

The project *Patientensicherheit 4.0 – optische Überwachung von Infusionslösungen* (patient safety 4.0 – visual monitoring of infusion solutions) from Laser-Laboratorium Göttingen e.V. reflects the increasing importance of patient safety in public discussions. Particularly in intensive care, there are constantly incidents occurring due to the incorrect assignment of infusion solutions and medication or non-observance of the appropriate concentrations.

Geplantes Laserverfahren zur Bestimmung der Richtigkeit von Infusionslösungen mittels Raman-Messtechnik im Rahmen des Projekts "Patientensicherheit 4.0".

Intended laser-based Raman-technique for control of infusion solutions in the "Patientensicherheit 4.0." project.

As medication errors in intensive care can have particularly serious consequences, it is important to prevent them through specially developed measurement procedures based on instrumental analytics. According to statistics from the German society of hospital pharmacists, the provision and administration of medicinal products deviates from the corresponding medical prescription in up to 5 % of cases. Considering the complexity of the medical environment in an intensive care unit (see below), this high error rate needs to be reduced, for example through the use of modern analysis procedures.



Projekte

Projects

Innerhalb des Projekts soll vom LLG-Team ein Analyseautomat für die Überwachung von Langzeitinfusionen, verabreicht durch Spritzenpumpen, für den Einsatz auf Intensivstationen entwickelt werden, der das medizinische Personal bei seiner Arbeit unterstützt. Der Analyseautomat soll die Richtigkeit der Medikation überprüfen und bereits bestehende Systeme zur Verbesserung des Qualitätsmanagements unterstützen. Die Entwicklung wird in enger Kooperation mit der hiesigen Universitätsmedizin und einem strategischen Industriepartner erfolgen. Das Analysegerät zur automatisierten Bestimmung der Bestandteile von Infusionslösungen wird diese qualitativ und quantitativ mittels synergistischer Kombination zweier optischer Verfahren bestimmen. Im ersten Schritt soll das Verfahren an ausgewählten Medikamenten der Kooperationspartner erprobt werden – Medikamente aus dem Intensivbereich, die besonders häufig verwendet werden oder die bei Fehlmedikation besonders gefährlich sind.

Beim Projekt Nanoscale geht es um maßgeschneidertes Licht für die effiziente Beleuchtung der persönlichen Umgebung. Die Antragsteller aus Kassel verwenden großflächige, ansteuerbare Arrays von Mikrosiegeln zur Lichtsteuerung in Transmission, die sich gemeinsam und äußerst schnell aktuieren lassen und stufenlos verstellbar sind. Das zu entwickelnde Aktive Fenster soll über eine gezielt steuerbare Umlenkung von Tageslicht eine effiziente Beleuchtung von Innenräumen ermöglichen und zugleich zu einer verbesserten Wärmeregulierung führen, was sich positiv auf die Energiebilanz eines Gebäudes auswirken wird. Zudem gibt es bei Hochhäusern ab dem 7. Stockwerk keine Konkurrenztechnologie, die Verschattung und Wärmeregulierung bieten kann.

In der letzten Sitzung des Investmentgremiums wurde außerdem über die erste Ausgründung eines Unternehmens nach bestandener Inkubationsphase entschieden: Das Gremium beschloss einstimmig die Gründung des neuen Unternehmens *FiberSense GmbH* unter Beteiligung des Photonik Inkubators aus dem abgeschlossenen PI-Projekt *FiberLab* in Goslar.

Ausblick

Im zurückliegenden Jahr hat sich die Inkubatorinitiative auf dem Gebiet der Photonik zügig weiterentwickelt: Ein erstes Projekt wurde in eine Firmengründung überführt, weitere Projektanträge gingen in die Inkubation, teilweise mit Standorten in der Region, erstmals wird ein Vorhaben, *Patientensicherheit 4.0*, in den Räumlichkeiten des LLG durchgeführt. Nach einem zögerlichen Start im Jahr 2015 erreichen derzeit das PI-Team unter Leitung von Dr. Staub fast wöchentlich neue Projektideen, die sorgfältig evaluiert werden müssen, um die besten von ihnen mit den verbleibenden Bundesmitteln in die Inkubation führen zu können.

Projekte

Projects

As part of the project, the LLG team is aiming to develop an analysis tool for use in intensive care units which will monitor long-term infusions administered by syringe pumps. This will help the medical staff in their work. The new instrument will verify the accuracy of the medication used and will support existing systems in order to improve quality management. The development will be in close collaboration with the university's medical department and a strategic industry partner. The analysis tool for the automated determination of the components of the infusion solutions will determine these on a qualitative and quantitative basis by means of synergistic combination of two optical procedures. As a first step, the procedure will be tested with selected medicines from the cooperation partner. These should be medicines commonly used in intensive care units or which are dangerous in the event of incorrect medication.

The Nanoscale project involves customised light for efficient lighting of personal environments. The applicants from Kassel use large, controllable arrays of micro-mirrors for light control in transmission which can be rapidly actuated and continuously adjusted in unison. The to be developed active window should enable efficient lighting of interior areas through purposefully controlled deflection of daylight, as well as specific heat control, which will have a positive effect on the energy footprint of a building. There is also no competing technology available that can offer shade and heat control for tall buildings above the seventh floor.

In the last meeting of the investment board in 2016, a decision was also made regarding the first spin-off company following the completion of the incubation phase. The board unanimously agreed on the establishment of the new company *FiberSense GmbH* with involvement of the Photonic Incubator from the completed *FiberLab* project in Goslar.

Outlook

The incubator initiative has developed rapidly in the area of photonics over the past year. An initial project resulted in the establishment of a new company, further project applications were received for inclusion in the incubation, some based in the region, while one project will be carried out on the premises of the LLG (*Patientensicherheit 4.0*) for the first time. After a slow start in 2015, the PI team under the leadership of Dr. Staub is now receiving new project ideas almost every week which need to be carefully assessed in order to accept the best ideas into the incubation with the remaining national funding.

Projekte

Projects

Projekt OMEGA-E:

Optische Messung der Gemischbildung am Erdgasmotor, gefördert vom BMBF

Projekt PPA-KISS:

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

Projekt VAMINAP:

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

Projekt:

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

Projekt:

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

Projekt:

The mitochondrion-plasma membrane interaction at super-resolution microscopy, gefördert im Rahmen des Programms Niedersachsen und der Volkswagen Stiftung

Teilprojekt SFB 755 A6:

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

Projekt:

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

Projekte

Projects

Teilprojekt SFB 755 A1:

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

Projekt:

Extended volume detection SMS-microscopy,
gefördert im Rahmen des Exzellenzclusters 171 Mikroskopie im
Nanometerbereich und Molekularphysiologie des Gehirns

Projekt:

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

Projekt:

Licht als Werkzeug: Oberflächenfunktionalisierung zur
Adhäsionsreduzierung von humanen Zellen auf Trauma-implantaten
TRAUMA,
gefördert vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi)

Projekt:

Holographische Lasermarkierung zur fälschungssicheren,
großflächigen Beschriftung metallischer Werkstücke Holo-Mark II,
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
Fluidverfahrenstechnik,
gefördert vom BMWi (ZIM)

Projekt Laser-Implant:

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

Projekt:

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

Projekte

Projects

Teilprojekt SFB 755 C4:

Soft x-ray spectro-microscopy with a lab-scale source,
gefördert im Rahmen des SFB 755 Nanoscale Photonic Imaging

Teilprojekt SFB 755 C8:

Coherent FEL and high harmonic pulses and their wavefronts,
gefördert im Rahmen des SFB 755 Nanoscale Photonic Imaging

Projekt FIHSIW:

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

Projekt WeKokUs:

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

Projekt NEXLab:

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

Projekt SIMAC:

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

COST Action MP1203:

Advanced spatial and temporal X-ray metrology,
gefördert von der Europäischen Union

ESA EarthCare:

Laser Damage Tests for UV ATLID TXA Optics,
gefördert von der Europäischen Weltraumagentur ESA

Patente

Patents

Angemeldete Patente / Patents pending

H. Mittelstädt, C. Geisler, A. Egner

Verfahren zum Lokalisieren wenigstens eines Emitters mittels eines Lokalisationsmikroskops
WO2016156092A1

J. Krüger, C. Geisler, A. Egner

Verfahren und Rasterfluoreszenzlichtmikroskop zum mehrdimensional hochauflösenden Abbilden einer Struktur oder eines Wegs eines Partikels in einer Probe
WO2016156541 A2

T. Fricke-Begemann, J. Ihlemann

Sensor und Herstellungsverfahren für einen Sensor
DE 10 2014 010 402 A1

P. Simon, J.-H. Klein-Wiele

Verfahren und Vorrichtung zur räumlich periodischen Modifikation einer Substratoberfläche unter Verwendung einer telezentrischen F-Theta-Optik
EP 2 547 486 B1

P. Simon, J.-H. Klein-Wiele, C. Dölle, I. Grunwald

Osteosynthetisches Trauma-Implantat
DE 10 2015 102 552 A1

Publikationen

Publications

A. Gucek, J. Jorgacevski, P. Singh, C. Geisler, M. Lisjak, N. Vardjan, M. Kreft, A. Egner, R. Zorec:

Dominant negative SNARE peptides stabilize the fusion pore in a narrow, release-unproductive state, *Cell. Mol. Life Sci.* 79 (199) (2016)

S. J. Sahl, F. Balzarotti, J. Keller-Findeisen, M. Leutenegger, V. Westphal, A. Egner, F. Lavoie-Cardinal, A. Chmyrov, T. Grotjohann, S. Jakobs:

Comment on extended-resolution structured illumination imaging of endocytic and cytoskeletal dynamics. *Science* 352(6285): 527-527 (2016)

N. Mazkereth, F. Rocca, J.-R. Schubert, C. Geisler, Y. Hillman, A. Egner, Z. Fishelson:

Complement triggers relocation of Mortalin/GRP75 from mitochondria to the plasma membrane, *Immunobiology* 221(12): 1395-1406 (2016)

A.B. Borisov, J.C. McCorkindale, S. Poopalasingam, J.W Longworth, P. Simon, S. Szatmári, C.K. Rhodes:

Rewriting the rules governing high intensity interactions of light with matter, *Rep. Prog. Phys.* 79 046401 (2016)

H. Stolzenburg, P. Peretzki, N. Wang, M. Seibt, J. Ihlemann:

Implantation of plasmonic nanoparticles in SiO₂ by pulsed laser irradiation of gold films on SiO_x-coated fused silica and subsequent thermal annealing, *Applied Surface Science* 374, 138 (2016)

R. Karstens, A. Gödecke, A. Prießner, J. Ihlemann:

Fabrication of 250-nm-hole arrays in glass and fused silica by UV laser ablation, *Optics and Laser Technology* 83, 16 (2016)

M. Heinz, V.V. Srabionyan, A.L. Bugaev, V.V. Pryadchenko, E.V. Ishenko, L.A. Avakyan, Y.V. Zubavichus, J. Ihlemann, J. Meinertz, E. Pippel, M. Dubiel, L.A. Bugaev:

Formation of silver nanoparticles in silicate glass using excimer laser radiation: structural characterization by HRTEM, XRD, EXAFS and optical absorption spectra, *Journal of Alloys and Compounds* 681, 307 (2016)

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*, in press

M. Stubenvoll, B. Schäfer, K. Mann, O. Novak:

Photothermal method for absorption measurements in anisotropic crystals, *Rev. Sci. Instrum.* 87, 023904 (2016)

Publikationen

Publications

M. Dubiel, M. Heinz, V. Srabionyan, V.V. Pryadchenko, L.A. Avakyan, Ya. V. Zubavichus, J. Meinertz, J. Ihlemann, L.A. Bugaev:

Silver nanoparticles in silicate glass prepared by UV laser: dependences of size and atomic structure of particles upon irradiation parameters, Journal of Physics: Conference Series 712, 012110 (2016)

R. Karstens, A. Gödecke, A. Prießner, J. Ihlemann:

UV-laser fabrication of sub-micron hole arrays in glass by phase mask projection, DGaO Proceedings (2016)

F. Döring, H. Ulrichs, S. Pagel, M. Müller, M. Mansurova, M. Müller, C. Eberl, T. Erichsen, D. Huebner, P. Vana, K. Mann, M. Münzenberg, H.-U. Krebs:

Confinement of phonon propagation in laser deposited Tungsten/ Polycarbonate multilayers, New J. Phys. 18 (2016)

F.C. Kühl, M. Müller, M. Schellhorn, K. Mann, S. Wieneke, K. Eusterhues:

Near-edge x-ray absorption fine structure spectroscopy at atmospheric pressure with a table-top laser-induced soft x-ray source J. Vac. Sci. Technol. A 34 (2016)

M. Müller, T. Mey, J. Niemeyer, M. Lorenz, K. Mann:

Table-to Soft X-ray Microscopy with a Laser-induced Plasma Source Based on a Pulsed Gas-jet, AIP Conf. Proc. 1764 (2016)

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

Hartmann wavefront sensors and their application at FLASH, J. Synchrotron Rad. 23, 43–49 (2016)

M. Nikl, V. Babin, J. Pejchal, V.V. Laguta, M. Buryi, J.A. Mares, K. Kamada, S. Kurosawa, A. Yoshikawa, D. Panek, P. Bruza, K. Mann, M. Müller:

The stable Ce⁴⁺ center: a new tool to optimize Ce-doped oxide scintillators IEEE Transactions on Nuclear Science, VOL. 63, NO. 2, 433 (2016)

D.S. Ivanov, A. Blumenstein, F. Kleinwort, M.E. Garcia, B. Rethfeld, J. Ihlemann, P. Simon, V.P. Veiko, E. Jakovlev:

Molecular Dynamics Modeling of Periodic Nanostructuring of Au with a UV Short Laser Pulse at a High Fluence Regime, International Symposium Fundamentals of Laser Assisted Micro- and Nanotechnologies (FLAMN-16), St. Petersburg (2016)

Konferenzbeiträge

Conference contributions

H. Wackerbarth:

Angewandte Optik – Abbilden, Analysieren und Strukturieren mit Licht, Bier & Brezeln, Fachbereich Chemie Universität Göttingen (01.2016)

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 (01.2016)

A. Egner, A. Munk:

Statistical reconstruction methods for time varying nanoscale imaging problems, International Symposium Biological Dynamics from Microscopic to Mesoscopic Scales, Grimma (02.2016)

H. Grefe, C. Geisler, A. Egner:

Novel 3D single marker switching microscope with isotropic resolution over large axial range, SPIE Photonics West 2016, Single Molecule Spectroscopy and Superresolution Imaging IX, San Francisco, USA (02.2016)

A. Egner:

New developments in optical nanoscopy, International Symposium 2016 Biological Dynamics from Microscopic to Mesoscopic Scales, Grimma (02.2016)

M. Müller:

Table-top XANES spectroscopy and soft x-ray microscopy with a laser-induced plasma source, International Symposium Biological Dynamics from Microscopic to Mesoscopic Scales, Grimma (02.2016)

B. Schäfer:

Strahl- und Optikcharakterisierung für Anwendungen in der Laser-Materialbearbeitung, DPG Frühjahrstagung, Hannover (02.2016)

K. Mann:

Characterization of Wavefront and Coherence properties of EUV Sources, SPIE Conf. Advanced Lithography, San Jose / USA (02.2016)

Konferenzbeiträge

Conference contributions

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

isoSTED microscopy in living cells, International Symposium 2016
Biological Dynamics from Microscopic to Mesoscopic Scales,
Grimma (02.2016)

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

The formation of nc-Si in SiO_x induced by continuous-wave laser
irradiation, DPG-Frühjahrstagung, Regensburg (03.2016)

H. Mittelstädt, C. Geisler, A. Egner:

Single Marker Switching Microscope with Isotropic Resolution
over Large Axial Range, Focus on Microscopy 2016, Taipei,
Taiwan (03.2016)

B. Schäfer:

Absorption und laserinduzierte Wellenfrontdeformation in optischen
Komponenten, PhotonikNet Workshop Laserstrahlpropagation durch
Hochleistungsoptiken, LLG / Göttingen (03.2016)

J.-R. Schubert, J. Keller-Findeisen, C. Geisler, B. Vinçon, A. Egner:

Low-intensity STED microscope with increased image brightness
and uncompromised resolution, 80. Jahrestagung der DPG und
DPG-Frühjahrstagung, Regensburg (03.2016)

T. Mey:

Propagationseigenschaften von Laserstrahlung
PhotonikNet Workshop Laserstrahlpropagation durch Hochleistungs-
optiken, LLG / Göttingen (03.2016)

K. Mann

Characterization of Wavefront and Coherence properties of High Power
Laser Sources, ELI Prag / CZ, eingel. Vortrag (03.2016)

A. Egner:

Super-resolved fluorescence microscopy: Principle and applications
of STED microscopy, BioImaging Symposium 2016, München (04.2016)

H. Wackerbarth:

SERS, Raman und IR Spektroskopie, PPA-Seminar Gasanalytik und
Gefahrstoffdetektion (eingel. Vortrag), Schwerin (04.2016)

Konferenzbeiträge

Conference contributions

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

Laser pulse reflectivity changes on gold at elevated electronic temperatures, HPLA, Santa Fe (04.2016)

K. Golibrzuch:

Optical Diagnostics for Combustion Analysis and Surface Kinetics, 2nd International Forum on Metrology for Liquefied Natural Gas (LNG) & Alternative Fuels (04.2016)

R. Karstens, A. Gödecke, A. Prießner, J. Ihlemann:

UV-laser fabrication of sub-micron hole arrays in glass by phase mask projection, 117. Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für angewandte Optik, Hannover (05.2016)

S. Bauke, K. Golibrzuch, H. Wackerbarth, O. Thiele, T. Berg:

Quantitative, Time-Resolved Detection of CH₄ in Flows using IR Absorption, 18. GMA/ITG-Fachtagung Sensoren und Messsysteme 2016, doi: 10.5162/sensoren2016/6.2.5, ISBN: 978-3-9816876-0-6 (05.2016)

T. Mey:

Coherence properties of free-electron lasers
Workshop on Wavefront Sensors (PUCCA), ESRF Grenoble/Frankreich, eingel. Vortrag (05.2016)

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

Principles and applications of optical switching assisted imaging and structuring schemes, International Conference on Physics 2016, New Orleans, USA (06.2016)

M. Heinz, M. Dubiel, V. Srabionyan, V. Pryadchenko, L. Avakyan, Y. Zubavichus, J. Meinertz, J. Ihlemann, L. Bugaev:

Silver nanoparticles in silicate glass prepared by UV laser: correlations between the optical properties and the atomic structure of the silver nanoparticles, 90. Glastechnische Tagung Goslar (06.2016)

J. Ihlemann:

UV-Laser Mikro- und Nanostrukturierung von Oberflächen, PhotonicNet-Symposium: Funktionalisierte Oberflächen, Göttingen (06.2016)

H. Wackerbarth:

Applied Optics and Lab on Chip, Lab-on-a-chip Symposium (invited talk), Enschede, Niederlande (06.2016)

Konferenzbeiträge

Conference contributions

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

The formation of nanocrystalline Si in substrate bound silicon rich silicon oxide by damage free continuous wave laser irradiation, 23rd International Symposium on Metastable, Amorphous and Nanostructured Materials (ISMANAM 2016), Nara, Japan (07.2016)

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

The micro-structural analysis of damaged region in substrate-bound silicon-rich silicon oxide induced by continuous wave laser irradiation, 23rd International Symposium on Metastable, Amorphous and Nanostructured Materials (ISMANAM 2016) Nara, Japan (07.2016)

A. Egner, J.R. Schubert, C. Geisler, B. Vinçon:

Low-intensity STED microscope with increased image brightness and uncompromised resolution, SPIE Nanoscience + Engineering, Nanoimaging and Nanospectroscopy IV, San Diego, USA (08.2016)

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

Ultrafast switchable depletion patterns for STED microscopy generated by conical diffraction, 623rd Wilhelm and Else Heraeus-Seminar on Cellular Dynamics, Bad Honnef (09.2016)

J. Ihlemann:

UV-Laser Mikro- und Nanostrukturierung von Oberflächen und Schichten für optische Anwendungen, Seminar Nanostrukturen für optische Komponenten, Aachen (09.2016)

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

Complement triggers relocation of Mortalin/GRP75 from mitochondria to the plasma membrane, 623rd Wilhelm and Else Heraeus-Seminar on Cellular Dynamics, Bad Honnef (09.2016)

S. Bauke, K. Golibrzuch, H. Wackerbarth, O. Thiele, T. Berg,

L. Beckmann, N. Hübner, J. Zachow:

Optical measurement system for quantitative, time-resolved detection of CNG mixture formation in an SI engine; 11. Tagung Gasfahrzeuge, Potsdam (09.2016)

H. Wackerbarth:

Photonische Analytik in Verbrennungsdiagnostik, Umweltanalytik und Sicherheitstechnik, Weiterbildungsseminar Photonic Net Technische Optik in der Praxis (eingel. Vortrag), Göttingen (09.2016)

Konferenzbeiträge

Conference contributions

A. Egner:

Super-resolved fluorescence microscopy: Principle and applications of STED microscopy, 623rd Wilhelm and Else Heraeus-Seminar on Cellular Dynamics, Bad Honnef (09.2016)

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

Formation of silicon nanocrystals by continuous wave laser annealing of SiO_x films, 10th International Conference on Photoexcited Processes and Applications (ICPEPA), Brasov (09.2016)

J. Ihlemann:

UV-Laser Mikro- und Nanostrukturierung von Oberflächen und Schichten für optische Anwendungen, Seminar Nanostrukturen für optische Komponenten, Aachen (09.2016)

K. Mann:

Vom tiefen UV- in den Röntgenbereich: Überblick über aktuelle Arbeiten der Abt. Optik – Kurze Wellenlängen
Auswärtsseminar der Hochschule Zwickau, eingel. Vortrag (09.2016)

K. Mann:

Applications of laser-driven soft x-ray sources and beam characterization at short wavelengths, OST Action MP1203, Athens/Greece (09.2016)

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

Absorption and wavefront deformations in high power laser optics
Boulder Damage Symposium, Boulder/USA (09.2016)

S. Steinhauer, U. Plachetka, J. Barnett, H. Wackerbarth, C. Lenth, J. Born, M. Liebetrau, A. Walte, B. Ungethüm, G. Pelzer, H. Thole:

Vor-Ort-Überwachung von Arzneirückständen, Mikro- und Nanopartikeln im Ablauf städtischer Kläranlagen mittels photonischer Verfahren (VAMINAP), Poster zum Statustreffen des BMBF Förderprogramms Photonik in den Lebenswissenschaften (09.11.2016)

K. Mann:

Absorption, Wellenfrontdeformation und Fokusshift in optischen Hochleistungs-Komponenten DUV/VUV-Workshop,
Fa. Berliner Glas (10.2016)

Konferenzbeiträge / Buchbeiträge

Conference contributions / Book contributions

M. Müller:

Soft x-ray spectro-microscopy with a lab-scale source
SFB 755 Autumn School Nanoscale Photonic Imaging, Göttingen (10.2016)

B. Schäfer:

Experimental setup for measurement of the Wigner distribution and their influence on the determination of beam parameters, wavefront and spatial coherence, SFB 755 Autumn School Nanoscale Photonic Imaging, Göttingen (10.2016)

M. Müller:

Soft x-ray spectro-microscopy with a lab-scale source
SFB 755 Autumn School Nanoscale Photonic Imaging, Göttingen (10.2016)

K. Mann:

Applications of a Table-top Laser Driven EUV/Soft X-ray Source and Wavefront Optimization at Short Wavelengths
Int. Workshop on EUV and Soft X-Ray Sources, Amsterdam / NL, eingel. Vortrag (11.2016)

U. Leinhos, K. Mann

Optical metrology and loss mechanisms in the UV-spectral range
Optimax Systems Inc, Ontario, NY/USA, eingel. Vortrag (11.2016)

K. Golibrzuch:

Cavity-Enhanced Raman-Spektroskopie für Prozessanalytik (CERS-Pro),
E.O.M.-Jahreskonferenz (11.2016)

Buchbeiträge / Book contributions

T. Mey:

Brilliance Improvement of a Laser-Produced Soft X-Ray Plasma
In: High Energy and Short Pulse Lasers, Dr. Richard Viskup (Ed.)
DOI: 10.5772/64149 (2016)

Abschlussarbeiten

Final Thesis

Finn-Erik Digulla:

Ultraschnelle Messung von Temperatur und Kraftstoff-Luft-Verhältnis mittels 2-Kanal IR Absorptionsspektroskopie zur Gemischbildungsanalyse in Erdgas-Motoren

Bachelorarbeit, Georg-August-Universität Göttingen (2016)

Martin Liebetrau:

Chemometrische Differenzierung mehrerer Mikroplastikpartikel mittels Raman-Spektroskopie

Bachelorarbeit, Georg-August-Universität Göttingen (2016)

Astrid Placke:

Aufbau und Optimierung zweier NEXAFS-Spektrometer für Absorptionsmessungen im extremen UV Bereich und im weichen Röntgenbereich

Bachelorarbeit, HAWK Hochschule für Angewandte Wissenschaft und Kunst Göttingen (2016)

Jan Hagemann:

Untersuchung und Charakterisierung von mittels Excimerlaserbeschuss generierten Nanopartikelstrukturen für die oberflächenverstärkte Raman-Spektroskopie

Masterarbeit, HAWK Hochschule für Angewandte Wissenschaft und Kunst, Fakultät Naturwissenschaften und Technik Göttingen (2016)

Malte Henrich:

Quantifizierung der CO₂-Dichte im Motor mittels IR-Absorptionsmessungen bei 2.7µm und 4.2µm

Masterarbeit, HAWK Hochschule für Angewandte Wissenschaft und Kunst, Fakultät Naturwissenschaften und Technik Göttingen (2016)

Melissa Schenker:

Charakterisierung laserinduzierter Wellenfrontaberrationen in Mikroskopobjektiven

Masterarbeit, Georg-August-Universität Göttingen (2016)

Simon Schulze:

Laserinduzierter Vorwärtstransfer zur Herstellung computergenerierter Hologramme, Masterarbeit,

Masterarbeit, HAWK Hochschule für Angewandte Wissenschaft und Kunst (2016)

Ausgewählte Kooperationspartner

Selected Cooperation Partners

International



National



Lokal



Messen und Veranstaltungen

Exhibitions and Events

ZUSE-TAGE

Unter der Schirmherrschaft von Bundeswirtschaftsminister Sigmar Gabriel fanden am 7. und 8. Juni 2016 in Berlin die ZUSE-Tage statt. Gemäß dem Motto "Forschung die ankommt" zeigte das LLG gemeinsam mit den anderen Instituten der ZUSE-Gemeinschaft wie Forschungstransfer erfolgreich gelingt. Die über sechzig Aussteller machten innovative Transferforschung somit erlebbar. Darüber hinaus gaben namenhafte Referenten aus der Forschung und Industrie in einem vielfältigen Vortragsprogramm Einblick in ihre erfolgreichen Projekte und Zusammenarbeiten.



Team des LLG auf den Zuse-Tagen von links: Dr. H. Wackerbarth, M. Müller, B. Sterr, Dr. J. Ihlemann, PD Dr. A. Egner und Dr. P. Simon

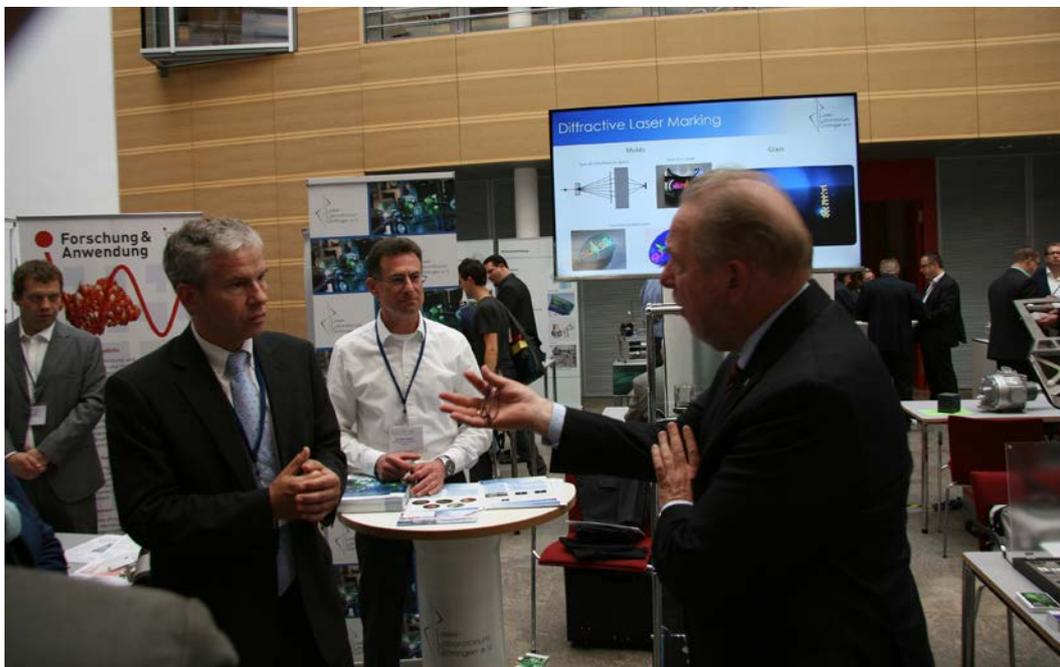
Team of the LLG on the Zuse days from the left: Dr. H. Wackerbarth, M. Müller, B. Sterr, Dr. J. Ihlemann, PD Dr. A. Egner and Dr. P. Simon

Messen und Veranstaltungen

Exhibitions and Events

ZUSE-TAGE

Under the auspices of the Federal Economics Minister Sigmar Gabriel, the ZUSE Days were held in Berlin on 7 and 8 June 2016. In accordance with the motto “Research that matters”, the LLG together with other institutes of the ZUSE-Gemeinschaft showed how the transfer of research can be made a success. The over sixty exhibitors presented innovative transfer research. In addition, well-known speakers from research and industry gave insight into their successful projects and collaborations in diverse lecture programs.



Dr. Jürgen Ihlemann im Gespräch.
Dr. Jürgen Ihlemann in Conversation.

Messen und Veranstaltungen

Exhibitions and Events



Innovationstag Mittelstand des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie

Das Laser-Laboratorium war gleich zweimal als Aussteller auf dem Innovationstag Mittelstand des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMW) vertreten. Erstens stellte das Laser-Laboratorium Göttingen gemeinsam mit der AIRSENSE Analytics GmbH auf der Veranstaltung des BMW ein neu entwickeltes Detektionssystem vor. Der Demonstrator dient der schnellen online Detektion von Explosivstoffen. Das im Rahmen des Netzwerks für Produkt- und Prozesssicherheit (PPA) entwickelte tragbare Detektionssystem kombiniert zwei spektroskopische Technologien miteinander. Durch den parallelen Einsatz der Raman-Spektroskopie sowie der Ionen-Mobilitäts-Spektrometrie wird die Bandbreite erkennbarer Substanzen deutlich vergrößert. Zudem bietet sich dadurch die Möglichkeit, Sprengstoffe zu identifizieren, für deren Nachweis bisher aufwendige Laboranalytik nötig war.



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

Zweitens präsentierte das Laser Laboratorium Göttingen zusammen mit dem Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung (IFAM), Bremen Ergebnisse des F.O.M.-Projektes "Licht als Werkzeug, Oberflächenfunktionalisierung zur Adhäsionsreduzierung von humanen Zellen auf Trauma-implantaten". Ziel dieses Projektes ist die Reduzierung der Zelladhäsion beziehungsweise die Verhinderung der unerwünschten Zellanhaftung auf Trauma-implantaten aus medizinischem Edelstahl durch Lasergestützte Oberflächenfunktionalisierung. Adhäsion von Knochen- und Gewebezellen auf solchen Implantaten führen häufig zu einer schmerz- und komplikationsreichen Implantatentnahme. Eine Reduzierung der Adhäsion verspricht daher Vorteile für den Patienten und den Operateur sowie geringere Operations- und Versorgungskosten. Gezeigt wurden Beispiele zur direkten Laser-Oberflächenmodifikation von Trauma-implantaten aus Edelstahl. Daneben stellte das Laser Laboratorium Göttingen weitere Exponate aus, die die Anwendung der diffraktiven Laser-Direktbeschriftung zur fälschungssicheren Produktkennzeichnung demonstrierten.

Messen und Veranstaltungen

Exhibitions and Events

The Innovation Day of the Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie

The Laser Laboratory was present twice as exhibitor at the Innovation Day of the Mittelstand of the German Federal Ministry of Economics and Energy (BMWi). First the Laser-Laboratorium Göttingen, together with AIRSENSE Analytics GmbH, presented a newly developed detection system at this event. The Demonstrator is a fast online detection system for explosives. The portable detection system, developed as part of the Network for Product and Process Safety (PPA), incorporates two spectroscopic technologies. The combination of Raman spectroscopy and ion-mobility spectrometry significantly increases the range of detectable substances. In addition, this makes it possible to identify explosives whose detection required extensive laboratory analysis in the past.



◀ Teilnehmer des Innovationstag Mittelstand des Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
Participators of the Innovation Day at the Bundesministerium für Wirtschaft und Energie

Second, the Laser Laboratory Göttingen, together with the Fraunhofer Institute for Manufacturing Technology and Applied Material Research (IFAM), presented the results of the F.O.M. project "Light as a tool, surface functionalization for adhesion reduction of human cells to trauma implants". The aim of this project is the reduction and prevention of unwanted cell adhesion to the surface of trauma implants made out of medical stainless steel by means of laser-assisted surface functionalization. The adhesion of bone and tissue cells on such implants often lead to a painful and complicated implant recovery. A reduction in adhesion therefore promises advantages for the patient and the surgeon as well as in lower operation and care costs. Examples of direct laser-surface modification of trauma implants made of stainless steel were presented. In addition, the Laser Laboratory Göttingen showed. The use of diffractive laser direct labeling for counterfeit-proof product identification.

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 28. April 2016 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

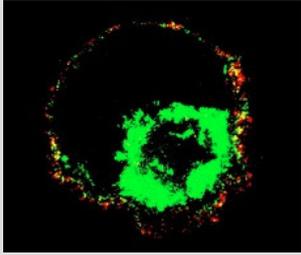
Since 2001, the annual Future Day has given pupils from 5th to 10th grade the opportunity to explore at first hand a range of careers open to both boys and girls. An important event not only for the youngsters, because it is precisely in the areas of mathematics, computer science, natural sciences and 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 28 April 2016, 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.

Pressemitteilungen und Neuigkeiten

Press releases and news



Laser-Laboratorium startet Forschungsk Kooperation mit der Universität Tel-Aviv

Im Rahmen der durch das Niedersächsische Vorab geförderten Forschungs-kooperation wird ein Forschungsvorhaben zwischen der Abteilung Optische Nanoskopie im LLG und dem Institut für Zell- & Entwicklungsbiologie der Universität Tel-Aviv durchgeführt.

Den aktuellen Bericht entnehmen Sie bitte unserer Webseite.



PhotonicNet Workshop im LLG

Vom 15. bis 16. März fand in den Räumen des LLG ein PhotonicNet Workshop zu dem Thema: "Laserstrahlpropagation durch Hochleistungsoptiken" statt.

Den aktuellen Bericht entnehmen Sie bitte unserer Webseite.



Mikrogenaue Vor-Ort-Analytik von Klärwasser

Das jüngst unter Beteiligung des Laser-Laboratoriums Göttingen gestartete Projekt "VAMINAP" hat zum Ziel, Handheld-Geräte für Kläranlagen zu entwickeln, die schnell und exakt hochproblematische Rückstände im Wasser detektieren.

Den aktuellen Bericht entnehmen Sie bitte unserer Webseite.



Aufnahme in die Zuse-Gemeinschaft

Als 3. Institut aus Niedersachsen wurde das LLG zum 26.02.2016 als Mitglied in die "ZUSE-Gemeinschaft" aufgenommen.

Den aktuellen Bericht entnehmen Sie bitte unserer Webseite.



Das LLG bei den ZUSE-Tagen in Berlin

Unter der Schirmherrschaft von Bundeswirtschaftsminister Siegmund Gabriel präsentierte sich das LLG auf den ZUSE-Tagen, vom 07.-08. Juni in Berlin.

Den aktuellen Bericht entnehmen Sie bitte unserer Webseite.



Innovationstag Mittelstand des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie

Das Laser-Laboratorium war gleich zweimal als Aussteller auf dem Innovationstag Mittelstand des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi) am 18. Mai in Berlin vertreten.

Den aktuellen Bericht entnehmen Sie bitte unserer Webseite.

Pressemitteilungen und Neuigkeiten

Press releases and news

Posterpreis der Tagung der Glastechnischen Gesellschaft

Prämiert wurden die Ergebnisse der Zusammenarbeit von Forschern aus Halle, Moskau, Rostov-on-Don (Russland) und dem Laser-Laboratorium Göttingen.

Den aktuellen Bericht entnehmen Sie bitte unserer Webseite.



Laser-Laboratorium Göttingen startet neues Projekt "LaserImplant"

Hochwertige Glasprodukte dauerhaft, fälschungssicher und zerstörungsfrei zu markieren, ist eine große Herausforderung.

Den aktuellen Bericht entnehmen Sie bitte unserer Webseite.



Seminar zum Thema Unternehmensfinanzierung

Am 15.11.2016 fand im Laser-Laboratorium Göttingen ein Seminar zum Thema "Unternehmensfinanzierung" statt. Organisiert und veranstaltet wird das Seminar in Kooperation mit der innos Sperlich GmbH.

Den aktuellen Bericht entnehmen Sie bitte unserer Webseite.



Am 07. Dezember 2016 findet das Forum MikroskopieTrends im Laser-Laboratorium Göttingen statt

"Von der Probe zum digitalen Modell" lautet in diesem Jahr das Thema des Mikroskopieforums.

Den aktuellen Bericht entnehmen Sie bitte unserer Webseite.



1. Platz für Sprengstoffdetektor bei Innovationspreis

Ein Projekt, das Sprengstoffattentaten den Kampf ansagt, hat den Innovationspreis des Innovationsnetzwerks für "Produkt und Prozesssicherheit mittels spektroskopischer Analytik" gewonnen.

Den aktuellen Bericht entnehmen Sie bitte unserer Webseite.



LLG ist Gründungsmitglied des ZIM-Netzwerks Munitect

Das Netzwerk macht sich zur Aufgabe, die technischen Möglichkeiten in der Schad- und Sprengstoffdetektion in freien Gewässern, insbesondere der Nord- und Ostsee, voranzutreiben.

Den aktuellen Bericht entnehmen Sie bitte unserer Webseite.



