

## › Nichtlineare Photonik | Nonlinear Photonics

Institut für Angewandte Physik | Institute of Applied Physics





DÖHRER  
Elektrooptik

THORLABS

HOLOEYE

Spektrum  
DER WISSENSCHAFT

krüper  
Wissen bequemer beschaffen.

# › Nichtlineare Photonik | Nonlinear Photonics

Institut für Angewandte Physik | Institute of Applied Physics

# VORWORT | PREFACE



## Vorwort

„Unsere Arbeitsgruppe begann im April 2001 am Institut für Angewandte Physik der Westfälischen Wilhelms-Universität, nichtlineare Phänomene zu nutzen, um neuartige optische Systeme für Anwendungen zu entwickeln. Der Schlüssel zu vielen Anwendungen liegt in der Beherrschung von Licht in all seinen Eigenschaften.“

Licht fasziniert immer. Licht gibt der Natur Farbe und Stimmung, Licht ist Kunst und Lebenselixier. Insbesondere ist Licht aber auch die Technik von morgen – die Photonik. Dazu gilt es, heute die Grundlagen photonischer Anwendungen zu erarbeiten.

*Light is always fascinating. It gives nature color and spirit, and it is arts and vitality. Especially, light is one of the most exciting key technologies of tomorrow – photonics. Today, we need to develop the basics for the future of photonic applications.*

Wir erreichen dies durch nichtlineare Strukturierung von Material mit Licht. Unsere Forschungsthemen bewegen sich daher immer zwischen Grundlagen nichtlinearer Physik und Anwendungen in optischen und Nanotechnologien. So arbeiten wir an der Vision, vollständig optische Informationssysteme zu realisieren – von holographischen Datenspeichern bis hin zu neuartigen photonischen Kristallen. Zudem kann die Photonik in der Biologie und Medizin viele Fortschritte initiieren. Wir entwickeln neuartige nichtlineare Mikroskope und nutzen die Holographie für die optische Mikromanipulation. In Münster ist dazu ein ideales Umfeld vorhanden – Nichtlineare Physik, Nanotechnologien und Biophotonik werden hier groß geschrieben.

Die Faszination Licht geben wir gerne weiter. So haben wir dazu beigetragen, dass 2006 das Center for Nonlinear Science, ein interdisziplinäres Zentrum für komplexe Systeme, an der WWU Münster etabliert wurde. Auch Schülerinnen und Schüler erfahren seit 2007 im Experimentierlabor MExLab, dass Physik Spaß macht. Mit dieser Broschüre wollen wir einen Einblick in unsere Aktivitäten der letzten zehn Jahre geben – und freuen uns auf die weitere Entwicklung der Photonik im Jahrhundert des Photons.

## Preface

*Our team started in April 2001 at the Institute of Applied Physics of the University of Münster to control nonlinear phenomena and exploit them for novel optical systems. The key to many applications is the control of light in all its features. We achieve it by nonlinear structuring of matter with light. Our research activities are therefore centered around basics of nonlinear physics, and applications in nano- and optical technologies. We are developing the vision of all-optical information processing systems, from holographic data storage and highly selective filters up to novel photonic crystal structures. Moreover, photonics can initiate many discoveries in biology and medicine. We are developing novel nonlinear microscopes and use holography for optical micromanipulation. Münster is an ideal place for these topics – nonlinear physics, nanotechnologies, and biophotonics are key areas of the university and its research centers. We are always devoted to disseminate the fascination of light. For example, we have contributed to establish in 2006 the Center for Nonlinear Science – an interdisciplinary center for complex systems. Moreover, scholars can experience the fun of physics in the hands-on lab MExLab Physics since 2007.*

*This booklet gives an insight into our activities in nonlinear photonics in the last ten years. We are looking forward to many more exciting years of photonics in the century of the photon.*

Münster, im Mai 2011

Cornelia Denz

Prof. Dr. Cornelia Denz

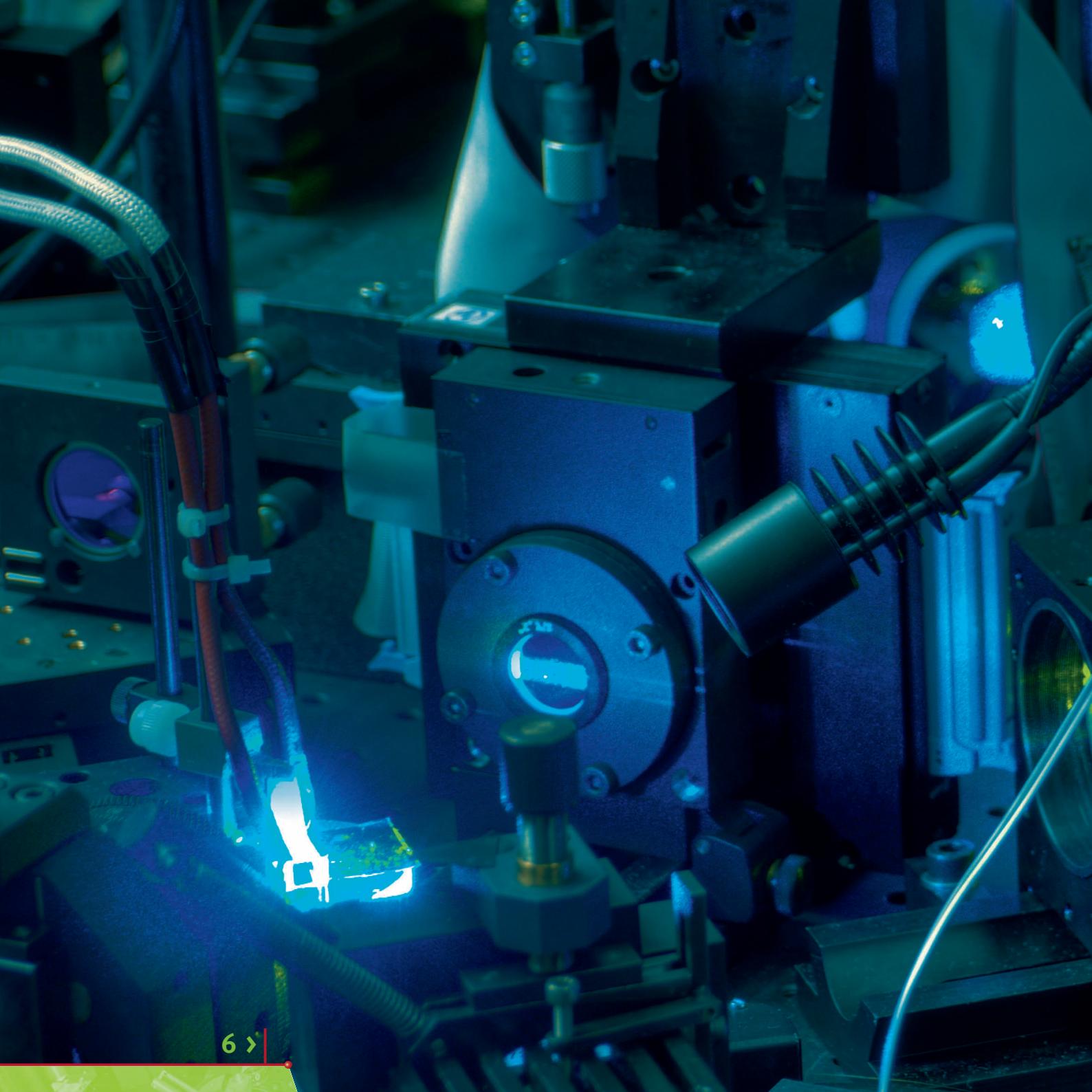


## Inhaltsverzeichnis

- Forschungsaktivitäten
- Biophotonik
- Optische Mikromanipulation
- Photonische Strukturen
- Ultrakurze Laserpulse
- Funktionale Materialien
- Zeitstrahl
- Lehre und Öffentlichkeit
- Team, Kooperationen und Projekte

## Contents

- ⟨ 6 ⟩ *Research Activities*
- ⟨ 9 ⟩ *Biophotonics*
- ⟨ 15 ⟩ *Optical Micromanipulation*
- ⟨ 23 ⟩ *Photonic Structures*
- ⟨ 35 ⟩ *Ultrashort Laser Pulses*
- ⟨ 41 ⟩ *Functional Materials*
- ⟨ 48 ⟩ *Timeline*
- ⟨ 60 ⟩ *Outreach*
- ⟨ 72 ⟩ *Team, Cooperations, and Projects*



6 >



# FORSCHUNGSAKTIVITÄTEN RESEARCH ACTIVITIES



**HENDRIK DEITMAR**

schrieb seine Diplomarbeit 2005 über die Realisierung eines Neuigkeitsfiltermoduls auf Basis photorefraktiver Strahlkopplung. Seit 2006 ist er in der Unternehmensberatung tätig.

## Drei Fragen an Ehemalige

### Was ist Ihre besondere Erinnerung an das Studium in Münster?

› Mit Rückblick auf das Studentenleben fallen mir insbesondere die vielen Freiheiten in dieser Zeit ein – sowohl in Bezug auf die Ausgestaltung des Physikstudiums als auch die Möglichkeit, selbstbestimmt über die eigene Zeit zu verfügen und die schönen Seiten des Studenten- und Nachtlebens in Münster genießen zu können.

### Welches war die besondere Herausforderung oder das Highlight Ihrer Arbeit?

› An meiner Arbeit hat mich die Kombination aus aktueller Forschung im Zukunftsfeld Photonik mit der großen Anwendungsnähe fasziniert – Thema der Diplomarbeit war die Erstellung eines kompakten optischen Neuigkeitsfiltermoduls zur Integration in ein konventionelles Mikroskop. Beeindruckt hat mich die Zusammenarbeit im Team, die es erst ermöglichte, die vielfältigen Herausforderungen des wissenschaftlichen Alltags zu lösen.

### Wie sind Sie zu Ihrem jetzigen Beruf gekommen? Wie ist dies mit den Themen und Arbeitsweisen der AG verbunden?

› Seit nunmehr 3,5 Jahren arbeite ich im Bereich Strategie bei zeb/, einer Unternehmensberatung für Banken und Versicherungen. Erfreulicherweise genießen Physiker in der Wirtschaft den Ruf, als „intellektuelle Allzweckwaffe“ einsetzbar zu sein. Geschätzt wird die analytische Herangehensweise und die Fähigkeit, unstrukturierte Probleme niederzuringen. Die Arbeitsweise im Team von Frau Prof. Denz ist aufgrund der ständig wechselnden Themen und Herausforderungen mit Beratungsprojekten gut vergleichbar – und das bei fairen Arbeitszeiten und ohne Hotelleben.



## BIOPHOTONIK

In den biomedizinischen Wissenschaften gibt es einen immensen Bedarf für innovative mikroskopische Abbildungs- und Manipulationsverfahren. Wir entwickeln neuartige Methoden der Mikroskopie und nutzen optische Pinzetten für biophysikalische Untersuchungen auf der Einzelzellebene.

## BIOPHOTONICS

*In biomedical sciences exists a vast demand for adequate microscopic imaging and manipulation techniques that can only be met by novel photonic approaches. We develop innovative microscopy methods and use optical tweezers for biophysical investigations on single cell levels.*

## Dynamisches Phasenkontrastmikroskop

### ZELLDYNAMIK UND FLUIDBEWEGUNG EINFACH SEHEN

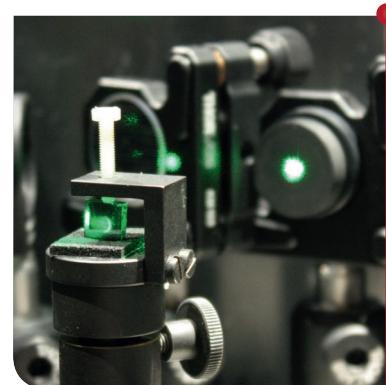
In der Biologie und in der Medizin ist die Beobachtung von sich bewegenden Objekten – insbesondere von Zellkulturen, Bakterien oder Kleinstlebewesen – ein wichtiger Aspekt der Analyse. Gleichzeitig ist jedoch die mikroskopische Beobachtung solcher Lebewesen nur schwer möglich: Biologische Objekte absorbieren meist nur sehr wenig Licht, und sind daher fast vollständig transparente Objekte (Phasenobjekte), die mit herkömmlichen Mikroskopen nicht sichtbar sind.

Die bisherigen Verfahren, mit denen Phasenobjekte durch Kontrasterhöhung sichtbar gemacht werden können, sind das Zernike-Phasenkontrastverfahren oder digitalholographische Methoden. Während der traditionelle Zernike-Phasenkontrast nur für sehr kleine Phasenänderungen eine quantitative Aussage zulässt, und zudem meist einen störenden ebenso kontrastreichen Hintergrund enthält, ist die digitalholographische Rekonstruktion des Objektbildes oft mit großem Rechenaufwand verbunden. Für solche Anwendungen stellt das dynamische Phasenkontrastverfahren eine attraktive Alternative dar, da es die Beobachtung von intra- und interzellulärer Dynamik oder von Mischvorgängen in kleinsten medizinischen Laboren – Lab-on-a-Chip – in Echtzeit und ohne jede numerische Rekonstruktion erlaubt.

### DYNAMISCHER PHASENKONTRAST FÜR DIE BEWEGUNGSANALYSE

In unserer Arbeitsgruppe haben wir dieses Verfahren durch Integration eines photorefraktiven Neuigkeitsfilters in ein kommerziell erhältliches Inversmikroskop realisiert und als modulare Ergänzung für herkömmliche Mikroskope patentiert. Der Neuigkeitsfilter nutzt den Effekt der Zwei-Strahl-Kopplung in einem diffusionsdominierten photorefraktiven Material. Hierbei wird das mikroskopische Bild im Material mit einem Referenzstrahl überlagert, der konstant in Amplitude und Phase ist. Durch den photorefraktiven Effekt entsteht ein Brechungsindexgitter, das über die Interaktion der Strahlen für einen Energietransfer von Signal- zur Referenzwelle derart sorgt, dass im

stationären Fall die Bildinformation verschwindet, da die gesamte Lichtenergie in den Referenzstrahl transferiert worden ist. Verändert sich nun die Bildinformation, ist die Bedingung für Strahlkopplung verletzt, und der entsprechende Teil des Bildes wird transmittiert. Damit werden automatisch stationäre Inhalte unterdrückt und Bewegungen deutlich hervorgehoben. So erlaubt das dynamische Phasenkontrastmikroskop eine markerfreie und kontaktlose Beobachtung am lebenden Objekt mit einer sehr geringen Lichtbelastung.



Neugkeitsfilternder photorefraktiver Kristall in Aktion | Novelty filtering photorefractive crystal in action

Das Verfahren kann von uns auch zur quantitativen Messung von Phasenverzögerungen genutzt werden, wobei sich der Messbereich durch eine Zwei-Wellenlängenmethode bis auf ein Vielfaches des normalen Messbereichs von  $0 \leq \phi \leq \pi$  ausdehnen lässt. Hiermit lassen sich eigentlich unsichtbare Mischvorgänge mit einer Auflösung von  $\lambda/20$  quantifizieren.



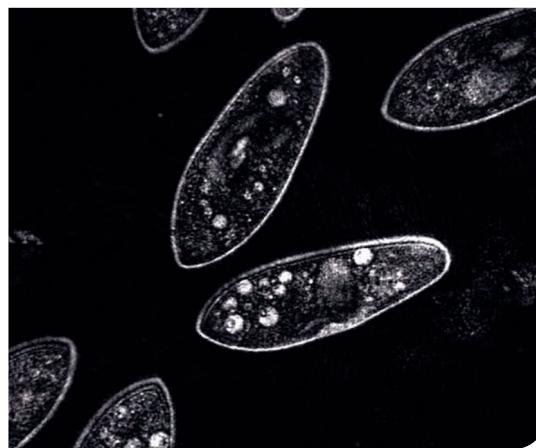
## Dynamic Phase-Contrast Microscopy

### STRAIGHT-FORWARD VISUALIZATION OF CELLS AND FLUID MOVEMENT

*The observation of moving objects accounts for an important aspect of analysis in medicine and biology, especially with respect to cell cultures, bacteria and microorganisms. Concurrently, the microscopic observation of these organisms is difficult: They absorb only very little light, and are therefore almost perfectly transparent (phase objects), which makes them invisible in conventional bright field microscopes.*

Methods that can visualize phase objects by increasing the contrast are Zernike phase contrast or digital holographic approaches. Zernike phase contrast, however, only allows quantitative measurements of very small phase retardations, and reconstructing a hologram numerically requires considerable computing power.

For these applications, Dynamic Phase-Contrast Microscopy (DynPCM) represents an attractive alternative, since it allows the observation of intra- and intercellular dynamics or, for example, mixing processes in Lab-on-a-Chip devices in real-time and without any numerical reconstruction.



Mikroskopische Beobachtung intra- und interzellulärer dynamischer Vorgänge in *Paramecium gaudatum* (Größe ca. 50 µm) | Visualizing intra- and intercellular dynamics of *Paramecium gaudatum* (size about 50 µm)

### DynPCM FOR MOTION ANALYSIS

In our group, we have realized DynPCM by integration of a modular photorefractive novelty filter into a commercially available inverted microscope, which allows the upgrade of any conventional microscope, and is a pending patent.

The novelty filter exploits the effect of two-beam-coupling in a diffusion-dominated photorefractive material, where an information-bearing signal beam overlaps with a constant reference beam inside the material. Due to the photorefractive effect, a refractive index grating is formed, by which the two beams interact in such a way that energy is transferred from the signal to the reference beam. In the stationary case, all energy is transferred from the signal beam to the reference beam, leading to a dark output of the novelty filter. If a change is detected in the signal beam, the photorefractive grating no longer provides this energy transfer, and the signal output becomes bright. This way, the system automatically suppresses static image information and highlights the dynamics, which allows a marker-free and contactless observation of objects *in-vivo* with minimum light pollution. The system can also be used for the quantitative measurement of phase retardations. Using a two-wavelength setup, the measurement range can be extended beyond the usual unambiguous limit of  $0 \leq \varphi \leq \pi$ . With such a setup, normally invisible technical mixing processes can be quantized with an accuracy of  $\lambda/20$ .

## Optische Pinzette

### DAS UNIVERSELLE WERKZEUG AUS LICHT

Seit der Entdeckung Arthur Ashkins vor 25 Jahren, dass der Strahlungsdruck von Licht in einem stark fokussierten Laserstrahl mikroskopische Objekte dreidimensional festhalten, bewegen oder auch drehen kann, hat sich für optische Pinzetten ein sehr breites Anwendungsfeld in der Biophotonik entwickelt. Die wohl wichtigsten Anwendungen liegen derzeit im Bereich der Molekular- und Zellbiologie, wo Organellen und Kompartimente in Zellen manipuliert und kontrolliert, oder kleinste Kräfte der Zellwechselwirkung mit sehr großer Genauigkeit vermessen werden können.

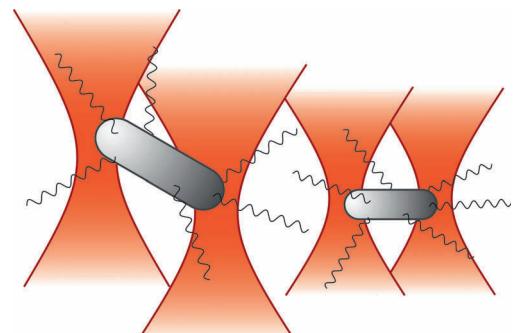
Im Vergleich zu klassischen Manipulationsmethoden besitzen optische Pinzetten wesentliche Vorteile. Die Manipulation kleinsten Objekts kann mit größter Genauigkeit bis in den Nanometerbereich erfolgen. Dabei gibt es keinen direkten Kontakt mit der Probe, so dass automatisch eine Kontaminierung verhindert und eine sterile Arbeitsweise möglich wird. Für quantitative Untersuchungen ist es außerdem von unschätzbarem Wert, dass kleinste Kräfte im Bereich von Nano- und Pikonewton gezielt ausgeübt und gemessen werden können. In unseren aktuellen Arbeiten messen wir darüber hinaus viele biophysikalische Eigenschaften unterschiedlicher biologischer Zellen mit optischen Pinzetten. Neben der Bestimmung von Fortbewegungskräften und Rotationseigenschaften von bakteriellen molekularen Motoren sind insbesondere Elastizitätsuntersuchungen an Einzelzellen ein aktueller Forschungsgegenstand.

#### EIN SPANNENDES ANWENDUNGSBEISPIEL: UNTERSUCHUNGEN AN STÄBCHENFÖRMIGEN BAKTERIEN

Bakterien sind von Natur aus optimiert für die Fortbewegung bei kleinen Reynolds-Zahlen. Ihr Fortbewegungsapparat gehört zu den kleinsten bekannten Motorkomplexen überhaupt, und sie besitzen zudem selbstreproduzierende Eigenschaften. Deshalb werden derzeit zahlreiche Verfahren untersucht, diese Nanomotoren für neuartige Anwendungen zu nutzen. Dazu gehören der Einsatz als Mikromischer oder die Nutzung als selbstangetriebene biohybride Maschinen. Der Schlüssel zur gezielten Ausrichtung von Bakterien

ist die gleichzeitige Nutzung mehrerer, präzise vorbereiteter optischer Pinzetten. Im einfachsten Fall genügen zwei Einzelpinzetten, die nahe der beiden Pole eines Bakteriums angreifen. Sie erzeugen bei geeigneten Trajektorien das nötige Drehmoment für eine gezielte, präzise Drehung um alle Raumachsen. Anstelle der aufwändigen Erzeugung einzelner Pinzetten in höherer Anzahl setzen wir holographische Verfahren ein, um flexibel eine große Anzahl an optischen Pinzetten zu erzeugen. Dieses Verfahren skaliert sehr gut und es ist möglich, viele einzelne Zellen zu fangen, gleichzeitig individuell auszurichten und zu bewegen, oder biologische Untersuchungen zu parallelisieren.

Mit Hilfe einer solchen holographisch optischen Pinzette ist es uns kürzlich gelungen, bakterielle molekulare Motoren so anzutreiben, dass sie sich im Takt bewegen können und damit Funktionen wie große Motoren realisieren. Durch die hochgradig strukturierte Anhaftung auf Oberflächen konnten wir erstmals motile Bakterien permanent geordnet fixieren und damit Rotoren für mikrofluidische Anwendungen konstruieren.





# Optical Tweezers

## VERSATILE TOOLS OF LIGHT

*Since Arthur Ashkin's discovery 25 years ago that the radiation pressure of light can be utilized to confine, move, or rotate microscopic objects in all three dimensions, a wide field of applications has emerged for optical tweezers in biophotonics. Currently, the most important applications are in the field of molecular and cell biology where organelles or compartments of biological cells are manipulated and controlled and smallest forces of cell interactions can be measured with highest precision.*

In contrast to conventional methods of micro-manipulation, optical tweezers show substantial advantages. Tiniest objects can be manipulated with highest precision down to the nanometer scale. As the method is contact-free, it is absolutely sterile, and any contamination of the specimen can be inhibited. Furthermore, for quantitative investigations, it is invaluable that very small forces of nano- and piconewtons can be measured and exerted in a defined way. As one of our current activities we determine several biophysical properties of various biological cells with optical tweezers. Besides the analysis of locomotive forces and rotation properties of bacterial molecular motors, in particular investigations on the elastic properties of cells are of recent interest.

### AN EXCITING EXAMPLE OF APPLICATIONS: INVESTIGATIONS ON ROD-SHAPED BACTERIA

Bacteria are by nature optimally prepared for locomotion at small Reynolds numbers. Their locomotive system is one of the smallest motor complexes that are known, and additionally they feature self-reproducing properties. Therefore there are several methods under investigation how to utilize these nanomotors for novel applications as for example micro mixers or self-propelled biohybrid machines. The crucial idea for arbitrary aligning and orienting of bacteria is the simultaneous use of multiple, precisely prepared tweezers. In the simplest case this approach requires two independent tweezers that act close to both poles of a bacterium. If their trajectories



Nachwuchswissenschaftler bei der Analyse kooperativer Effekte an *B. subtilis* | Young research scientist analysing cooperative effects on *B. subtilis*

are chosen properly, the traps can create the required torque for a defined, precise rotation with respect to all axes.

Instead of expensive manual generation of multiple single tweezers, we utilize holographic techniques in order to flexibly create a multitude of optical tweezers. This approach scales very well. It is possible to trap multiple cells simultaneously, and at the same time align and position them individually, or use them in biological assays.

Using holographic optical tweezers, we were recently able to organize bacterial molecular motors in such a way that they can synchronize and thus mimic functions of larger motors. By means of highly structured adherence on surfaces we were able to immobilize motile bacteria permanently and in an ordered way and thereby construct rotors for microfluidic applications.



**OLIVER GROTHE**

diplomierte 2005 zur Entwicklung eines bildgebenden Messverfahrens für die Analyse von Strömungen und Mischungsvorgängen. Er promovierte danach in den Wirtschaftswissenschaften an der Universität zu Köln.



**KATHARINA HAVERMANN**

hat 2008 ihre Diplomarbeit zur Synchronisation in einem nichtlinearen Rückkopplungssystem beendet. Seitdem promoviert sie in der Psychologie an der Untersuchung visueller Wahrnehmung.

## Drei Fragen an Ehemalige

### Was ist Ihre besondere Erinnerung an das Studium in Münster?

› Eine ganz besondere Erinnerung und auch Vorbild ist es, in der Gruppe das Gefühl gehabt zu haben, als Diplomand sehr ernst genommen zu werden und als vollwertiges Teammitglied an praxisrelevanten Forschungen mitarbeiten zu können. Jetzt sehe ich, dass es oft nicht einfach ist, Absolventen dieses Gefühl zu vermitteln.

### Was war die besondere Herausforderung oder das Highlight Ihrer Arbeit?

› Grob gesprochen haben wir Methoden der nichtlinearen Optik innerhalb eines Projektes mit Ingenieuren so weiterentwickelt, dass sie im Praxisalltag zur optischen Analyse von Strömungen und Mischungen auf makro- und mikroskopischer Ebene eingesetzt werden können. Dabei bestanden viele physikalisch-inhaltliche sowie

interdisziplinäre Herausforderungen. Zu den Highlights zählen die entstandenen Ergebnisse sowie unsere Veröffentlichungen.

### Wie sind Sie zu Ihrem jetzigen Beruf gekommen? Wie ist dies mit den Themen und Arbeitsweisen der AG verbunden?

› Dieses war zufällig. Bei Google fand ich ein attraktives Stipendium für eine Promotion im Bereich quantitativer Methoden der Wirtschaftswissenschaften. Während der Promotion gründete ich eine Beratungsgesellschaft, merkte bei Beratungsprojekten in Unternehmen jedoch, dass ich das Umfeld der Uni hauptberuflich nicht verlassen wollte. Geprägt durch die AG arbeite ich gleichermaßen mit Theorie und Anwendung, immer mit Blick auf nichtlineare Effekte.

### Was ist Ihre besondere Erinnerung an das Studium in Münster?

› Das Studium in Münster steht für mich für familiäre Atmosphäre und ein idyllisches Umfeld. Münster hat mich deshalb auch bis jetzt nicht „losgelassen“.

### Was war die besondere Herausforderung oder das Highlight Ihrer Arbeit?

› Der Moment, wenn eine lang geplante Messung klappt, ein aufwändig konstruierter Aufbau funktioniert, der vermutete Effekt sich in den Daten zeigt, war und ist immer wieder ein Highlight.

### Wie sind Sie zu Ihrem jetzigen Beruf gekommen? Wie ist dies mit den Themen und Arbeitsweisen der AG verbunden?

› Ich bin der Optik im weiteren Sinne verhaftet geblieben und untersuche im Rahmen meiner Promotion die kognitive Steuerung von Augenbewegungen.



## OPTISCHE MIKROMANIPULATION

ist ein interdisziplinärer Forschungsschwerpunkt, der die kontaktfreie, mehrdimensionale Anordnung und Organisation von Mikropartikeln ermöglicht. Er umfasst verschiedene Techniken, die durch die Strukturierung von Lichtfeldern sowohl reversible als auch permanente Manipulationen ermöglichen und findet z. B. innovative Anwendungen in der Opto-Fluidik oder der supramolekularen Organisation.

## OPTICAL MICROMANIPULATION

*is an interdisciplinary research area that enables non-contact, multi-dimensional arrangement and organization of microparticles. It includes various techniques that enable both reversible and persistent manipulation by structuring light fields. Innovative applications arise, for example, in the context of optofluidics or supramolecular organization.*

## Holographische optische Pinzette

### HOLOGRAMME ZUR MIKROMANIPULATION

Optische Pinzetten ermöglichen es, ein mikroskopisches Objekt im Größenbereich von Nano- und Mikrometern festzuhalten und sehr präzise zu bewegen. Für viele Anwendungen ist es aber wichtig, mehr als nur ein einzelnes Objekt gleichzeitig kontrollieren zu können.

Mit holographischen Verfahren erweitern wir das Grundprinzip der optischen Pinzette sehr elegant auf die optische Kontrolle vieler Partikel. Dafür modulieren wir die Phasenfront eines Laserlichtfeldes gezielt räumlich durch computerberechnete Hologramme, so dass in der mikroskopischen Probe eine Vielzahl an einzelnen optischen Pinzetten entsteht.

Eine holographische optische Pinzette im Einsatz | *Holographic optical tweezers at work*

Jedes individuell berechnete Hologramm erzeugt je nach Anwendung beispielsweise hunderte Kopien der einfallenden Lichtwelle, denen jeweils beliebige dreidimensionale Positionsinformationen aufgeprägt werden. Die Hologramme werden in Echtzeit berechnet und auf einem geeigneten Flüssigkristalldisplay in schneller Folge dargestellt. Dadurch kann jede einzelne Pinzette sehr schnell und unabhängig von den übrigen völlig frei in der Probe positioniert werden. Weiterhin beschäftigen wir uns mit der Optimierung der Hologrammberechnung, um unerwünschte Effekte wie Geisterfallenbildung zu eliminieren. Viele Anwendungsszenarien sind erst durch holographische optische Pinzetten möglich und können mit einer einzelnen optischen Pinzette nicht realisiert werden. Neben der naheliegenden Parallelisierung von Einzelmessungen kann es beispielsweise zur Bestimmung der Bindungskraft zweier mikroskopischer Objekte wichtig sein, beide Objekte festzuhalten und

dann definiert auseinanderzuziehen. Bei nicht-sphärischen Teilchen können außerdem mehrere Einzelfallen, abgestimmt auf die jeweilige Form, dazu genutzt werden, das Objekt in eine definierte Lage zu drehen und frei auszurichten.

### OPTISCH INDUIZIERTE ORGANISATION

Hochaktuelle Themen in Biologie und molekularer Medizin beschäftigen sich mit der Frage, wie in komplexen Systemen biologische, chemische oder physikalische Prozesse verstanden und gesteuert werden können. Die Rolle der Selbstorganisation und Selbststrukturierung wird in den letzten Jahren immer mehr erkannt. Damit einher geht aber auch ein stärkerer Bedarf an Kontrolle, Steuerung und gezieltem Eingriff in diese Prozesse. Holographische optische Pinzetten haben hier eine herausragende Bedeutung. Beispielsweise wird es erst durch die Möglichkeit zur gleichzeitigen Kontrolle von Position und Orientierung vieler Partikel praktikabel, spezielle Nanocontainer anzutragen und zu strukturieren. Diese Nanocontainer können unterschiedliche chemische Ladungen enthalten und bei geeigneter interner Strukturierung, wie sie beispielsweise Zeolithe aufweisen, die supramolekulare Organisation der Gastmoleküle bewirken. Wir haben nun erreicht, diese Nanocontainer ihrerseits nur mit Hilfe von Licht anzutragen. Dadurch entsteht ein System, das auf verschiedenen Größen-skalen – von den einzelnen Molekülen bis in den Mikrometerbereich – hochgradig geordnet ist und dadurch neue, spannende Eigenschaften des Gesamt-systems bewirken kann.





## Holographic Optical Tweezers

### HOLOGRAMS FOR MICromanipulation

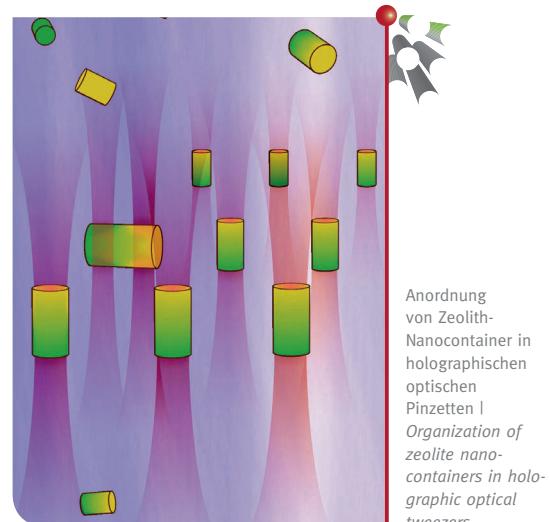
Optical tweezers enable us to confine a microscopic object of nano- or micrometers and move it precisely. Many applications, however, require the ability to control more than one object simultaneously. Holographic optical tweezers elegantly extend the basic principle of optical tweezers towards the optical control of a multitude of particles. For this purpose we modulate the phase-front of a laser light field spatially by means of computer generated holograms in order to create several single tweezers in the microscopic sample at the same time.

Each individually calculated hologram can, for example, yield hundreds of copies of the incident light wave, which can be fully tailored with respect to their three-dimensional position information. The holograms are calculated in real-time and displayed on a suitable liquid crystal display in rapid sequence. By this means each individual trap can be positioned arbitrarily inside the sample and the position can be changed dynamically. Furthermore, we are engaged in the optimization of the hologram calculation in order to eliminate undesirable effects as ghost trap formation.

Many application scenarios are only possible with holographic optical tweezers and cannot be realized with single optical tweezers. One obvious application is the parallel execution of many single experiments. As another example, in order to measure the binding force of two microscopic objects it might be necessary to hold both objects and then separate them in a defined way. With non-spherical objects it is furthermore possible to use multiple traps – tailored to the object shape – in order to rotate the object into a defined orientation and align it arbitrarily.

### OPTICALLY INDUCED ORGANIZATION

Highly topical subjects in biology and molecular medical sciences envisage the question how biological, chemical, or physical processes in complex systems can be understood and controlled. The important role of self organization and self structuring is more and more revealed in the recent years. With this development attends a strong need for control



and defined intervention in these processes. Here, holographic optical tweezers are of outstanding importance. For example, only the simultaneous control of position and orientation of several particles makes it feasible to arrange and structure particular nanocontainers. These nanocontainers can host various chemical loadings and with suitable internal structuring, as e.g. zeolites possess, supramolecular organization of the guest molecules can be achieved. We have achieved to organize these containers themselves solely by optical means. Thus a system emerges that is highly ordered on different length scales – from the single molecules up to the micrometer scale – and thereby can exhibit novel, exciting properties.

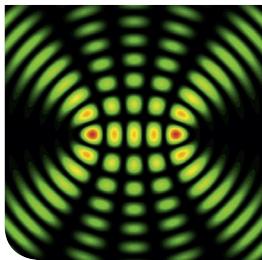
# OPTISCHE MIKROMANIPULATION

LICHT KONTROLLIERT NANOPARTIKEL

## Maßgeschneiderte Lichtfelder

EIN NEUER ANSATZ FÜR KOMPLEXE OPTISCHE FÄLLEN

Bisher wird die Nanostrukturierung von Oberflächen durch chemische Verfahren oder Selbstorganisation in Form von kollektiver Anordnung von Molekülen ermöglicht. Neben dieser kollektiven Organisation werden jedoch die individuelle Manipulation und Selektion immer wichtiger für die Funktionalisierung und Strukturierung von Materie, so dass neue Ansätze gefragt sind. Mit maßgeschneiderten Lichtfeldern entwickeln wir einen neuen Ansatz, der durch ein hohes Maß an Flexibilität Lichtfelder für individuelle Fragestellungen zur Verfügung stellt.

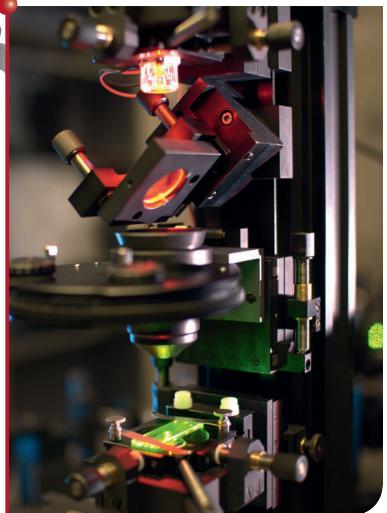


Mathieu-Strahl 4. Ordnung |  
Mathieu beam of 4<sup>th</sup> order

Parallel zu holographischen optischen Pinzetten berechnen wir spezielle, transversal komplexe Lichtmoden, die mit Flüssigkristalldisplays dargestellt werden können. Solche maßgeschneiderten Lichtfelder setzen wir für die optische Manipulation ausgedehnter dreidimensionaler Strukturen ein, da sie sich sowohl durch eine transversale Vielfalt als auch durch definierte Propagationseigenschaften auszeichnen und nicht wie holographisch optische Pinzetten auf diskrete Ebenen beschränkt sind. Unser aktueller Fokus liegt auf Lichtfeldern in elliptischer Geometrie, die durch den zusätzlichen Freiheitsgrad der Elliptizität sowohl eine größere Auswahl an Strahlformen bieten, als auch radiale und kartesische Geometrien mit einschließen.

### MATHIEU-STRÄHLEN

Nichtbeugende Lichtfelder, deren elliptische Lösungen Mathieu-Strahlen darstellen, sind von besonderer Bedeutung für die mehrdimensionale Mikromanipulation. Sie zeichnen sich durch ihre scheinbar divergenzfreie Propagation aus, die es ermöglicht, ausgedehnte dreidimensionale Strukturen zu erzeugen. Uns ist es in aktuellen Experimenten gemeinsam mit unseren Kooperationspartnern an der University of Glasgow gelungen, mit Hilfe von Mathieu-Strahlen sphärische und elongierte Mikropartikel dreidimensional anzurorden. Als besonderes Highlight konnten wir durch die Implementierung von maßgeschneiderten Lichtfeldern in ein stereoskopisches Mikroskop die dreidimensionale Partikelanordnung direkt visualisieren. Die so erzeugten Strukturen versprechen zahlreiche Anwen-



Aufbau einer  
maßgeschneiderten  
optischen Pinzette I  
*Tailored optical  
tweezers setup*

dungen, von denen speziell die Manipulation von funktionalisierten oder geometrisch komplexen Materialien von Bedeutung ist.

### INCE-GAUSS-STRÄHLEN

Selbstähnliche Lichtfelder sind die zweite Klasse von Lichtfeldern, die sich für die maßgeschneiderte optische Manipulation anbieten. Sie zeigen im Gegensatz zu nichtbeugenden Lichtfeldern Divergenz, wobei ihre transversale Amplituden- und Phasenverteilung allerdings im Fernfeld erhalten bleibt. Ince-Gauß-Strahlen stellen ebenfalls Lösungen in elliptischen Koordinaten dar, so dass aufgrund ihrer Modenvielfalt auch hier Mikropartikel in unterschiedlichsten Konfigurationen zwei- und dreidimensional organisiert werden können. Außerdem eignen sie sich zur Untersuchung von Licht-Materie Wechselwirkungen, welche interdisziplinär Beachtung findet. Unsere bisherigen Ergebnisse stoßen auf durchweg positive Resonanz, was die wachsende Gewichtung dieses Themas herausstreckt.



# Tailored Light Fields

## A NOVEL APPROACH FOR COMPLEX OPTICAL TRAPS

*Nanostructuring of surfaces through chemical techniques or self-organization in the form of collective arrangements of molecules is already established. In addition to this collective organization also individual manipulation and selection gets more and more important for the functionalization and three-dimensional structuring of matter, so that new approaches are needed. With our tailored light fields we develop a novel approach, which offers light modes for individual issues by a high degree of flexibility.*

As a complementary approach to holographic optical tweezers, we calculate special, transverse complex light modes, which can be displayed on liquid crystal modulators. Such tailored light fields are employed by us for the optical manipulation of extended three-dimensional structures, as they are characterized by transverse diversity as well as by defined propagation properties. Currently, we focus on light fields in elliptical geometries, as by the additional degree of freedom of ellipticity they offer both a wider range of beam shapes and the inclusion of radial and Cartesian geometries.

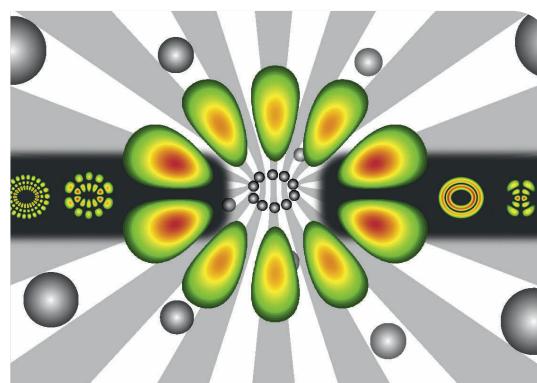
### MATHIEU BEAMS

Non-diffracting light fields, whose elliptic solutions are given by Mathieu beams, are of particular interest for multi-dimensional micromanipulation. They are characterized by their seemingly divergence-free propagation, which allows to generate extensive three-dimensional structures. In cooperation with the

University of Glasgow, we recently demonstrated the arrangement of elongated and spherical microparticles in three dimensions by non-diffracting Mathieu beams. As a special highlight, we were able to directly visualize the three-dimensional particle arrangement by the implementation of tailored light fields in a stereoscopic microscope. Since the so-generated structures indicate promising applications, especially the manipulation of functionalized or geometrically complex materials is of significance.

### INCE-GAUSSIAN BEAMS

Self-similar light fields are a second class of modes, which are well suited for optical micromanipulation. As opposed to non-diffracting light fields, they show divergence while their transverse amplitude and phase distribution remains preserved in the far field. Ince-Gaussian beams also represent solutions in elliptical coordinates, so that because of their diversity of modes, microparticles can be organized two- and three-dimensionally in different configurations. Additionally, they are suited for the investigation of light and matter interactions, which find interdisciplinary attention. Our results so far come across very positive response, showing the growing importance of this topic.



Ince-Gauß-Strahlen – unser neues Konzept der optischen Mikromanipulation | Ince-Gaussian beams – our novel concept in optical micromanipulation

# OPTISCHE MIKROMANIPULATION

LICHT KONTROLLEERT NANOPARTIKEL

## Partikelmanipulation durch Licht

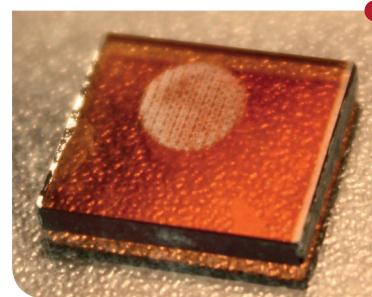
### LICHTINDUZIERTE DIELEKTROPHORESE

Die Kontrolle von Materie auf kleinsten Längenskalen hat mit der Entwicklung der Nanotechnologie zunehmend an Bedeutung gewonnen. Für die präzise Kontrolle von wenigen Partikeln eignen sich optische Pinzetten hervorragend, ihre Skalierbarkeit ist jedoch häufig durch die verfügbare Laserleistung begrenzt. Als Bindeglied zu mechanischen Verfahren ist die Dielektrophorese in der Lage, viele tausend Objekte gleichzeitig auf einer prinzipiell unbegrenzt großen Fläche zu manipulieren.

Dielektrophorese ist ein elektronischer Effekt in stark modulierten elektrischen Feldern, bei dem auf lokal induzierte Dipole im zu manipulierenden Objekt eine anziehende oder abstoßende Kraft ausgeübt wird, je nach elektrischen Eigenschaften des Objekts sowie des umgebenden Mediums. Durch die starke Abhängigkeit dieser Kraft von der Frequenz des elektrischen Feldes, beschrieben durch den sogenannten Clausius-Mosotti-Faktor, lässt sich dieser Mechanismus sowohl zur reinen Anordnung als auch zu Sortier- und Analysezwecken nutzen. Konventionelle Dielektrophoreseverfahren basieren auf lokal strukturierten Elektroden auf einem transparenten Substrat, was jedoch mit einem großen Fertigungsaufwand verbunden ist.

### ANORDNUNG AUF NICHTLINEAREN KRISTALLEN

Wir nutzen dagegen zur Erzeugung der Elektroden Licht: Mit Hilfe der nichtlinearen Optik können beliebige, inhomogene Lichtmuster im Material eine elektrische Feldstruktur induzieren, die dann dielektrophoretisch wirken kann. Als aktive nichtlineare Materialien nutzen wir photorefraktive Kristalle. Da sich in diesen Materialien ein einmal induziertes Muster durch Lichtbestrahlung auch wieder löschen lässt, ermöglicht uns dieser Vorgang ein rein optisches Schalten dieser „virtuellen“ Elektroden. Die Dauer, die zur Veränderung des Elektrodenmusters in einem photoleitfähigen Material benötigt wird, kann, je nach Material und verfügbarer Laserleistung, von mehreren Minuten bis hin zu Bruchteilen einer Sekunde variieren und eröffnet so die gesamte Bandbreite an möglichen Fangszenarien,



Nahaufnahme eines vorstrukturierten photorefraktiven Kristalls für die Dielektrophorese | Close-up of a photorefractive crystal prestructured for dielectrophoresis

von permanenter Anordnung, die über mehrere Tage stabil bleibt bei Lithiumniobat, bis hin zu einer Manipulation in Echtzeit bei Bismut-Silizium-Oxid (BSO). Darüber hinaus können wir durch die elektro-optischen Eigenschaften der verwendeten Materialien die Brechungsindexänderung und damit das über den Pockels-Effekt verbundene interne elektrische Feld direkt in verschiedensten qualitativen (Zernike-Phasenkontrast und Differentialinterferenzkontrast) sowie quantitativen Phasenkontrastverfahren visualisieren und vermessen.

Durch ihre Kristallstruktur sind die verwendeten photorefraktiven Materialien chemisch inert und somit für die Anwendung mit fast allen Lösungsmitteln geeignet. Ihre hohe Oberflächenqualität ermöglicht das einfache Aufbringen von Mikrokanälen aus Polydimethylsiloxan (PDMS), die in gewissen Grenzen sogar selbsthaftend sind. Damit eignen sich die photorefraktiven Oberflächen sehr gut zur Integration in mikrofluidische Anwendungen.



# Particle Manipulation by Light

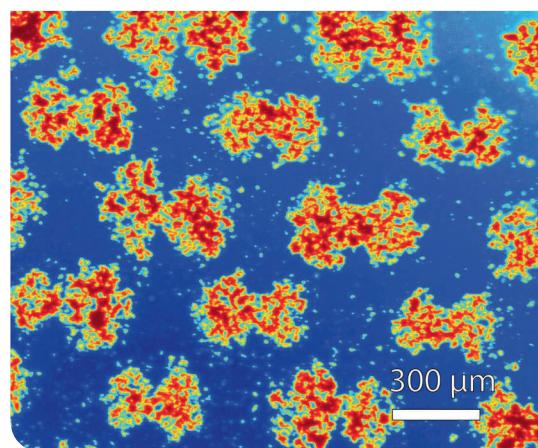
## LIGHT INDUCED DIELECTROPHORESIS

The control of matter on the microscale has attracted increasing attention with the advent of nanotechnology. The precise control of a few particles can be readily established with optical tweezers, however, their use cannot be scaled up to a very high number of particles due to the available laser power. As a connection between optical tweezers and mechanical methods for macroscopic applications, dielectrophoresis is able to control several thousands of objects on a large surface area.

Dielectrophoresis is an electronic effect that can be neglected in homogeneous or weakly inhomogeneous electric fields, but becomes dominant if the field is strongly modulated. In this case, the field acts upon locally induced dipoles in the object to be controlled. This results in a net force, either attracting or repulsing matter from regions of high field intensity, depending on the electric properties of the object and the surrounding medium. The magnitude and sign of this force, which is described by the Clausius-Mosotti factor, is highly dependent on the frequency of the applied field, and can thus be used not only for the mere arrangement of particles but also for sorting and analytic purposes. Conventional dielectrophoretic setups consist of fixed electrodes on a substrate, which, on the downside, require a laborious manufacturing process including lithography.

## ASSEMBLY ON NONLINEAR CRYSTALS

In contrast, we use light for the creation of the electrodes: Nonlinear optics can store a field structure inside a photorefractive material, which can then exert dielectrophoretic forces upon matter. Due to the fact that induced patterns can also be erased using homogeneous illumination, we established all-optical switching of these so-called virtual electrodes. The time constants necessary for a change of the electrode pattern in the photoconductive crystal can vary from several minutes to fractions of a second, depending on the material and the laser power available. This opens a variety of possible trapping scenarios, from a permanent arrangement on lithium niobate which is stable over several days, to real-time manipulation on the surface of bismuth silicon oxide (BSO). Additionally, the electrooptic properties of the materials allow the direct visualization and measurement of the refractive index change, and hence of the internal electric field which are directly connected via the Pockels effect. Furthermore, their crystalline structure make photorefractive materials chemically inert and thus suitable for the use with almost all solvents. The high quality of the surface facilitates the application of microchannels made from polydimethylsiloxane (PDMS), which is self-adhesive, provided the pressure inside the channel is not too strong. Therefore, photorefractive materials are well-suited for integration into microfluidic applications.



Dielektrrophoretisch gefangene Graphit-Partikel auf der Oberfläche eines Lithiumniobat-Kristalls | Dielectrophoretically trapped graphite on the surface of a lithium niobate crystal



**OLIVER KAMPS**

arbeitete im Rahmen seiner Diplomarbeit 2002/2003 an der Stabilitätsanalyse in einem photorefraktiven Rückkopplungssystem. Er promovierte 2010 am Institut für Theoretische Physik und ist seit 2009 Geschäftsführer des Center for Nonlinear Science der WWU Münster.



**JOCHEN SCHRÖDER**

beendete 2004 seine Diplomarbeit zu gegenläufigen Solitonen in photorefraktiven Medien. Danach promovierte er an der University of Auckland und arbeitet inzwischen als Wissenschaftler an der University of Sydney.

## Drei Fragen an Ehemalige

### Was ist Ihre besondere Erinnerung an das Studium in Münster?

› Besondere Erinnerungen und schöne Erlebnisse sind stark mit den Tagungsreisen verbunden, die ich während meiner Diplomarbeit und Promotion machen durfte. Auf diesen Reisen hatte ich nicht nur die Möglichkeit, Kontakte mit Menschen aus verschiedensten Teilen der Welt zu knüpfen, sondern konnte darüber hinaus Städte und Länder in aller Welt kennen lernen.

### Was war die besondere Herausforderung oder das Highlight Ihrer Arbeit?

› Während meiner Diplomarbeit funktionierte über einen sehr langen Zeitraum der Laser, den ich für meine Experimente zur Strukturbildung brauchte, nicht so, wie er sollte. Niemand wusste, was die Ursache war. Die

besondere Herausforderung war nun, dieses Problem zu lösen, um das gestellte Thema überhaupt bearbeiten zu können. Das Bestehen dieser Herausforderung war für mich das Highlight der Diplomarbeit.

### Wie sind Sie zu Ihrem jetzigen Beruf gekommen? Wie ist dies mit den Themen und Arbeitsweisen der AG verbunden?

› Meine jetzige Tätigkeit als Geschäftsführer des Center for Nonlinear Science habe ich schon während meiner Promotion begonnen. Die wichtigste Erfahrung, die ich für diese Tätigkeit aus der Diplomarbeit mitgenommen habe, ist, dass man sich bei schwierigen Problemen ganz gut auf seinen Hinterkopf verlassen kann. Man muss ihm nur ein wenig Zeit geben und ihn nicht mit zu vielen bewussten Gedanken belasten.

### Was ist Ihre besondere Erinnerung an das Studium in Münster?

› Mein Studium in Münster und meine Arbeit in der Gruppe Denz waren eine tolle Zeit, die ich nicht missen möchte. Ich habe lebenslange Freunde gefunden und meine Freude an der nichtlinearen Physik und Optik entdeckt, die mich seitdem nicht losgelassen hat. Ich hatte die einzigartige Möglichkeit, als Teil meiner Diplomarbeit zweimal Australien zu besuchen.

### Was war die besondere Herausforderung oder das Highlight Ihrer Arbeit?

› Meine Arbeit war zum Thema gegenläufige photorefraktive optische Solitonen. Es gab wie in jeder Arbeit Höhen und Tiefen. Die größte Herausforderung war aber wie bei so vielen das Schreiben! Trotzdem hat es Spaß gemacht. Eines der Highlights war eine E-Mail

von O. Cohen (Autor des ersten Artikels zu gegenläufigen Solitonen) mit einem Kommentar zu meinem Artikel und der Gedanke: „Es gibt wirklich Menschen, die interessiert sind an dem, was ich gemacht habe!“

### Wie sind Sie zu Ihrem jetzigen Beruf gekommen? Wie ist dies mit den Themen und Arbeitsweisen der AG verbunden?

› Meine Besuche in Australien während meiner Arbeit in der Gruppe Denz haben meine Begeisterung für die Südhalbkugel verstärkt. Ich bin in Down Under hängen geblieben. Nach meiner Promotion an der University of Auckland in Neuseeland arbeite ich mittlerweile beim Centre for Ultrahigh Bandwidth Devices for Optical Systems in Sydney als Postdoc. Ich bin der nichtlinearen Optik treu geblieben, und arbeite jetzt im Bereich ultraschnelle optische Kommunikation.



## PHOTONISCHE STRUKTUREN

Die alte Erkenntnis „das Ganze ist mehr als die Summe seiner Teile“ gilt insbesondere in vielen photonischen Systemen. Wir entwickeln strukturierte photonische Materialien, die eine solche Emergenz nutzen, um die Propagation von Licht zu beeinflussen, zu führen und zu kontrollieren.

## PHOTONIC STRUCTURES

*The old insight that “the whole is greater than the sum of its parts” is particularly true for many photonic systems. We develop structured photonic materials that utilize such an emergence to control, guide, and engineer the propagation of light.*

# PHOTONISCHE STRUKTUREN

LICHT STEUERT LICHT

## Langsames Licht

### OPTISCHE VERZÖGERUNGSSTRECKEN

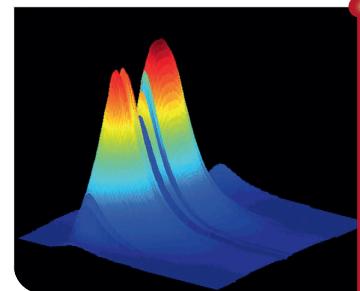
Die signifikante Reduktion der Gruppengeschwindigkeit von Lichtpulsen war ein Meilenstein in der Photonik.

Ursprünglich wurde langsames Licht in einem Bose-Einstein-Kondensat durch Quanteninterferenz demonstriert. Die Gruppengeschwindigkeit von Pulsen konnte in diesem Experiment auf 17 m/s reduziert werden. Die aktuelle Forschung in den letzten Jahren zielt darauf ab, kompakte und robuste Komponenten zu erstellen, die bei Raumtemperatur einsetzbar sind und die benötigte Bandbreite für optische Datenübertragung bereitstellen. Optische Verzögerungsstrecken könnten vor allem im Bereich von phasengesteuertem Radar und in der optischen Nachrichtentechnik Verwendung finden.

< Eine Klasse von optischen Verzögerungsstrecken stellen optische Filter dar, an deren Bandkanten Änderungen der Gruppengeschwindigkeit auftreten, die zur Dispersionsmodifikation genutzt werden können. Meist werden photonische Strukturen betrachtet, die durch Vielfachreflexionen das optische Signal effektiv einfangen und damit Lichtpulse nicht nur verlangsamen, sondern in bestimmten Fällen stoppen können. Das Verhalten ist somit sehr ähnlich zu einem Resonator. Große Verzögerungen können erreicht werden, wenn die optische Weglänge maximiert wird, die ein Signal bei der Propagation zurücklegt. Im nichtresonanten Fall ist diese Länge nicht wesentlich größer als die Wechselwirkungslänge selbst. Im resonanten Fall hingegen kann die Verzögerung mehrere Ordnungen größer sein als die Länge der resonanten Struktur. Kommerziell erhältliche Frequenzfilter sind jedoch bisher nicht geeignet, da im gewünschten spektralen Bereich eine hohe Absorption auftritt, die zu starken Verlusten führt. Ein weiterer Nachteil ist die limitierte Durchstimmbarkeit dieser Elemente, da diese nur sehr langsam durch Temperatur- oder Druckänderung die Zentralwellenlänge verschieben können.

### DURCHSTIMMBARE DEFEKTSSTRUKTUREN

Wir entwickeln in unserer Arbeitsgruppe durchstimmbare Bandlückenstrukturen in elektrooptischen Materialien, die hochkomplexe Übertragungsfunktionen in der Phase zulassen und gleichzeitig eine schnelle und präzise Anpassung der Parameter ermöglichen. Der Einsatzbereich im optischen Telekommunikations-



Zeitaufgelöste Puls-propagation in einer Bandlückenstruktur mit Phasendefekt | Time-resolved pulse propagation in a photonic bandgap with a phase defect

frequenzspektrum bei 1550 nm und gute Dämpfungs-eigenschaften sind Voraussetzungen für die erfolg-reiche Anwendung. Wir konnten kürzlich zeigen, dass definierte spektrale Transferfunktionen in eindimensio-nalen Indexstrukturen aus vielen einzelnen Substruktu-ren zusammengesetzt werden können, die Phasende-fekte, Supermodulationen und „gechirpte“ Bereiche enthalten. So war es erstmals möglich, die Gruppen-geschwindigkeiten für viele einzelne Wellenlängen-kanäle zu schalten und durchzustimmen. Ein weiteres vielversprechendes Konzept macht sich spezielle photorefraktive Materialien zu Nutze, in denen Energiekopplung zwischen Pulsen und kontinuierlicher Laserstrahlung auftritt. Diese Technik hat den entscheidenden Vorteil, dass die zeitliche Phasenmo-dulation durch einen Verstärkungsprozess erzeugt wird und somit die Verluste wesentlich geringer ausfallen als bei passiven Strukturen. In unseren aktuellen Experimenten konnten wir eine signifikante Reduktion der Gruppengeschwindigkeit auf weniger als 1 cm/s demonstrieren. Gleichzeitig lassen sich durch Verwen-dung mehrerer Pumpwellenlängen auch anomale Dispersionszustände herstellen. Dieses Phänomen wird gewöhnlich als schnelles Licht bezeichnet.



# Slow Light

## OPTICAL DELAY LINES

*Significant reduction of the group velocity of light was a milestone in photonics in the last decade and has spurred research in various physical systems where this particular effect can be observed. Although the original experiment demonstrated impressive slow-down characteristics, its main drawback was the realization in a Bose-Einstein-condensate using quantum optical interference with high experimental complexity.*

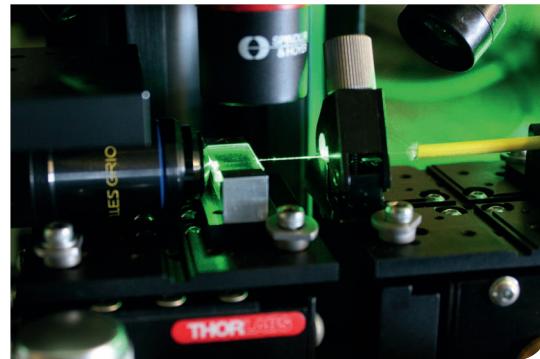
Today, the main focus of slow-light research is operation at room temperature in small scale devices that are tunable and support wideband operation for short pulses. The main application for slow light includes interference-free, optical true-time delays for phased array radar or optical buffering in routing devices without the need for electro-optical conversion. Even though the number of pulses that can be buffered for recent data rates is still too small for industrial employment, slow-light schemes may already be useful for resynchronization and clock recovery in optical networks.

One of the most promising devices for real world application are optical filters, due to the small footprint and mature fabrication technology. Most of the time, optical filters are constructed from periodic variations of the refractive index as in optical fibers for wavelength demultiplexing, but single bandwidth rejection filters are unsuitable for this task, due to the

high absorption that comes with the desired dispersion at the bandedges. However, appropriate complex grating structures can be designed to minimize the loss and maximize the delay in transmission.

## TUNABLE DEFECT STRUCTURES

Some of the structures under active development in the slow-light subgroup are periodic structures with one or multiple phase modifications, chirped gratings in combination with discrete phase defects and superstructures. Using reversible, photosensitive media, the bandgap properties are controllable by optical or electro-optical means to enable group-velocity control with high precision. These devices are compatible to state-of-the-art fiber transmission systems in terms of propagation loss and frequency spacing. Current activities also focus on integration of slow light devices with femtosecond wafer inscription. A different approach is to use an energy coupling effect that occurs in a special kind of photorefractive crystal. In this case the energy transfer from a passing pulsed signal to a continuous wave allows increase of the group index to a large extent. Group velocities down to less than a centimeter per second have been demonstrated in our labs. Interestingly, increases in the transit time can be achieved by dual-frequency pumping as well. Anomalous dispersion leads to group velocities larger than the speed of light. This phenomenon is often termed as fast light.



Fasereinkopplung von sichtbarer Laserstrahlung in einen optischen Chip mit integrierter Bandlückenstruktur | Butt-coupling of visible laser radiation into an optical chip with integrated bandgap structures

## Nichtbeugende Lichtfelder

### STRUKTURVIELFALT UND HOMOGENITÄT IN EINEM

Eine faszinierende Klasse photonischer Gitter stellen

zweidimensionale Brechungsindexgitter dar: Ihre Querschnittsflächen zeigen an beliebigen Stellen stets identische Strukturen – ähnlich einem Kabel. Entsprechend fungieren gerade jene zweidimensionalen Indexstrukturen als funktionale

Lichtleiter, die zukünftig nicht nur spezifische optische Bandlücken aufweisen können, sondern etwa auch den optischen Drehimpuls eines Lichtstrahls selektiv beeinflussen.

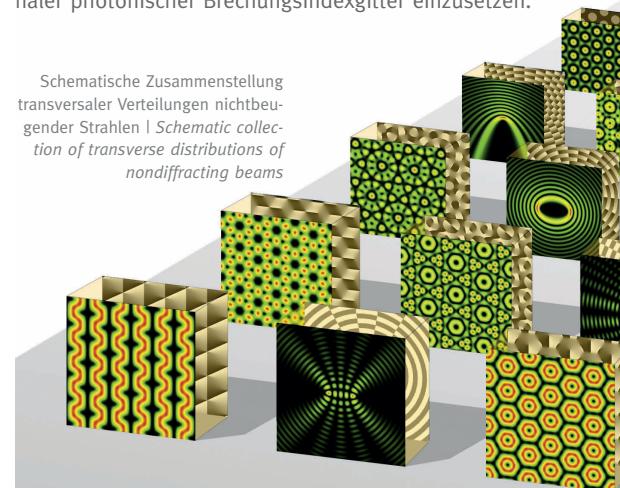
Die Herstellung höchstkomplexer zweidimensionaler photonischer Gitter bringt die Vision der funktionalen Lichtleiter ein großes Stück näher. Jedoch sind für deren optische Induktion entsprechend kompliziertere Gitterstrahlen nötig, die eben für unterschiedliche Ausbreitungsstrecken immer gleiche transversale Muster aufweisen. Um diese Anforderung zu erfüllen, nutzen wir die Familie der nichtbeugenden Strahlen. Grundsätzlich unterliegt Licht der Beugung – besonders schmale Lichtstrahlen erfahren während der Propagation eine merkliche Strahlverbreiterung. Nichtbeugende Strahlen jedoch umgehen scheinbar diesen Beugungseinfluss: Durch geschickte Überlagerung mehrerer kohärenter, monochromatischer Lichtfelder – ihre Wellenvektoren müssen auf einer Kegeloberfläche liegen – lassen sich transversal intensitätsmodulierte Lichtfelder erzeugen, die in Ausbreitungsrichtung über mehrere Zentimeter translationsinvariant sind. Insbesondere einfarbiges Laserlicht ist hervorragend geeignet, um nichtbeugende Strahlen mit einer nahezu unerschöpflichen Vielfalt an Strukturen auch im Experiment hervorzubringen.

### VON DER SIMULATION ZUR EXPERIMENTELLEN REALISIERUNG

Schon im Jahre 1987 wurden solche Lichtfelder in der konkreten Umsetzung eines kreissymmetrischen Besselstrahls realisiert und bevorzugt mit Hilfe einer Axikon-Linse erzeugt. Heutzutage greift man bei der experimentellen Realisierung hauptsächlich auf die effektivere Technik der Holographie zurück: Computer gesteuerte Lichtmodulatoren ermöglichen nach

Vorgabe einer numerisch berechneten Feldverteilung eine dynamische Phasen- und Amplitudenmanipulation. Wir nutzen diesen Ansatz, um die gesamte Palette der nichtbeugenden Strahlen in einem einzigen Aufbau zu realisieren. In unseren Simulationen gehen wir insbesondere auf Feldverteilungen mit periodischen (z.B. Graphen-ähnliche und Kagome-Gitter) und quasiperiodischen Strukturen (z.B. Penrose-Struktur) ein und fügen der jeweiligen Feldverteilung wahlweise einen zusätzlichen optischen Drehimpuls hinzu, was einen bisher nicht berücksichtigten Freiheitsgrad hinsichtlich der Strukturvielfalt darstellt. Neben (quasi-)periodischen nichtbeugenden Strahlen lassen sich jedoch auch Strukturen mit krummlinigen Symmetrien wie Bessel-, Mathieu- oder Weberstrahlen sehr effizient erzeugen. Weitere Untersuchungen zeigen eindrucksvoll, dass wir alle denkbaren nichtbeugenden Lichtfelder bei sehr kleiner transversaler Strukturgröße stabil erzeugen können, um diese erstmals hocheffektiv für die optische Induktion komplexer zweidimensionaler photonischer Brechungsindexgitter einzusetzen.

Schematische Zusammenstellung transversaler Verteilungen nichtbeugender Strahlen | Schematic collection of transverse distributions of nondiffracting beams

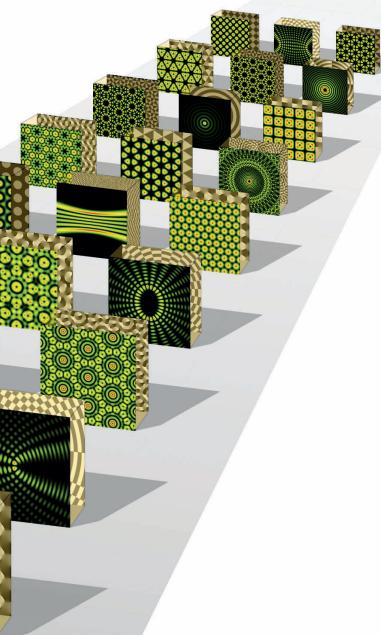




# Nondiffracting Wave Fields

## HOMOGENEITY MEETS STRUCTURAL VARIETY

*A fascinating case of photonic lattices are the two-dimensional refractive index gratings: Their slices along one direction look exactly the same – similar to a cable. Consequently, these two-dimensional index structures are dedicated to act as functional light guides which in future not only offer outstanding optical band gaps but also influence selectively the optical angular momentum of guided light.*

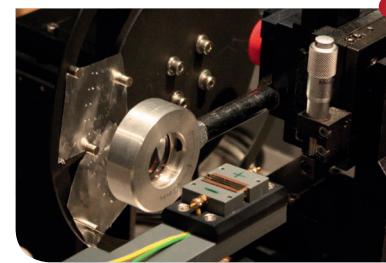


*The generation and analysis of much more complex two-dimensional lattices bears a major step for the realization of this vision. Thus, accordingly complicated lattice beams are needed, exhibiting the quality of a translation invariant structuring in one direction. This concept holds especially for the family of nondiffracting beams and they are therefore dedicated to be utilized for the optical induction method.*

*In general, light suffers diffraction. Especially light fields of small diameter experience a capacious transverse broadening while propagating. However, nondiffracting beams seemingly circumvent the effect of diffraction: Due to an elaborate superposition of several coherent and monochromatic light fields – all their contributory wave vectors have to be unified on a cone surface – fields of a transversely modulated intensity are formed, being additionally propagation invariant over a range of several centimeters. That is, laser light is explicitly qualified to be used to establish nondiffracting beams featuring an almost endless variety of transverse patterns.*

### SIMULATION AND EXPERIMENTAL IMPLEMENTATION

*Already in 1987, such light fields were realized in the concrete implementation of a circular symmetric Bessel beam via utilization of an axicon lens. Today, the effective technique of holography is implemented prevalently to shape the desired light fields. In this context, the application of computer-controlled light modulators brings light to almost any arrangement*



Komponenten zur optischen Induktion mittels nichtbeugender Strahlen | Elements of an optical induction setup using nondiffracting beams

*of phase and amplitude, according to numerically pre-calculated field distributions. Thus the entire multitude of nondiffracting beams is feasible in one setup. Our computational simulations focus on periodic (e.g. Graphene-like as well as kagome patterns) and quasiperiodic patterns (e.g. Penrose structures). By additionally impressing an optical angular momentum to the field distribution, we are able to handle a further degree of freedom regarding the transverse structural variety of the desired light fields. Furthermore, besides (quasi-)periodic nondiffracting beams, we are versed to efficiently implement nondiffracting light fields in curvilinear symmetries such as Bessel, Mathieu, and Weber beams. Further analysis of the generated light fields substantiates a robust implementation of all possible nondiffracting light fields of small structural size accompanied by a propagation distance of several centimeters, which empowers us to optically implement complex two-dimensional photonic refractive index gratings in a highly effective manner.*

## Optisch induzierte photonische Gitter

### BEDEUTENDES BINDEGLIED ZWISCHEN VERSCHIEDENEN LICHTFELDERN

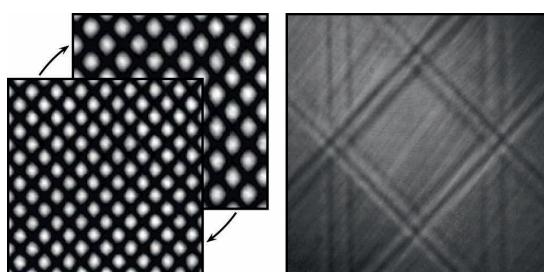
Die Einführung einer äußeren Strukturierung in ein bekanntes System kann zu neuen und bisher unbekannten Eigenschaften führen, die neuartigen Anwendungen erst den Weg ebnen. Im Rahmen der Photonikforschung liegen der Untersuchung von künstlichen dielektrischen Strukturen zur Manipulation, Übertragung und Speicherung von Licht insbesondere die wachsenden Anforderungen an die Bandbreite digitaler Informationsübertragung und -verarbeitung zugrunde.

< Materialien, deren Eigenschaften sich durch Licht so verändern, dass das Licht selbst wieder auf die veränderte Materialumgebung reagiert, liefern das gesuchte Bindeglied, um Licht durch Licht kontrollieren und leiten zu können. Photorefraktive Kristalle wie Strontiumbariumniobat (SBN) sind vielversprechende Beispiele in diesem Bereich. Die Beleuchtung eines solchen Materials mit strukturierten Lichtfeldern geringer Leistung erzeugt bereits optisch induzierte Brechungsindexmuster mit faszinierenden Eigenschaften für die Lichtpropagation in diesen Strukturen. Darüber hinaus nutzt dieser Ansatz die elektro-optischen Eigenschaften von SBN und ermöglicht so hochgradig adaptive und rekonfigurierbare photonische Bauelemente. Durch den ersten Nachweis von selbst stabilisierenden zweidimensionalen nichtlinearen photonischen Gittern haben wir maßgeblich zu den Grundlagen dieses Forschungsfeldes beigetragen. Während im Folgenden in diesem Gebiet vor allem vergleichsweise einfache Gittergeometrien studiert wurden, führten unsere Untersuchungen zu der sich aus der anisotropen Natur

des zugrunde liegenden photorefraktiven Systems ergebenden Komplexität zur Entdeckung der anisotropen photonischen Gitter. Unlängst haben wir damit begonnen, das Wissen über photorefraktive Materialien mit unserer Expertise bei der Formung komplexer Lichtstrahlen zu kombinieren, um neuartige optisch induzierte photonische Gitter zu ermöglichen. Neben den bekannten diskreten photonischen Strukturen haben wir Methoden entwickelt, um sowohl zweidimensionale Bessel-, Mathieu- und Weber-Gitter als auch andere komplexe periodische und quasiperiodische Muster zu fabrizieren.

### KOMPLEXE DREIDIMENSIONALE PHOTONISCHE STRUKTUREN

Obgleich diese zweidimensionalen Strukturen so gestaltet sind, dass sie sich entlang einer ausgewählten Richtung nicht ändern, erlaubte eine raffinierte Erweiterung unseres Ansatzes jüngst die erste Demonstration von Gitterwellen, die die Induktion von dreidimensionalen Gittern ebenso möglich machen. Darüber hinaus ist es uns gelungen, bekannte Techniken aus unserer Forschung zur holographischen Datenspeicherung auf dieses Gebiet zu übertragen, um Gitter mit unterschiedlichen Charakteristika überlagern und so superperiodische Strukturen generieren zu können. Mit all dieser Flexibilität ermöglichen unsere Entwicklungen die optische Erzeugung einer unvergleichlichen Vielfalt von zwei- und dreidimensionalen photonischen Strukturen und stellen damit einen zukunftsweisenden Beitrag zu unserer Vision der Kontrolle von Licht durch Licht dar.



Multiplexen (links) und Brillouin-Zonen-Spektroskopie (rechts) eines 2D multiperiodischen Gitters | Multiplexing (left) and Brillouin zone spectroscopy (right) of a 2D multiperiodic lattice



## Optically Induced Photonic Lattices

### THE NECESSARY LINK BETWEEN DIFFERENT LIGHT FIELDS

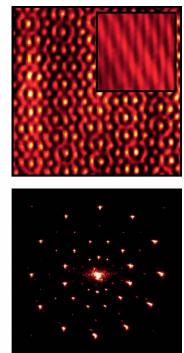
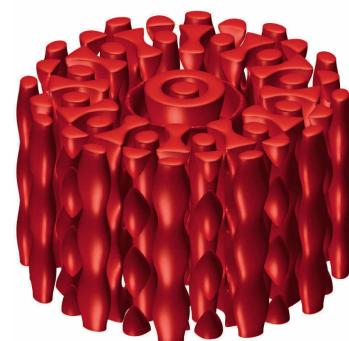
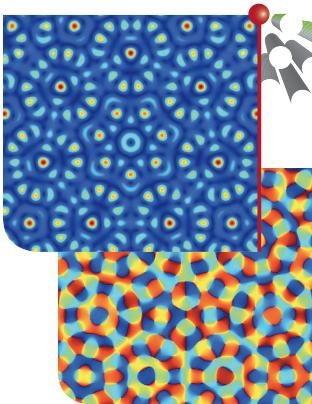
*The introduction of an external structuring into a known system can lead to new and unknown properties which may pave the way for novel applications.*

*In the frame of photonic research, the investigation of artificial dielectric structures in order to engineer, guide, or store light is based in particular on the increasing requirements for digital information transmission and processing bandwidth.*

Materials that change their properties due to light whereupon light itself reacts on the changed material environment provide the missing link to control and guide light by light itself. Photorefractive crystals like strontium barium niobate (SBN) are promising examples in this field. The illumination of such a material with structured light waves yields already optically induced refractive index lattices with fascinating properties regarding the propagation of light in these structures. In addition, this specific approach takes advantage of SBN's electro-optic characteristics and thereby facilitates highly adaptive and reconfigurable photonic devices.

By demonstrating the first self-trapped two-dimensional nonlinear photonic lattices, we significantly contributed to the foundation of this research field. While in the following mainly rather simple lattice geometries were studied, our investigation of the complexity arising from the anisotropic nature of the underlying photorefractive system led to the discovery of anisotropic photonic lattices. Recently, we started to combine the knowledge about photorefractive materials with our expertise in the field of complex beam shaping in order to achieve completely new types of optically induced photonic lattices. Besides well-known discrete periodic structures, we developed methods to prepare two-dimensional Bessel, Mathieu, and Weber lattices as well as complex periodic and quasiperiodic patterns.

Amplituden- und Phasenverteilung eines siebenzähligen Quasigitters |  
Amplitude and phase distribution of a seven-fold quasilattice



Numerische Intensitätsverteilung zur Erzeugung optisch induzierter 3D Quasikristalle mit 12-facher Symmetrie (links), Wellenleitung durch die experimentell realisierte Struktur (rechts oben) und Beugungsmuster der Struktur (rechts unten) | Numerical intensity distribution for optically induced 3D quasicrystals with 12-fold symmetry (left), wave guiding through the experimentally realized structure (top right), and far field diffraction pattern of the structure (bottom right)

### COMPLEX THREE-DIMENSIONAL PHOTONIC STRUCTURES

Although these two-dimensional structures are designed to be invariant in one distinct direction, a nifty modification to our approach recently allowed us to demonstrate the first lattice waves that facilitate the optical induction of three-dimensional lattices as well. Moreover, we were able to apply techniques familiar from our holographic data storage research to this field in order to multiplex lattices with different features thus facilitating even superperiodic structures. With all this flexibility, our development allows for the optical preparation of an unequalled versatility of two- or three-dimensional photonic structures providing forward-looking contributions to our vision of controlling light by light.

# PHOTONISCHE STRUKTUREN

LICHT STEUERT LICHT

## Diskrete Optik

### LICHTPROPAGATION IN PERIODISCHEN STRUKTUREN

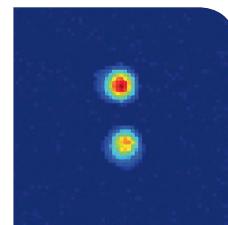
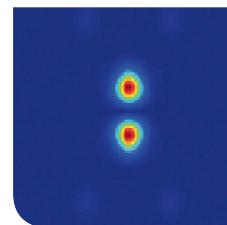
Die Photonikforschung bietet die Vision, die unausweichlichen Bandbreitenbeschränkungen in der Elektronik zu überwinden, indem wir die Elektronen durch Photonen ersetzen und so zu einer vollständig optischen Rechner- und Informationsverarbeitungsarchitektur gelangen. Denkt man über diesen naheliegenden Wechsel nach, so stellt sich unmittelbar die Frage, was die photonischen Gegenstücke zu den elektronischen Halbleitern sein könnten. Eine Lösung dieses Problems wird durch periodische photonische Strukturen bereitgestellt.

< Das Hinzufügen eines periodischen Potentials führt – analog zu Halbleitern – zu drastisch veränderten Beugungseigenschaften in periodischen photonischen Materialien. Insbesondere das Bloch-Theorem als eines der fundamentalen Prinzipien in diesem Bereich sagt aus, dass die lineare Propagation in diesen Materialien nur für Moden mit bestimmten Wellenvektoren innerhalb der sogenannten Bloch-Bänder möglich ist, während sie für solche mit Wellenvektoren innerhalb der auftretenden Bandlücken verboten ist.

### DISKRETE SOLITONEN UND IHRE WECHSELWIRKUNG

Bevor jedoch die endgültige Vision eines vollständig optischen Rechners mit diesen Materialien realisiert werden kann, ist es entscheidend, die Grundlagen der linearen und nichtlinearen Lichtpropagation in diesen faszinierenden photonischen Strukturen zu untersuchen. Unter Verwendung unserer Technik zur optischen Induktion waren wir in der Lage, in mehreren nichtlinearen Gittern die Existenz von sogenannten diskreten Solitonen zu zeigen. Diese Solitonen sind robuste, lokalisierte photonische Einheiten, die mit kompensierter linearer Beugung propagieren. Diese stabile Propagation basiert auf einer nichtlinearen Verschiebung der entsprechenden Propagationskonstanten in eine Bandlücke des zugrundeliegenden photonischen Gitters.

Im Hinblick auf die Wechselwirkung zwischen diskreten Solitonen mit unterschiedlicher Phase entwickelten wir das fundamentale Verständnis sowie den ersten experimentellen Nachweis für die Existenz und die



Numerische Simulation (links) und experimentelle Umsetzung (rechts) eines stabilen Dipolsolitons in einem Dreiecksgitter | Numerical simulation (left) and experimental realization (right) of a stable dipole-mode gap soliton in a triangular lattice

Stabilität von diskreten Vortex-Solitonen und lokalisierter Multi-Vortex-Strukturen, also komplexen Soliton-Anordnungen mit enthaltenen Phasensingularitäten. Da die Kombination aus Periodizität und Nichtlinearität in unserem System eine dynamische Abstimmbarkeit der Strukturparameter erlaubt, haben wir einzigartige Möglichkeiten, die lineare und nichtlineare Lichtpropagation zu kontrollieren.

### OPTISCHE ANALOGIEN ZU QUANTENMECHANISCHEM EFFEKTE

Aufgrund der formalen Ähnlichkeiten zu quantenmechanischen Systemen können unsere diskreten photonischen Strukturen darüber hinaus auch als vielseitige Plattform für die Demonstration von optischen Analogien zu quantenmechanischen Effekten dienen. In diesem Zusammenhang haben wir beispielsweise die erste experimentelle Umsetzung von Rabi-Oszillationen und Laundau-Zener-Tunneln in optisch induzierten hexagonalen Gittern gezeigt.



# Discrete Optics

## LIGHT PROPAGATION IN PERIODIC STRUCTURES

*Photonic research provides the vision to overcome the unavoidable bandwidth constraints of electronics by replacing the electrons with photons leading to an all-optical computing and information processing architecture. When thinking about this reasonable transition, immediately the question arises what the photonic counterparts to electronic semiconductors might be. A solution to this problem is given by periodic photonic structures.*

← The introduction of a periodic potential leads – in analogy to semiconductors – to dramatically modified diffraction properties in periodic photonic materials. In particular, Bloch's theorem as one of the basic principles in this field states that linear propagation inside these materials is only possible for modes with certain wave vectors inside so-called Bloch bands while it is forbidden for those having wave vectors inside the emerging band gaps.

## DISCRETE SOLITONS AND THEIR INTERACTION

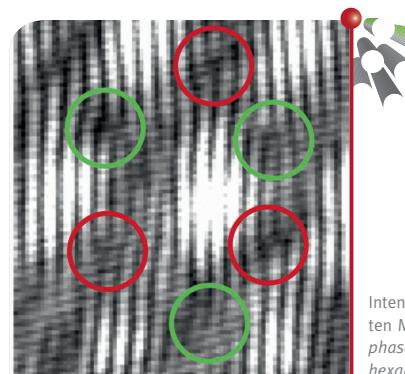
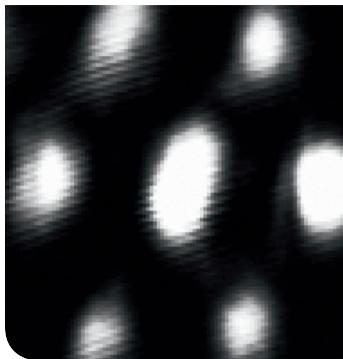
However, before the final vision of all-optical computing can be achieved using these materials, it is crucially important to study the fundamentals of linear and nonlinear light propagation in these fascinating photonic structures. Using our optical induction technique, we were able to reveal the existence of so-called discrete solitons in several different nonlinear lattices. Such solitons are robust localized

photonic entities propagating with compensated linear diffraction. This stable propagation is due to a nonlinear shift of the corresponding propagation constant inside a band gap of the underlying photonic lattice.

Considering the interaction between discrete solitons with different phase, we developed the fundamental understanding as well as the first experimental verification for the existence and stability of discrete vortex solitons and localized multivortex states being complex soliton clusters carrying distinct phase singularities. Since the combination of periodicity and nonlinearity in our system allows for a dynamic tunability of structural parameters, we have the unique opportunity to achieve control over linear as well as nonlinear light propagation.

## OPTICAL ANALOGS TO QUANTUM MECHANICAL EFFECTS

Moreover, due to formal similarities to quantum mechanical systems, our discrete photonic structures also can serve as a versatile platform for the demonstration of optical analogs to quantum mechanical effects. In this scope, we demonstrated for example the first experimental realization of Rabi oscillations and Landau-Zener tunneling in optically induced hexagonal lattices.



Intensitätsverteilung (links) und Phasenanalyse (rechts) eines experimentell realisierten diskreten Multivortex-Solitons in einem gestreckten Hexagongitter | Intensity distribution (left) and phase analysis (right) of an experimentally realized discrete multi-vortex soliton in a stretched hexagonal lattice

## Frequenzkonversion in nichtlinearen Strukturen

### ORDNUNG DURCH UNORDNUNG

„Unordnung ist die neue Art der Ordnung“, wenn man sich anschaut, was für eine breitbandige nichtlineare Frequenzkonversion von Laserpulsen benötigt wird. Die Voraussetzung für eine effiziente Frequenzverdopplung ist, dass die Phasen von fundamentaler und frequenzverdoppelter Welle angepasst sind. Diese Phasenanpassung kann z.B. durch Ausnutzen der Doppelbrechung erzielt werden.

Mehr Flexibilität erreicht man aber durch eine periodische Strukturierung der  $\chi^{(2)}$ -Nichtlinearität, welche sich durch ein periodisches Umpolen von Domänen in ferroelektrischen Kristallen realisieren lässt.

< Eine zweidimensionale Strukturierung der  $\chi^{(2)}$ -Nichtlinearität – eine sogenannte zweidimensionale nichtlineare photonische Struktur – stellt eine Erweiterung des Konzeptes der sogenannten Quasi-Phasenanpassung dar, die neue Phasenanpassungsbedingungen bietet. Im Vergleich zu photonischen Kristallen besitzen diese nichtlinearen Strukturen einen homogenen Brechungsindex, aber eine modulierte Nichtlinearität.

Periodische nichtlineare Strukturen eignen sich allerdings nur zur effektiven Frequenzkonversion von diskreten Wellenlängen. Da aber z.B. ultrakurze Laserpulse eine große spektrale Bandbreite besitzen, benötigt man hier nichtlineare photonische Strukturen mit einer höheren Bandbreite. Hierzu kann man beispielsweise Quasi-Gitter nutzen. Eine besonders einfache Art der Strukturierung ist die zufällige Anordnung der Nichtlinearität. Zufällig sind Domänen bereits angeordnet, wenn die ferroelektrischen Kristalle nicht gepolt sind.

### ELEKTRISCHES POLEN KONTROLLIERT UNGEORDNETE NICHTLINEARITÄT

Unsere Arbeiten zur effektiven, durchstimmbaren Frequenzkonversion ultrakurzer Lichtpulse nutzen diese Situation geschickt aus: Wir untersuchen die Frequenzkonversion ultrakurzer Laserpulse in Strontiumbariumniobat (SBN), wobei die Ordnung der Nichtlinearität gezielt beeinflusst wird.

Planare Frequenzverdopplung in ungepoltem SBN |  
Planar second harmonic generation in unpoled SBN



Summenfrequenz-  
erzeugung in  
ungepoltem SBN  
in der konischen  
Geometrie | *Conical sum-frequency  
generation in  
unpoled SBN*

Dadurch ist es uns gelungen, in nicht gepoltem SBN alle Arten parametrischer Drei-Wellen-Mischprozesse zu demonstrieren. Da die Nichtlinearität in zwei Dimensionen moduliert ist, ist die Phasenanpassung im Allgemeinen nicht kollinear, so dass die höheren Harmonischen räumlich verteilt sind. Das in der Frequenz konvertierte Licht wird entweder in einer Ebene oder auf einem Kegel abgestrahlt. Bei der konischen Emission wirkt die nichtlineare photonische Struktur wie ein Superprisma, so dass sich auch das Spektrum der fundamentalen Welle hierüber messen lässt. Zur gezielten Änderung der Ordnung der Nichtlinearität nutzen wir elektrisches Polen, um die Domänenstruktur räumlich zu modulieren. Der Grad der Ordnung der Nichtlinearität spiegelt sich dann direkt in der räumlichen Verteilung des abgestrahlten frequenzverdoppelten Lichtes wieder. Diese Art der nichtlinearen Spektroskopie erlaubt es daher, jede Art von Unordnung in nichtlinearen photonischen Strukturen aufzudecken. Auf der anderen Seite können wir die Ordnung der Nichtlinearität so manipulieren, dass eine breitbandige effektive Frequenzkonversion realisiert wird.



## Frequency Conversion in Disordered Structures

### GAINING ORDER VIA DISORDER

*“Disorder is the new order”, if we look what we need for easy but efficient broadband nonlinear frequency conversion of laser pulses. For efficient frequency doubling the fundamental and frequency-doubled waves have to fulfill the phase-matching condition. Phase matching can be realized for instance by using the birefringence of the crystal. A more flexible approach is the periodic structuring of the  $\chi^{(2)}$ -nonlinearity, which can be realized in ferroelectric crystals by periodic poling of the domains.*

A two-dimensional structure of the  $\chi^{(2)}$ -nonlinearity – a so-called two-dimensional nonlinear photonic structure – represents an extension of the concept of quasi-phase matching leading to new phase-matching conditions. In comparison with photonic crystals these nonlinear structures possess a homogeneous refractive index but a modulated nonlinearity.

Due to their discrete nature, periodic nonlinear photonic structures can only be used for an effective frequency conversion of discrete wavelengths. However, for frequency conversion of ultrashort laser pulses with a large spectral bandwidth nonlinear photonic structures with a broad bandwidth are desired. For this purpose the period of the alternating nonlinearity can be linearly increased or one can use so called quasi-gratings. A rather simple kind of structure is a random orientation of the nonlinearity. Domains are already randomly oriented when the ferroelectric crystal is unpoled.

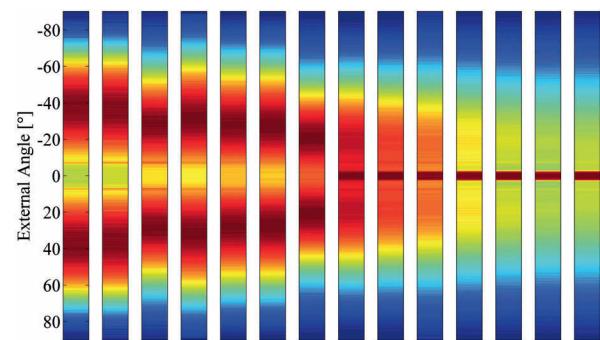
### DISORDERED NONLINEARITY IS CONTROLLED BY ELECTRICAL POLING

We take advantage of this situation for our work on an effective and tunable frequency conversion of ultrashort laser pulses: we examine frequency conversion of ultrashort laser pulses in strontium barium niobate (SBN), where the order of the nonlinearity is specifically molded.

Verteilung der Intensität der Frequenzverdopplung während des Polungsprozesses eines SBN Kristalls | Second harmonic generation intensity distribution during the poling of an initially unpoled SBN crystal

We have demonstrated all kinds of parametric three-wave mixing processes: second harmonic generation, sum-frequency generation, and difference-frequency generation. As the nonlinearity is modulated in two dimensions, the phase-matching process is non-collinear which leads to a spatial distribution of the higher harmonics. The frequency converted light is emitted either in a plane or on a cone. In the case of conical emission the nonlinear photonic structure acts like a super prism, which can be used for measuring the spectrum of the fundamental wave.

We can specifically influence the order of the nonlinearity by electrical poling. The degree of order of the nonlinearity is directly visible in the spatial distribution of the emitted frequency-doubled light. This kind of nonlinear spectroscopy can be used to reveal any kind of disorder in a nonlinear photonic structure. On the other hand, we can manipulate the order of the nonlinearity for an efficient broadband frequency conversion.





### BERND TERHALLE

erhielt für seine Diplomarbeit zu anisotropen photonischen Gittern und diskreten Solitonen 2007 den Infineon Diplompreis des Fachbereichs Physik. Seine Dissertation "Controlling light in optically induced photonic lattices" beendete er mit Auszeichnung, sie wurde 2010 mit dem Springer Preis gewürdigt.



### NICOLETTA BRAUCKMANN

beendete ihre Diplomarbeit 2007 mit der Demonstration der Kontrolle eines nichtlinearen optischen, strukturbildenden Systems. Sie promoviert derzeit in der Arbeitsgruppe Fallnich im Institut.

## Drei Fragen an Ehemalige

### Was ist Ihre besondere Erinnerung an das Studium und die Promotion in Münster?

› Fahrräder, Aasee, Schloss, Mensa, Hochschulsport, Kaffee in Büro 26, FIFA WM 2006,... Die Liste der Erinnerungen an Studium, Diplomarbeit und Promotion ist lang und lässt sich kaum in wenigen Worten zusammenfassen. Alles in allem hatte ich eine sehr schöne Zeit in Münster und auch in der AG Denz, an die ich mich gerne zurück erinnere.

### Was war die besondere Herausforderung oder das Highlight Ihrer Arbeit?

› Da es sich um ein binationales Promotionsprojekt mit jährlichen Aufenthalten in Canberra handelte, bestand die größte Herausforderung in der Überwindung administrativer Hürden und der Koordination geeigneter Forschungsprojekte für die einzelnen Abschnitte. Im Nachhinein stellt aber gerade dieser internationale Aspekt auch das Highlight meiner Arbeit dar. Wer einmal in Australien war, wird dies sicherlich nachvollziehen können!

### Was ist Ihre besondere Erinnerung an das Studium in Münster?

› Ich kann mich noch gut an meine erste Laborführung in der AG Denz an den AG-Info-Tagen erinnern. Trotz der erschreckend dunklen Labore, bin ich bis heute im Bereich nichtlineare Optik geblieben.

### Was war die besondere Herausforderung oder das Highlight Ihrer Arbeit?

› Nach monatelangem Justieren zu Beginn meiner Diplomarbeit funktionierte tatsächlich alles.

### Wie sind Sie zu Ihrem jetzigen Beruf gekommen? Wie ist dies mit den Themen und Arbeitsweisen der AG verbunden?

› Mit Ende der Promotion stellte sich natürlich die Frage nach einem Wechsel in die Industrie oder dem Verbleib in der Wissenschaft. Letztlich habe ich mich mit der Stelle am Paul Scherrer Institut für den Mittelweg einer außeruniversitären Forschungseinrichtung entschieden. Durch die Zusammenarbeit mit diversen Firmen der Halbleiterindustrie sowie die gleichzeitige Möglichkeit zur Forschung auf dem faszinierenden Gebiet der Nanostrukturierung stehe ich mit beiden, teilweise doch sehr unterschiedlichen, „Welten“ in engem Kontakt. Ein Bezug meiner jetzigen Arbeiten zu den Themen der AG Denz besteht vor allem in der Untersuchung von periodischen Strukturen für photonische und plasmonische Anwendungen.

### Wie sind Sie zu Ihrem jetzigen Beruf gekommen? Wie ist dies mit den Themen und Arbeitsweisen der AG verbunden?

› Nach meiner Diplomarbeit in der AG Denz bin ich in die AG Fallnich gewechselt. Herr Prof. Fallnich hatte gerade passend in Münster neu angefangen und bot das spannende Thema der Superkontinuumserzeugung an. In der neuen Arbeitsgruppe beschäftigte ich mich genau wie in meiner Diplomarbeit mit einem nichtlinearen optischen Rückkoppelsystem.



## ULTRAKURZE LASERPULSE

Die Wechselwirkung von ultrakurzen Laserpulsen mit Gläsern und Kristallen führt zu starken nichtlinearen Effekten, welche die Materialeigenschaften kurzfristig oder dauerhaft ändern können. Dies ermöglicht die Herstellung integrierter photischer Bauelemente und die raum-zeitliche Kontrolle von Laserpulsen.

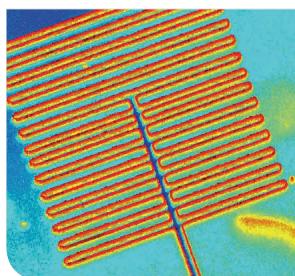
## ULTRASHORT LASER PULSES

*The interaction of ultrashort laser pulses with glasses and crystals leads to strong nonlinear effects which can change the material properties temporally or permanently. This allows for production of integrated photonic devices and the spatial-temporal control of laser pulses.*

## Femtosekundenerzeugte photonische Komponenten

### DREIDIMENSIONALE BRECHUNGSGINDEXMODIFIKATIONEN

Integrierte photonische Systeme sind die Schlüsselkomponenten für optische Netzwerke. Die Herstellung photonischer Schaltkreise mit ultrakurzen Laserpulsen ist eine vielversprechende Technologie, die es ermöglicht, dreidimensionale Strukturierungen auf der Nanometerskala durchzuführen.



Mikroskopischer Ausschnitt einer Subkomponente | Microscopic picture of a building block

„Zur Herstellung photonischer Strukturen werden hochenergetische Femtosekundenlaserpulse in optische Materialien fokussiert, die im linearen Fall transparent für die Laserwellenlänge wären. Die bei hohen Leistungen auftretende nichtlineare Absorption kann jedoch einen Mehrphotonenprozess auslösen, und ermöglicht es daher, in einer großen Anzahl von Gläsern und Polymeren lokale Strukturierung des Brechungsindex durchzuführen. So entstehen langzeit-stabile, monolithisch integrierte Bauelemente, da sie in die Tiefe des Materials geschrieben werden. Darüber hinaus benötigt der Herstellungsprozess keine Reinraumumgebung, sodass das Verfahren schnell und kostengünstig ist.“

In unserer Arbeitsgruppe konnten wir eine flexible Plattform zur Herstellung photonischer Bauelemente entwickeln, die einer großen Anzahl von unterschiedlichen Anforderungen genügt. Die Herstellungsmöglichkeiten umfassen unter anderem Mikrokanalsysteme, wie sie für Lab-on-a-chip Systeme von immer größerer Bedeutung werden, diffraktive optische Elemente für die effektive Strahlformung sowie funktionalisierte Wellenleiterstrukturen und optische Filter für die Informationsübertragung.

### OPTISCHE SCHALTKREISE

Gewöhnlich werden die Verbindungselemente zwischen solchen Bauelementen durch Wellenleiter realisiert. Dies erfolgt ebenfalls durch Femtosekundenlaserstrahlschreiben. Dabei besteht die Möglichkeit der Translati-on des Laserfokus in alle drei Raumrichtungen, sodass durch den Überlapp von erzeugten Brechungsindexe-

gionen ein kontinuierlich lichtleitender Bereich entsteht. Wir konnten Wellenleiter mit hervorragenden Transmissionseigenschaften erzeugen, die bis zu einer Tiefe von 500 Mikrometer integriert wurden. In unserem System konnten wir Wellenleiterstrukturen darüber hinaus erfolgreich funktionalisieren, um eine Verwendung als Modulator, Koppler oder Multiplexer zu ermöglichen. Mit dieser Art von Komponenten lassen sich auf kleinstem Raum Signale modulieren, auftrennen, zusammenführen, sowie filtern und verzögern. Ein zentraler Anwendungsbereich ist die Dispersionskompensation in Glasfaserübertragungs-strecken mit langer Reichweite, sodass Zerlaufen von Pulsen aufgrund chromatischer Dispersion reduziert wird.

Durch periodische Strukturierung des Brechungsindex werden Frequenzbandlücken im optischen Spektrum erzeugt. Dabei kann nicht nur die Amplitude, sondern auch die Phase von Signalen gezielt modifiziert werden. Industriell werden optische Frequenzfilter durch Phasenmasken holographisch induziert. Direktes Laserstrahlschreiben hat im Vergleich mit dieser Technologie den entscheidenden Vorteil, dass die Positionierung von Defekten innerhalb einer periodischen Struktur definiert eingestellt werden kann. Es ist somit möglich, ein wesentlich größeres Spektrum an Gitterparametern anzupassen. Wir konnten die Kombination von Phasendefekten, Superstrukturen und „gechirpten“ Gitterabschnitten realisieren, um die gewünschte Transferfunktion zu erhalten.



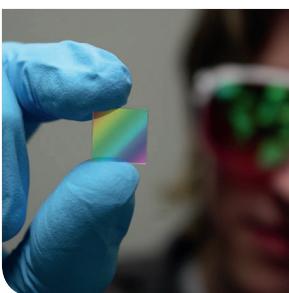
## Femtosecond Integrated Photonics

### 3D REFRACTIVE INDEX MODIFICATIONS

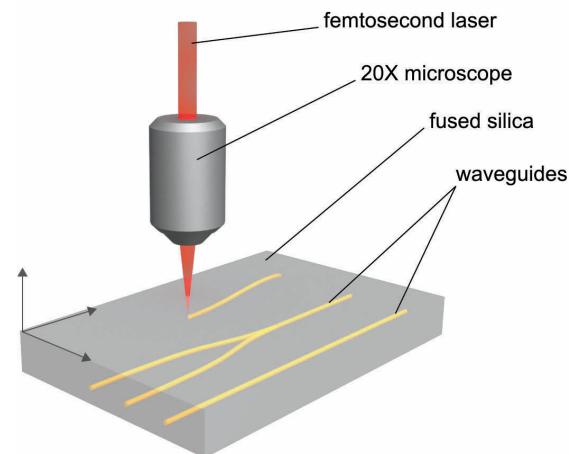
*Large-scale integrated optical elements are the key components for future optical networks. Fabrication of photonic chips using high-energy, ultrashort laser pulses is an emerging technology that enables three-dimensional structuring of optical components with sub-wavelength feature size by nonlinear absorption in otherwise transparent materials.*

< Femtosecond, near infrared laser radiation is employed to induce high refractive index changes in a wide range of non-photosensitive optical materials such as fused silica based glasses and photopolymers. This is accomplished by tightly focusing the laser plasma and subsequent nanoscale sample translation. In general, fabricated components are ruggedized and long-term stable compared to modification of photoresists on wafer substrates without the need for clean room conditions or expensive mask development. The direct laser writing team has developed a reconfigurable platform to suit all kinds of device fabrication including but not limited to integrated photonic bandgap structures and large area beam forming components.

Monomode light confinement is usually the first effort to be taken to guide telecom waveband signals with low propagation and insertion loss through an optical chip. This is realized by linear translation and overlapping of single index voxels to form a continuous path, comparable to a fiber core region. Waveguide structures can be functionalized easily to work as common network components such as powersplitters, evanescent couplers, arrayed waveguide gratings and Mach-Zehnder modulators. These devices are able to perform wavelength multiplexing as well as amplitude and phase modulation of narrowband signals.



Makroskopische Aufnahme eines optischen Chips mit integrierten photonischen Schaltkreisen | Macroscopic image of an optical chip with integrated photonic circuits



modify the spectral phase of signals and can therefore be used for dispersion compensation and potentially true-time delays to buffer optical pulses and resynchronize transceivers. Commercially available band rejection filters based on gratings are very limited in changing design parameters to cope with complex grating design since phase-mask technology is only able to stitch several sections together to implement parameter modification. Common design components include chirped sections, phaseshifts and superstructures. Lasing materials can be used in this relationship to implement distributed feedback systems and resonators for small light sources. Another large area of interest is the fabrication of sensor devices for temperature and strain measurements. Integrated on a microscopic scale they withstand harsh environmental conditions and electromagnetic interference.

### INTEGRATED OPTICAL CIRCUITS

Photonic bandgap structures are produced by varying the refractive index profile in all three dimensions. They are embedded into the lightwave circuit to

## Nichtlineare Optik mit ultrakurzen Laserpulsen

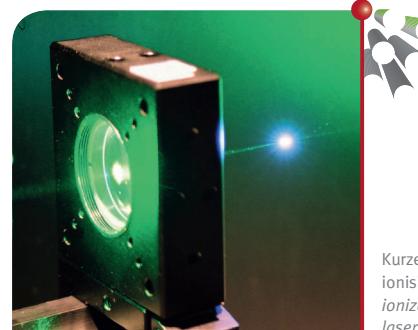
### KONTROLLE VON LICHT IN ALLEN DIMENSIONEN

Lichtpulse lassen sich sehr gut räumlich und zeitlich komprimieren. Leider behalten sie diesen Zustand während der Ausbreitung nicht bei, da sie aufgrund von Beugung und Dispersion räumlich aufgeweitet und zeitlich gestreckt werden. Dem lässt sich durch gezieltes Ausnutzen von Nichtlinearitäten entgegen wirken. Wenn sich Dispersion und Nichtlinearität ausgleichen, erhält man einen dispersions- und beugungsfrei propagierenden Lichtpuls – ein Soliton.

< Licht in allen drei Raumrichtungen und in der Zeit zu stabilisieren, also eine (3+1)-dimensionale „Lichtkugel“ zu erzeugen, ist bislang noch nicht experimentell demonstriert worden, da die richtige Kombination aus Material und Nichtlinearität für den passenden Wellenlängen- und Pulsdauer-Bereich eine große Herausforderung darstellt.  
Wir untersuchen verschiedene Ansätze zur raum-zeitlichen Kontrolle von Lichtpulsen. Durch einen großen Parameterbereich an Pulsdauern, Wellenlängen und Energien können wir je nach Material verschiedene nichtlineare Effekte und Dispersionsbereiche ausnutzen. Neben der Lichtausbreitung in homogenen nichtlinearen Medien ist die Wechselwirkung von Licht mit periodischen Strukturen eine vielversprechende Möglichkeit, ultrakurze Pulse räumlich und zeitlich zu kontrollieren.

### NICHTLINEARE BRECHUNGSGINDEXÄNDERUNGEN

Die räumliche Kontrolle ultrakurzer Laserpulse in einem homogenen Medium konnten wir mit einem photorefraktiven Strontiumbariumniobat (SBN) Kristall realisieren. Das räumliche Auseinanderlaufen des Pulses wird durch eine nichtlineare Brechungsindexänderung, welche zu einer Selbstfokussierung des Pulses führt, kompensiert. Wir haben zum ersten Mal mit ps-Pulsen räumliche Solitonen in einem SBN Kristall erzeugt und die spezifischen Eigenschaften dieser Solitonen untersucht. Dabei konnten wir auch Solitonen mit infraroten Pulsen erzeugen, was einen vielversprechenden Ansatz für weitere Anwendungen darstellt.



Kurzer Laserpuls ionisiert Luft | Air ionization by short laser pulse

Die Kontrolle der Lichtpropagation kann besonders effektiv durch periodische Strukturierung des Brechungsindex eines Materials erfolgen. In unseren Arbeiten induzieren wir eine periodische Strukturierung des Brechungsindex mit Licht in photorefraktiven Kristallen, indem zwei Pulse sowohl räumlich als auch zeitlich im nichtlinearen Material kohärent überlagert werden. Da der photorefraktive Effekt reversibel ist, werden die gespeicherten Strukturen - Hologramme - beim Auslesen wieder gelöscht. Um dies zu verhindern, kann während des Speicherns ein Zwei-Stufen Prozess ausgenutzt werden: die Kristalle werden zunächst mit Licht sensibilisiert, und nachfolgend die Hologramme mit infrarotem Licht geschrieben. Während des Auslesens der Hologramme ist das Sensibilisierungslicht ausgeschaltet. Das Auslesen wird dadurch zerstörungsfrei, wobei ein Löschen mit dem Sensibilisierungslicht weiterhin möglich bleibt. Diese Methode der nicht flüchtigen holographischen Speicherung haben wir mit ps-Pulsen in Lithiumniobat Kristallen erfolgreich umgesetzt.



## Nonlinear Optics with Ultrashort Laser Pulses

### CONTROL OF LIGHT IN ALL ITS DIMENSIONS

*Light pulses can be easily compressed spatially and temporally. However, during propagation they do not last in this state because diffraction and dispersion*

*lead to a temporal and spatial spreading of the pulses.*

*This can be prevented by harnessing nonlinearity. If the nonlinearity compensates for the dispersion a light pulse builds up – called soliton – which propagates without diffraction and dispersion*

↳ To stabilize light in all three dimensions and in time, i.e. to generate an “optical bullet”, has not been realized experimentally, yet, because to find the right combination of material and nonlinearity for the appropriate range of wavelengths and pulse durations is a great challenge.

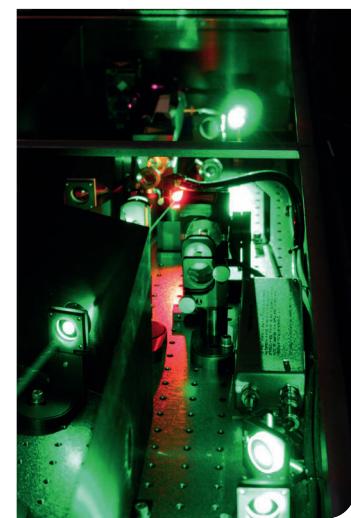
We examine different approaches for spatio-temporal control of light pulses. Due to a large range of pulse lengths, wavelengths and energies we can exploit different nonlinear effects and dispersion regions depending on the material. Besides the light propagation in homogeneous nonlinear media the interaction of light with periodic structures is a promising way to control ultrashort laser pulses in space and time.

### NONLINEAR REFRACTIVE INDEX CHANGES

We have realized the spatial control of an ultrashort laser pulse in a homogeneous photorefractive strontium barium niobate (SBN) crystal. The spatial spreading of the pulses is compensated for by a nonlinear refractive index change leading to a self focusing of the pulse. For the first time we have generated spatial photorefractive screening solitons in SBN crystals with ultrashort laser pulses and we have examined the special properties of these solitons. By these means we even could produce solitons with infrared pulses which reveals the large potential for further applications.

The control of light propagation can be realized effectively by periodically structuring the refractive index of the material. In our work we induce a modulated refractive index by light in a photorefrac-

tive crystal by coherently superimposing two pulses in space and time. As the photorefractive effect is reversible the stored structures – holograms – are erased during read-out. To overcome this problem one can use for storing a two-step process by sensitizing the crystal with blue light and recording the hologram with infrared light. During read-out the sensitizing light is switched off and the hologram can be read-out nondestructively whereas the hologram can be still erased with the sensitizing light. We have implemented this method of nonvolatile holographic storage with ps pulses in lithium niobate crystals. By changing the recording wavelength it is possible to record many gratings at the same place inside the crystal. Thus even more complex structures can be optically induced.



Regenerativer  
Verstärker: Ti:Saphir  
Kristall wird mit grünem  
Laserlicht gepumpt |  
Regenerative amplifier:  
Ti:sapphire crystal  
pumped by green  
laser light



**CARSTEN WEILNAU**

arbeitete von 2001-2003 an seiner Promotion über räumliche Vektorsonden in sättigbaren Medien. An die Dissertation schloss er eine Ausbildung zum Patentanwalt an.



**SEBASTIAN KOKE**

schloss 2007 seine Diplomarbeit zur Dynamik gegenläufiger optischer Solitonen ab. Seit 2008 promoviert er am Max-Born Institut in Berlin.

## Drei Fragen an Ehemalige

### Was ist Ihre besondere Erinnerung an die Promotion in Münster?

› Das studentische Flair und die geruhsame Art der Münsteraner habe ich wirklich genossen. Auch fühlte ich mich erstmals als Radfahrer nicht als Minderheit im Straßenverkehr.

### Was war die besondere Herausforderung und das Highlight Ihrer Arbeit?

› Meine beiden Forschungsaufenthalte am Laser Physics Centre der Australian National University in Canberra (Canberra, Australien) waren das absolute Highlight meiner Promotion. Neben anspruchsvollen und überaus interessanten physikalischen Problemstellungen galt es auch den australischen Alltag zu meistern. Vor allem aber konnte man während des Sommers in Down-Under dem nasskalten westfälischen Wintertreiben ein Schnippchen schlagen.

### Was ist Ihre besondere Erinnerung an das Studium in Münster?

› Da gibt es viele schöne Erlebnisse, an die ich mich gerne zurück erinnere: angefangen von dem neugierigen Start in den neuen Lebensabschnitt im Mathe-Vorkurs, über das Mitfeiern bei WM-Spielen im Viva Cafe, bis hin zum Rikscha-Korso mit der AG durch Münster anlässlich der Promotion von Vishnu.

### Was war die besondere Herausforderung und das Highlight Ihrer Arbeit?

› Wie bei eigentlich allen Forschungsprojekten war auch bei meiner Diplomarbeit die besondere Herausforderung, sich nicht von zwischenzeitlichen Misserfolgen entmutigen zu lassen. Als besonderes Highlight

### Wie sind Sie zu Ihrem jetzigen Beruf gekommen? Wie ist dies mit den Themen und Arbeitsweisen der AG verbunden?

› Nach der Promotion drängte es mich eigentlich in die Wirtschaft, doch schließlich tat sich vor mir die Welt der Patente und Marken auf. Wenngleich man hier nur staubtrockene Materie und Unmengen von Papier- sowie Schreibtischarbeit vermutet, ist der Beruf stets spannend und äußerst abwechslungsreich. Ein hohes Maß an Selbstständigkeit sowie analytisches Denken, vor allem aber verantwortungsbewusstes Handeln zum Wohle des Mandanten sind stets gefordert. Mit tiefgreifenden physikalischen Fragestellungen wird man zwar nur ab und an konfrontiert. Aber die an der Uni einst erlernte strukturierte Herangehensweise an ungelöste Probleme ist auch in Fragen des Patent- und Markenrechts jederzeit anwendbar.

habe ich es empfunden, meine Ergebnisse einem internationalen Publikum auf der EOS Tagung in Paris vorstellen zu können.

### Wie sind Sie zu Ihrem jetzigen Beruf gekommen? Wie ist dies mit den Themen und Arbeitsweisen der AG verbunden?

› Eine Initiativbewerbung hat mich zu meiner jetzigen Einrichtung geführt. Die Nichtlineare Optik verbindet meine Arbeit in der AG mit dem Thema meiner Doktorarbeit, in der ich auch in verschiedenen Systemen mit Solitonen konfrontiert bin. Das in meiner Diplomarbeit Erlernte lässt sich auf diese Phänomene übertragen und erleichtert deren Verständnis.



## FUNKTIONALE MATERIALIEN

Die Wechselwirkung von Materialien mit Licht ist eine Grundlage der nichtlinearen Photonik. Von besonderer Bedeutung sind Materialien, die eine lichtinduzierte Brechungsindexänderung aufweisen. Diese Funktionalität besitzen die in unserer Arbeitsgruppe eingesetzten photorefraktiven Kristalle, Polymerkomposite und Photopolymere.

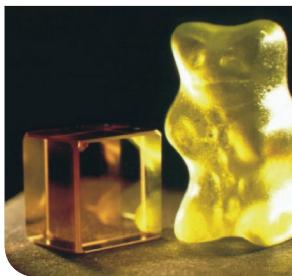
## FUNCTIONAL MATERIALS

*The interaction of light with materials is one basis of nonlinear photonics. Of particular importance are materials that possess a light-induced refractive index change. In our group this functionality is provided by photorefractive crystals, polymer composites and photopolymers.*

### Photorefraktive Kristalle

#### NICHTLINEARE OPTIK BEI GERINGEN LICHTINTENSITÄTEN

Einer der wichtigsten Effekte der nichtlinearen Optik für Anwendungen in der Informationsverarbeitung ist die nichtlineare Brechungsindexänderung. Wird sie in Kristallen erzeugt, kann schon bei niedrigsten Laserleistungen eine starke Strahlkopplung entstehen, die attraktive Anwendungen wie holographische Datenspeicherung, parametrische Lichtverstärkung, oder Phasenkonjugation erlaubt.



Photorefraktiver Bariumtitankristall im Größenvergleich | Photorefractive Barium titanate crystal compared in size  
(© J. Petter, TU Darmstadt)

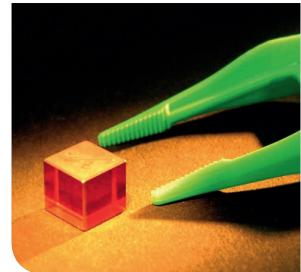
✓ Zahlreiche transparente dielektrische Materialien reagieren auf hohe Lichtintensitäten mit einem nichtlinearen Antwortverhalten und sind dadurch in der Lage, neue Frequenzen zu erzeugen oder auch den Brechungsindex oder die Absorption in Abhängigkeit der eingestrahlten Intensität zu verändern. Typischerweise sind dazu hohe Laserleistungen notwendig, wie sie z.B. ultrakurze Laserpulse bereitstellen.

#### BRECHUNGSGINDEXÄNDERUNGEN FÜR DIE HOLOGRAPIE

Im Gegensatz zu solchen typischen Materialien können Flüssigkristalle oder photorefraktive Materialien aufgrund der zugrunde liegenden Kopplung elektrischer und optischer Effekte bereits bei sehr geringen Laserleistungen – wie der eines Laserpointers – signifikante nichtlineare Effekte erzeugen. Insbesondere nichtlineare Brechungsindexänderungen sind so bei geringen Lichtintensitäten möglich. Photorefraktive Materialien können diese Brechungsindexänderung sogar temporär – oder nach einem Fixierungsprozess – permanent speichern. Dadurch werden dynamische holographische Verfahren möglich, und diese wiederum ebnen den Weg zur hochkapazitiven holographischen Datenspeicherung und zur Bildverarbeitung mittels der aus der dynamischen Holographie resultierenden Strahlkopplung.

#### MATERIALIEN MIT BESONDEREN EIGENSCHAFTEN

In unseren Arbeiten entwickeln wir gemeinsam mit Kooperationspartnern verschiedene neuartige Kristalle, deren Eigenschaften auf die Anforderung der Datenspeicherung oder Bildverarbeitung angepasst sind.



Photorefraktiver Lithiumniobatkristall | Photorefractive lithium niobate crystal  
(© J. Petter, TU Darmstadt)

Vier Beispiele seien hier genannt: Photorefraktives Lithiumniobat ( $\text{LiNbO}_3$ ) ist besonders für die Langzeit-Datenspeicherung von Bedeutung, da es durch temperaturbasierte Fixierungsprozesse eine permanente Speicherung eingeschriebener Daten mit höchsten Speicherdichten im Bereich von TBytes/cm<sup>3</sup> ermöglicht. Die nahezu fehlerfreie Datenspeicherung digitaler Daten und assoziative Datenbanksuche werden so möglich. Photorefraktives Bismuttellurit ( $\text{Bi}_2\text{TeO}_5$ ) ist durch seine Selbstfixierungseigenschaften hervorragend als Speichermedium geeignet. In diesem neuartigen Material konnten wir erstmals selbstfixierte Datenspeicherung demonstrieren. Photorefraktives Bariumtitannat ( $\text{BaTiO}_3$ ) kann aufgrund der elektronischen Prozesse eine räumliche Verschiebung zwischen eingestrahlter Intensität und erzeugtem Brechungsgitter derart erzeugen, dass starke Strahlkopplung möglich wird. Neben der Phasenkonjugation komplexer Lichtfelder nutzen wir diesen Effekt zur Realisierung neuartiger dynamischer Phasenkontrastmikroskope. Photorefraktives Strontiumniobat (SBN) schließlich eignet sich durch die Kontrolle über externe elektrische Felder insbesondere zur Steuerung von lokalen Brechungsindexänderungen. In diesen Materialien ist es uns gelungen, adaptive Wellenleiter sowie photoni sche Strukturen nur durch Licht zu erzeugen.



# Photorefractive Crystals

## NONLINEAR OPTICS AT LOW LIGHT INTENSITIES

*One of the most important effects of nonlinear optics for applications in optical information processing is*

*the nonlinear refractive index change. When created in crystalline materials, very*

*low light intensities are sufficient to create strong beam coupling, which allow attractive applications in holographic data storage, parametric beam coupling, or phase conjugation.*

↳ A number of transparent dielectric materials react on high light intensities with a nonlinear response, thereby creating new frequencies, or change the refractive index or absorption. Typically, high laser intensities as they are supplied by ultrashort laser pulses are required to get significantly strong responses.

### REFRACTIVE INDEX CHANGES FOR HOLOGRAPHY

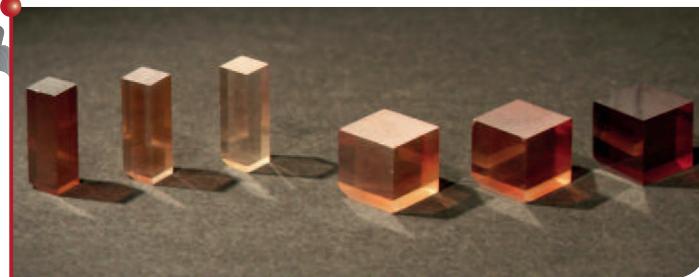
*In contrast to these typical materials, liquid crystals or photorefractive materials can create strong nonlinear effects at low laser powers as low as laser pointer energies due to the coupling of electric and optical responses. Especially, nonlinear refractive index changes become possible at low laser energies in these materials. Photorefractive materials are also able to store these refractive index changes temporarily or permanently, thereby allowing to realize dynamic holographic techniques. These in turn pave the way to applications as holographic data storage, and image processing via beam coupling.*

### MATERIALS WITH TAILORED FEATURES

*In many of our projects, we develop novel and optimized crystals together with a number of cooperation partners in order to adapt these crystalline materials to applications in digital data storage and optical information processing. Four examples are given here: photorefractive lithium niobate ( $\text{LiNbO}_3$ ) is well-suited for long-term holographic data storage due to temperature-based fixing processes. This allows the almost error-free storage of huge capacities of digital data in the range of Tbytes/cm<sup>3</sup> and associative data search. Photorefractive bismuth tellurite ( $\text{Bi}_2\text{TeO}_3$ ) features self-fixing capabilities which makes it well-suited as data storage medium. We could show for the first time, that self-fixing holographic data storage is possible in this material. Photorefractive barium titanate ( $\text{BaTiO}_3$ ) can be used for effective beam coupling due to an appropriate shift of the incident light pattern with respect to the refractive index pattern built in the material. We are exploiting this effect for phase conjugation of complex light fields as well as for dynamic phase contrast techniques. Finally, in photorefractive strontium barium niobate (SBN), refractive index changes can be controlled locally by external electric fields, thereby allowing to realize adaptive waveguides and complex photonic structures by light.*



Serie gezüchteter  
Lithiumniobat-  
Kristalle | A series  
of lithium niobate  
crystals



# Photorefraktive Polymerkomposite

## MATERIALIEN FÜR DIE HOLOGRAPIE DES 21. JAHRHUNDERTS

Eine Verbesserung vorhandener Technologien verlangt auch eine Optimierung der verwendeten Materialien. Gebräuchliche Optimierungsverfahren sind Bottom-up-Techniken wie die molekulare Selbstorganisation, die auch bei der Optimierung photorefraktive Polymerkomposite Anwendung findet. Hierbei handelt es sich um Materialien, die aus mehreren Komponenten bestehen und den photorefraktiven Effekt aufweisen. Ein Material wird als photorefraktiv bezeichnet, wenn es über den elektrooptischen Effekt mit einer Brechungsindexänderung auf zuvor durch Lichtbestrahlung angeregte Ladungsträger reagiert.

Lösungen mit unterschiedlichem DiPBI-Gehalt | Solutions with different amounts of DiPBI

Anwendung finden photorefraktive Materialien zum Beispiel in der holographischen Datenspeicherung und Displaytechnik. Bisher wurden überwiegend anorganische Kristalle eingesetzt, jedoch wird seit etwa 20 Jahren an der Optimierung organischer photorefraktiver Materialien gearbeitet. Für die Herstellung solcher Materialien gibt es unterschiedliche Konzepte, von denen sich das Konzept photorefraktiver Polymerkomposite als besonders vielversprechend herausgestellt hat. Bei diesem Ansatz erfüllt jeweils eine Komponente des Kompositos die Anforderung für einen Teilprozess des photorefraktiven Effektes. Somit wird eine relativ einfache Optimierung der Materialien sowie eine hervorragende Anpassungsfähigkeit für die spätere Anwendung ermöglicht.



Die Absorption des Lichtes und somit die Erzeugung von Ladungsträgern wird durch die Verwendung von sogenannten Sensibilisatoren erreicht. Die Rolle der Moleküle für den Ladungstransport wird häufig durch das Polymer übernommen. Eine Änderung der Ladungsträgerverteilung und ein damit verbundener

Aufbau eines Raumladungsfeldes wird durch Fallenzustände erreicht, in denen die Ladungsträger für eine gewisse Zeit gebunden werden. Der Einfluss des Raumladungsfeldes auf nichtlinear-optische Chromophore, die bereits in einem äußeren elektrischen Feld ausgerichtet sind, erzeugt die gewünschte Brechungsindexänderung.

### UNSER OPTIMIERUNGSANSATZ – VIELVERSPRECHEND UND EFFEKTIV

Die Geschwindigkeit des photorefraktiven Effektes innerhalb der Komposite wird derzeit durch die Anregung und den Transport der Ladungsträger limitiert. Daher zielt unser Optimierungsansatz, den wir im Rahmen eines Teilprojekts im ersten deutsch-chinesischen Sonderforschungsbereich-Transregio gemeinsam mit Prof. Dr. Zhaojun Wang, Chinesische Akademie der Wissenschaften, Peking, verfolgen, auf eine Verbesserung dieser Prozesse. Um die optische Erzeugung von Ladungsträgern zu steigern, verwenden wir erstmals den neuartigen Sensibilisator DiPBI. Durch molekulare Selbstorganisation maßgeschneidelter Transportmoleküle wird ein hocheffektiver Ladungstransport ermöglicht. Neben der eigenen Synthese dieser innovativen Komposite und numerischen Simulationen der elektrischen und optischen Antwort, analysieren wir die erzielten Funktionalitäten mit verschiedenen experimentellen Techniken.

Unsere Untersuchungen zeigen, dass DiPBI ein wesentlich effizienterer Sensibilisator als das bekannte PCBM ist, da es bei gleicher Absorption zwei- bis dreimal so große Photoströme generiert.



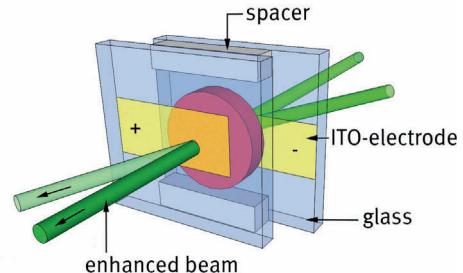
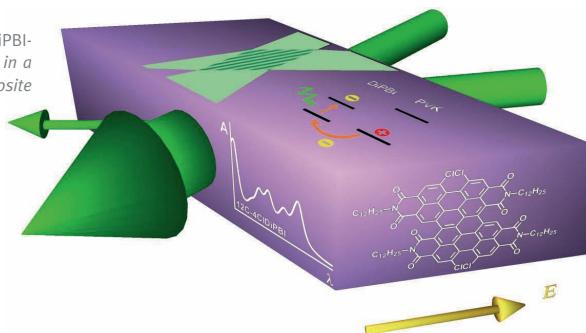
# Photorefractive Polymer Composites

## MATERIALS FOR HOLOGRAPHY OF THE 21ST CENTURY

An improvement of present technologies also requires an optimization of the materials used. Common optimization methods are bottom-up techniques like molecular self-assembly, which is also applied during the optimization process of photorefractive polymer composites. These are materials, which are made from multiple components and possess the photorefractive effect. A material is called photorefractive, if it reacts with a refractive index change on charge carriers that have been excited by light irradiation.

< Photorefractive materials are applied in the fields of holographic data storage and displays. As an alternative to classical photorefractive materials, inorganic crystals, the optimization of organic materials that exhibit photorefractive properties is studied for the last 20 years. There are several concepts for the fabrication of those materials. The concept of photorefractive polymer composites has turned out to be very promising. In this approach, every component of the composite fulfills one of the requirements of the photorefractive effect. Due to this task distribution, easy optimization of these materials as well as excellent adaptability for applications is provided. Light absorption and thus generation of charge carriers is obtained by usage of so called sensitizers. Commonly the role of the charge transport agents is performed by the polymer itself. A variation in the charge carrier distribution and therefore the generation of a space-charge field is achieved by traps which bind the charge carriers for a certain time. The influence of the space-charge field on nonlinear optical chromophores, which are orientated in an external electric field, generates the desired refractive index change.

Zweistrahlgkopplung in einem DiPBI-Komposit | Two-beam coupling in a DiPBI composite



Photorefraktives Komposit zwischen transparenten Elektroden | Photorefractive composite between transparent electrodes

## OUR OPTIMIZATION APPROACH – PROMISING AND EFFECTIVE

The speed of the photorefractive effect inside the composites is currently limited by generation and transport of charge carriers. That is why our optimization approach, which is pursued in the framework of the first German-Chinese Collaborative Research Centre (Transregio) in collaboration with Prof. Dr. Zhaohui Wang, Chinese Academy of Sciences, Beijing, aims an improvement of these processes. To improve the optical excitation of charge carriers, we employ for the first time the novel sensitizer DiPBI. Highly effective charge transport is provided by molecular self-assembly of custom-designed charge transport agents. Besides our own synthesis of these innovative composites and numerical simulations of electrical and optical response, we analyze the aimed functionalities with different experimental techniques. As our analysis shows, DiPBI is a much more efficient sensitizer than the well-known PCBM, because it generates up to three times larger photocurrents at equal absorption.

### Photopolymere

#### AUFAHMEMEDIEN FÜR DIE HOCHKAPAZITIVE DATENSPEICHERUNG

Ein attraktiver Kandidat für hochkapazitive Datenspeicher ist die holographische

Datenspeicherung, die höchste Datendichten auf kleinstem Raum und hohe Datentransferraten ermöglicht. Als Speichermaterialien werden neben elektrooptischen Kristallen verstärkt Photopolymere eingesetzt. Unter dem Begriff Photopolymere versteht man Systeme organischer Moleküle, in denen unter Lichtexposition

Polymerisationprozesse stattfinden, die den Brechungsindex verändern.

Allgemeine Charakteristiken solcher Photopolymere sind sowohl die hervorragende Lichtempfindlichkeit und ein großer Dynamikbereich, als auch eine gute Langzeitstabilität und Bildqualität.

< Viele Photopolymere sind selbstentwickelnde trockene Speichermaterialien, die im Gegensatz zu klassischen Aufnahmematerialien der Holographie keine Körnung aufweisen und keine chemische Entwicklung benötigen. Die geringen Herstellungskosten machen Photopolymere zu einem attraktiven Speichermaterial für write-once, read-many Medien. Die hohe Lichtempfindlichkeit erlaubt ausreichende Brechungsindexänderungen, selbst bei geringen Belichtungszeiten von wenigen Nanosekunden. Die holographische Datenspeicherung erreicht besonders hohe Speicherdichten, indem Datenseiten mit bis zu 1 Megabyte holographisch gespeichert werden. Durch Ausnutzung der Bragg-Bedingung können diese Seiten dann an einem Ort überlagert werden, ohne sich gegenseitig zu stören. Dieses als „Multiplexing“ bekannte Verfahren erhöht die Datenspeicherkapazität signifikant.

Für effizientes Multiplexing von Datenseiten auf der Basis der Bragg-Bedingung muss sichergestellt werden, dass verhältnismäßig dicke Polymerproben verwendet werden können. Dies betrifft vor allem holografische Speichersysteme bei denen Phasencodemultiplexing angewendet wird. Das in unserer Gruppe entwickelte Speichersystem stellt für den Test solcher Materialien die ideale Plattform dar, um verschiedene Zusammensetzungen von neuartigen Photopolymeren zu testen. In Kooperation mit dem Center for Industrial and Engineering Optics am „Dublin Institute of Technology“ wurde ein neuartiges Acrylamid-Photopolymer getestet und für die holografische Datenspeicherung optimiert.



Acrylamid Photopolymer mit Photostarter Erythrosin-B auf einem 3x3 cm<sup>2</sup> Glassubstrat | Acrylamide photopolymer with photoinitiator Erythrosin-B coated on a 3x3 cm<sup>2</sup> glass substrate

#### SELBSTENTWICKELNDE POLYMERSTRUKTUREN

Acrylamid basierte Photopolymere sind selbstentwickelnde Speichermaterialien, die aus einem Monomer, einem Elektronendonator und einem Farbstoff bestehen und in eine Matrix aus Polyvinylalkohol eingebettet werden. Der Photopolymerisationsprozess beginnt, wenn ein Photon vom Farbstoff absorbiert wird und dieser in einen angeregten Zustand übergeht. Das Farbstoffmolekül reagiert anschließend mit dem Elektronendonator, sodass ein freies Radikal produziert wird, das die Polymerisation des Acrylamids startet. Vor der Speicherung der Datenseiten in Form von komplizierten Interferenzmustern erfolgt ein spezielles Beschichtungsverfahren, damit eine möglichst gute Homogenität der Oberfläche gewährleistet werden kann. Inhomogen beleuchtete Bereiche ändern den Brechungsindex aufgrund von Dichteänderungen, die auf den reduzierten Bindungsabstand von Monomeren nach der Polymerisierung zurückzuführen ist. Die adressierten Datenseiten können nach dem Aufzeichnungsvorgang fixiert werden, wenn eine vollständige Polymerisierung des Materials durch großflächige Beleuchtung mit UV-Licht durchgeführt wird.

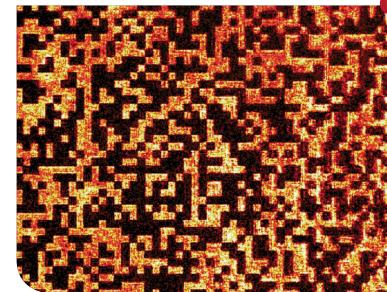
# Photopolymers

## HIGH DENSITY RECORDING MEDIA FOR PHASE-CODED HOLOGRAMS

*One of the shortcomings of holographic data storage was the lack of an appropriate storage material, which offers all the optical properties for high density pagewise digital recording.*

*These properties mainly include maximum refractive index change, thickness, long term-stability, low shrinkage, and the ability to record gratings with a high spatial frequency. Photopolymers are cost effective compared to inorganic materials and are promising candidates for disc-like optical storage of Fourier thick volume holograms.*

Many photopolymers have the advantage that they are self-developing, needing no wet processing or thermal treatment. Additionally, high light sensitivity offers large refractive index changes even when exposed for a few nanoseconds. For multiplexed holographic data pages, it is crucial to fabricate thick layers in which multiple holograms can be recorded at the same location and that there is no significant shrinkage or swelling of the polymer after recording. This is particularly important when using phase code multiplexing. The phase coded holographic storage system in the group has proven to be a perfect platform to test various polymer compositions and to characterize their recording properties and determine the suitability. In cooperation with the Dublin institute of technology a novel acrylamide photopolymer was optimized to suit high sensitivity for 488 nm writing wavelength.



Teil einer binär kodierten Datenseite in einem Acrylamid-Photopolymer | Part of a digital data page recorded in an acrylamide photopolymer

## SELF-DEVELOPING POLYMER STRUCTURES

Acrylamide-based photopolymers are self-developing dry layers that consist of a polyvinylalcohol binder in which a monomer, an electron donor, and a dye sensitizer are dissolved. When dye molecules absorb photons in the presence of an electron donor, free radicals are produced causing polymerization of acrylamide. A corresponding variation occurs in the local refractive index of the material. Before recording, the polymeric solution is coated on a silica substrate and dried out before exposure. Each datapage is recorded in the photopolymer layer as a modulation of the refractive index resulting from a complex interference pattern. The polymer can then be fixed to inhibit further polymerization by consuming the entire dye molecule and so halting further creation of free radicals.

Experimentelle Konfiguration für die Aufnahme von hochkapazitiven Datenseiten in einem phasenkodierten holographischen Speichersystem | Experimental configuration to record high density data pages in a phase-coded holographic storage system







# ZEITSTRAHL TIMELINE

# ZEITSTRAHL

## NICHTLINEARE PHOTONIK 2001-2011

## **ASSOCIATIVE RECALL IN A VOLUME**

# HOLOGRAPHIC STORAGE SYSTEM BASED ON PHASE-CODE MULTIPLEXING

↳ G. Berger,  
C. Denz, S.S. Orlov, B. Phillips, L. Hesselink |  
Appl. Phys. B 73 (2001) 839–845

**OBSERVATION OF DIPOLE-MODE VECTOR SOLITONS** C. Weilnau, C. Denz, W. Krolikowski, M. Geisser, G. McCarthy, B. Luther-Davies, E.A. Ostrovskaya, Y. Kivshar | in "Soliton-driven photonics", A.D. Boardman, A.P. Sukhorukov (Eds.), Kluwer Academic Publisher (2001) 229-234



## ADAPTIVE BRAGG-ZELLE

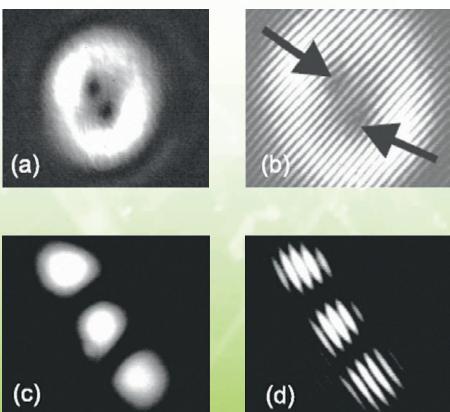
< V.P. Petrov, C. Denz,  
M.P. Petrov. T. Tschudi |  
Deutsches Patentamt,  
Nr. DE 10157302 (2001)

## DIPOLE-MODE VECTOR SOLITONS IN ANISOTROPIC

## **PHOTOREFRACTIVE MEDIA**

✉ K. Motzek, A. Stepken, F. Kaiser, M. Belic,  
 M. Ahles, C. Weilnau, C. Denz | Opt. Commun.  
 197 (2001) 161-167

- GENERATION OF HIGHER-ORDER OPTICAL (2+1)-DIMENSIONAL SPATIAL VECTOR SOLITONS IN A NONLINEAR ANISOTROPIC MEDIUM C. Weilnau, C. Denz, M. Ahles, A. Stepken, K. Motzek, F. Kaiser Phys. Rev. E 64 (2001) 056601



- › Zerfall eines Vortex ( $m=2$ ) für kurze ( $a,b$ ) und lange ( $c,d$ ) Propagationslängen | Decay of a vortex ( $m=2$ ) for short ( $a,b$ ) and long ( $c,d$ ) propagation lengths

MULTICOMPONENT DIPOLE-MODE SPATIAL SOLITONS

✉ A.S. Desyatnikov, Yu.S. Kivshar, K. Motzek,  
F. Kaiser, C. Weilnau, C. Denz | Opt. Lett. 27 (2002)  
634-636

634-636

#### **Holographic Performance of Photorefractive**

**Bi<sub>2</sub>TeO<sub>5</sub> CRYSTALS** < I. Földvari, C. Denz, G. Berger,  
A. Peter | Radiation Effects & Defects Solids in  
157 (2002) 1145-1148

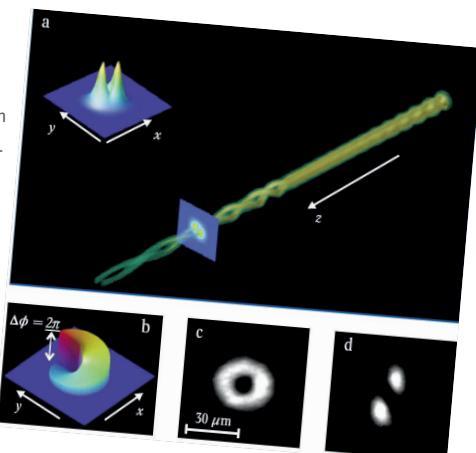
## MOTION DETECTION AND MICROSCOPY USING A PHOTOREFRACTIVE NOVELTY FILTER

**STABILIZATION AND BREAKUP OF COUPLED  
DIPOLE-MODE BEAMS IN AN ANISOTROPIC  
NONLINEAR MEDIUM**  $\leftarrow$  M. Ahles, K. Motzke,  
A. Stepken, F. Kaiser, C. Weilnau, C. Denz |  
J. Opt. Soc. Am. B 19 (2002) 557-562

- SPATIAL OPTICAL (2+1)-  
DIMENSIONAL SCALAR- AND  
VECTOR-SOLITONS IN SATURABLE  
NONLINEAR MEDIA C. Weilnau,  
M. Ahles, J. Petter, D. Träger,  
J. Schröder, C. Denz | Ann.  
Phys. 11 (2002) 573-629

2001 >

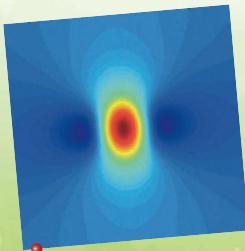
50 >



› Zerfall eines optischen Wirbels in ein Dipolmoden-Vektorsoliton bei Stabilisierung durch ein Soliton | Decay of an optical vortex into a dipole-mode vector soliton due to stabilization by a vector soliton

#### RÄUMLICHE OPTISCHE SOLITONEN - LICHT STEUERT LICHT

⟨ C. Denz, C. Weilnau | Physik Journal 10 (2003), 33-39

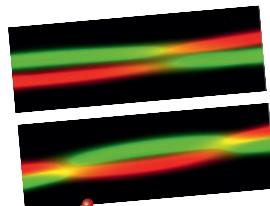


› Konturendarstellung der Brechungsindexverteilung eines anisotropen räumlichen optischen Solitons | Contour plot of the refractive index distribution of an anisotropic spatial optical soliton

**ANISOTROPIC WAVEGUIDES INDUCED BY PHOTOREFRACTIVE (2+1)D SOLITONS** ⟨ J. Petter, C. Denz, A. Stepken, F. Kaiser | J. Opt. Soc. Am. B 19 (2002) 1145-1149

#### MULTI-COMPONENT VECTOR SOLITONS IN PHOTOREFRACTIVE CRYSTALS

⟨ K. Motzek, F. Kaiser, C. Weilnau, C. Denz, G. McCarthy, W. Krolikowski, A.S. Desyatnikov, Yu. S. Kivshar | Opt. Commun. 209 (2002) 501-506



› Selbststabilisierung gegenläufiger Solitonen durch Wechselwirkung | Self-trapping of counterpropagating solitons by mutual interaction

#### SELF-TRAPPED BIDIRECTIONAL WAVEGUIDES IN A SATURABLE PHOTOREFRACTIVE MEDIUM

⟨ M. Belic, Ph. Jander, A. Strinic, A.S. Desyatnikov, C. Denz | Phys. Rev. E 68 (2003) 025601(R)

#### SCATTERING OF DIPOLE-MODE VECTOR SOLITONS: THEORY AND EXPERIMENT

⟨ W. Krolikowski, G. McCarthy, Yu.S. Kivshar, C. Weilnau, C. Denz, J.J. Garcia-Ripoll | Phys. Rev. E 68 (2003) 016612

#### NON-VOLATILE VOLUME HOLOGRAMS IN BISMUTH TELLURITE CRYSTALS

⟨ G. Berger, C. Denz, I. Földvari, A. Peter | J. Opt. A 5 (2003) 444-447

#### PHOTOREFRACTIVE SOLITONS

⟨ W. Krolikowski, B. Luther-Davies, C. Denz | IEEE J. Quant. Electron. 39 (2003) 3-12

#### OPTICAL CONTROL OF ARRAYS OF PHOTOREFRACTIVE SCREENING SOLITONS

⟨ J. Petter, J. Schröder, D. Träger, C. Denz | Opt. Lett. 28 (2003) 438-440

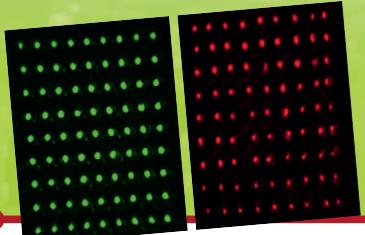
#### REAL-TIME PHASE MEASUREMENT WITH A PHOTOREFRACTIVE NOVELTY FILTER MICROSCOPE

⟨ V.V. Krishnamachari, C. Denz | J. Opt. A 5 (2003) S239-S243

#### INTERACTION IN LARGE ARRAYS OF SOLITONS IN PHOTOREFRACTIVE CRYSTALS

⟨ D. Träger, A. Strinic, J. Schröder, C. Denz, M. Belic, M. Petrovic, S. Matern, H.-G. Purwins | J. Opt. A 5 (2003) S518-S523

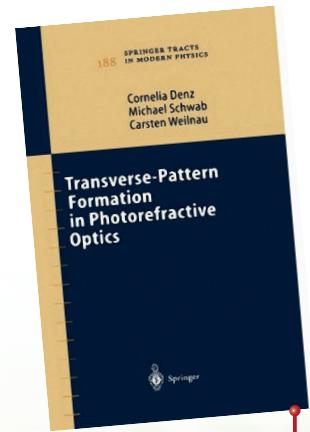
› Wellenleitung roten Lichts (rechts) in einem Array von photorefraktiven Solitonen | Waveguiding of red light (right) in an array of photorefractive solitons



2003 >

# ZEITSTRAHL

## NICHTLINEARE PHOTONIK 2001-2011



**TRANSVERSE-PATTERN FORMATION IN PHOTOREFRACTIVE OPTICS** C. Denz, M. Schwab, C. Weilnau | Springer Tracts in Modern Physics 188 (2003), Springer Verlag, Heidelberg,

**MUTUAL SPATIAL-SOLITON TRAPPING IN PHOTOREFRACTIVE MEDIA: EXPERIMENT VERSUS THEORY** G. McCarthy, T. Breuninger, J. Schröder, C. Denz, D.N. Neshev, W. Krolikowski | Appl. Phys. B 77 (2003) 421-426

**TRANSVERSE MODULATIONAL INSTABILITIES OF COUNTER-PROPAGATING SOLITONS IN PHOTOREFRACTIVE CRYSTALS**  
M. Belic, M. Petrovic, D. Jovic, A. Strinic, D. Arsenovich, K. Motzek, F. Kaiser, Ph. Jander, C. Denz, M. Tlidi, P. Mandel | Opt. Expr. 12 (2004) 708-716

**COMPOSITE BAND-GAP SOLITONS IN NONLINEAR OPTICALLY INDUCED LATTICES**  
A.S. Desyatnikov, E.A. Ostrovskaya, Yu.S. Kivshar, C. Denz | Phys. Rev. Lett. 91 (2003) 153902

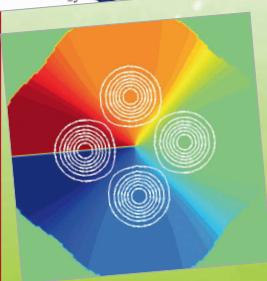
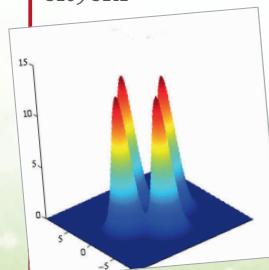
**DYNAMIC COUNTERPROPAGATING VECTOR SOLITONS IN SATURABLE SELF-FOCUSING MEDIA** K. Motzek, Ph. Jander, A.S. Desyatnikov, M. Belic, C. Denz, F. Kaiser | Phys. Rev. E 68 (2003) 066611

**SOLITARY BEAM FORMATION WITH PARTIALLY COHERENT LIGHT IN AN ANISOTROPIC PHOTOREFRACTIVE MEDIUM**  
C. Weilnau, C. Denz | J. Opt. A 5 (2003) S529-S535

**SOLITONIC LATTICES IN PHOTOREFRACTIVE CRYSTALS**  
M. Petrovic, D. Träger, A. Strinic, M. Belic, J. Schröder, C. Denz | Phys. Rev. E 68 (2003) 055601R

**COUNTERPROPAGATING SELF-TRAPPED BEAMS IN PHOTOREFRACTIVE CRYSTALS** M. Belic, Ph. Jander, K. Motzek, A.S. Desyatnikov, D. Jovic, A. Strinic, M. Petrovic, C. Denz, F. Kaiser | J. Opt. B 6 (2004) S190-S196

**NONLINEAR OPTICAL BEAMS CARRYING PHASE DISLOCATIONS**  
A.S. Desyatnikov, C. Denz, Yu.S. Kivshar | J. Opt. A 6 (2004) S209-S212



› Anregung eines vierzähligen rotierenden Vektorclusters |  
Excitation of a four-fold rotating vector cluster

**TRANSVERSE PATTERN FORMATION AND ITS CONTROL IN PHOTOREFRACTIVE OPTICS** C. Denz, Ph. Jander, M. Schwab, O. Sandfuchs, M. Belic, F. Kaiser | Ann. Phys. 13 (2004) 391-402

**INCOHERENT VECTOR VORTEX-MODE SOLITONS IN SELF-FOCUSING NONLINEAR MEDIA**  
K. Motzek, F. Kaiser, J.R. Salgueiro, Yu.S. Kivshar, C. Denz | Opt. Lett. 29 (2004) 2285-2287

**A PHASE-TRIGGERING TECHNIQUE TO EXTEND THE PHASE-MEASUREMENT RANGE OF A PHOTOREFRACTIVE NOVELTY FILTER MICROSCOPE**  
V.V. Krishnamachari, C. Denz | Appl. Phys. B 79 (2004) 497-501

2003 ›

52 ›

2004 ›

**EINSTEINS KOLLEGINNEN – PHYSIKERINNEN****GESTERN UND HEUTE** ↗ C. Denz, A. Voigt |

Kompetenzzentrum TeDic, Publikation zum Einstein-Jahr 2005

**SPATIO-TEMPORAL INSTABILITIES AND SELF-ORGANIZATION** ↗ C. Denz,

Ph. Jander, in "Photorefractive Materials and Their Applications I", P. Günter, J.-P. Huignards (Eds.) | Springer Series in Optical Sciences 113 (2005)

**SPECIAL ISSUE "DYNAMICS IN NONLINEAR OPTICS AND QUANTUM OPTICS"** ↗ T. Ackemann, C. Denz, F. Mitschke | Appl. Phys. B. 81 (7), (2005)**2005 >****COUNTERPROPAGATING BEAMS IN BIASED PHOTO-****REFRACTIVE CRYSTALS: ANISOTROPIC THEORY**

↖ K. Motzek, M. Belic, T. Richter, C. Denz,

A.S. Desyatnikov, Ph. Jander, F. Kaiser |

Phys. Rev. E 71 (2005) 016610

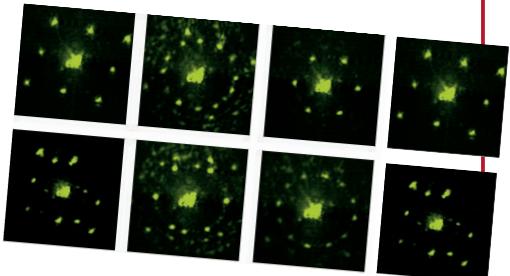
➤ Beispiele für selbstorganisierte Muster in einem photorefraktiven Rückkopplungssystem

| Examples for self-organized patterns in a photorefractive feedback system

**INSTABILITY THRESHOLD OF A PHOTOREFRACTIVE PATTERN-FORMING SYSTEM**

↖ O. Kamps, Ph. Jander, C. Denz | Phys.

Rev. E 72 (2005) 016215

**TWO-DIMENSIONAL SOLITONS WITH HIDDEN****AND EXPLICIT VORTICITY IN BIMODAL CUBIC-QUINTIC MEDIA** ↗ A.S. Desyatnikov,

D. Mihalache, D. Mazilu, B.A. Malomed, C. Denz, F. Lederer | Phys. Rev. E 71 (2005) 026615

**BIBLIOTHEKEN IN HAND-TASCHENFORMAT**

↖ G. Berger, C. Denz | Forschungsjournal Universität Münster 13 (02) (2005) 6-14

**DYNAMIC INSTABILITY OF SELF-INDUCED BIDIRECTIONAL WAVEGUIDES IN PHOTOREFRACTIVE MEDIA**

↖ Ph. Jander, J. Schröder, C. Denz, M. Petrovic,

M. Belic | Opt. Lett. 30 (2005) 750-752

**SECONDARY MODULATION INSTABILITY IN PARTIALLY COHERENT BEAMS** ↗ B. Gütlich, T. König,

C. Denz, K. Motzek, F. Kaiser | Opt. Commun.

255 (2005) 57-64

**COUNTERPROPAGATING DIPOLE-MODE VECTOR SOLITON** ↗ J. Schröder, Ph. Jander, C. Denz,

T. Richter, C. Motzek, F. Kaiser | Opt. Lett.

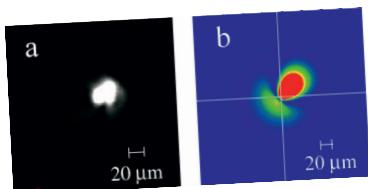
30 (2005) 1042-1044

**NONLINEAR PHOTONIC LATTICES IN ANISOTROPIC NONLOCAL SELF-FOCUSING MEDIA**

↖ A. S. Desyatnikov, D.N. Neshev, Yu.S. Kivshar, N. Sagemerten, D. Träger, J. Jägers, C. Denz, Y.V. Kartashov | Opt. Lett. 30 (2005) 869-871

# ZEITSTRAHL

## NICHTLINEARE PHOTONIK 2001-2011



› Gegenläufige Solitonen während einer Splitinstabilität im Experiment (links) und in numerischen Simulationen |

*Counterpropagating solitons during a split-up transition in experiments (left) and numerics*

### TWO-DIMENSIONAL COUNTERPROPAGATING

### SPATIAL SOLITONS IN PHOTOREFRACTIVE

**CRYSTALS** ↗ M. Petrovic, D. Jovic, M. Belic, J. Schröder, Ph. Jander, C. Denz | Phys. Rev. Lett. 95 (2005) 053901

### RELIABILITY OF ASSOCIATIVE RECALL BASED ON DATA MANIPULATIONS IN PHASE ENCODED VOLUME HOLOGRAPHIC STORAGE SYSTEMS

↗ G. Berger, M. Stumpe, M. Höhne, C. Denz | J. Opt. A 7 (2005) 567-577

### FORCING AND CONTROL OF LOCALIZED STATES IN OPTICAL SINGLE FEEDBACK SYSTEMS

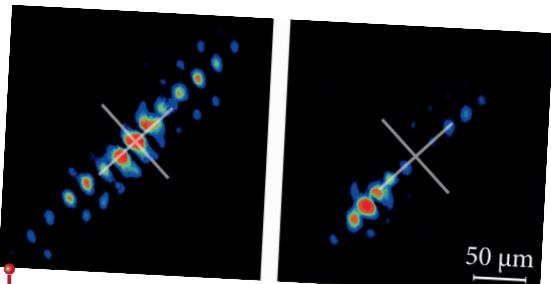
↗ B. Gütlich, H. Zimmermann, C. Denz, R. Neubecker, M. Kreuzer, T. Tschudi | Appl. Phys. B 81 (2005) 927-936

### DYNAMICS OF COUNTERPROPAGATING MULTIPOLE VECTOR SOLITONS

↗ D. Jovic, M. Petrovic, M. Belic, J. Schröder, Ph. Jander, C. Denz | Opt. Expr. 13 (2005) 10717-10728

### BEWEGUNGSDETEKTIERENDES MODULARES MIKROSKOPSYSTEM

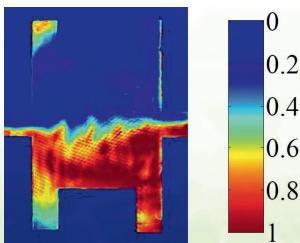
↗ F. Holtmann, V.V. Krishnamachari, O. Grothe, H. Deitmar, G. Berger, C. Denz | Deutsches Patentamt, DE 102006020737 (2006)



› Mobilität von zweidimensionalen Solitonen mit reduzierter Symmetrie in einem phototonischen Gitter | *Mobility of reduced-symmetry two-dimensional solitons in a photonic lattice*

### REDUCED-SYMMETRY TWO-DIMENSIONAL SOLITONS IN PHOTONIC LATTICES

↗ R. Fischer, D. Träger, D.N. Neshev, A.A. Sukhorukov, W. Krolikowski, C. Denz, Yu.S. Kivshar | Phys. Rev. Lett. 96 (2006) 023905



› Visualisierung von Mischungsvorgängen in Mikrolaboren durch Neuigkeitsfilterung | *Visualization of mixing in microlabs using a novelty filter*

### SELECTED PAPERS PRESENTED

AT THE 2005 SPRING MEETING  
OF THE QUANTUM OPTICS AND  
PHOTONICS SECTION OF THE  
GERMAN PHYSICAL SOCIETY  
↗ M. Lewenstein, C. Denz |  
Appl. Phys. B 82 (2), (2006)

### TWO-DIMENSIONAL SELF-TRAPPED NONLINEAR PHOTONIC LATTICES

↗ A.S. Desyatnikov, N. Sagemerten, R. Fischer, B. Terhalle, D. Träger, D.N. Neshev, A. Dreischuh, C. Denz, W. Krolikowski, Yu.S. Kivshar | Opt. Expr. 14 (2006) 2851-2863

### UNITARY MATRICES FOR PHASE-CODED HOLOGRAPHIC MEMORIES

↗ X. Zhang, G. Berger, M. Dietz, C. Denz | Opt. Lett. 31 (2006) 1047-1049

### GUIDING OF DYNAMICALLY MODULATED SIGNALS IN ARRAYS OF PHOTOREFRACTIVE SPATIAL SOLITONS

↗ D. Träger, N. Sagemerten, C. Denz | IEEE J. Sel. Topics Quant. Electr. 12 (2006) 383-387

2005 >

54 >

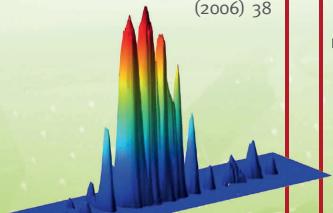
2006 >



STRUCTURE ANALYSIS OF TWO-DIMENSIONAL NONLINEAR SELF-TRAPPED PHOTONIC LATTICES IN ANISOTROPIC PHOTOREFRACTIVE MEDIA ↗ B. Terhalle, D. Träger, L. Tang, J. Imbrock, C. Denz | Phys. Rev. E 74 (2006) 057601

CROSS-TALK IN PHASE ENCODED VOLUME HOLOGRAPHIC MEMORIES EMPLOYING UNITARY MATRICES ↗ X. Zhang, G. Berger, M. Dietz, C. Denz | Appl. Phys. B 85 (2006) 575-579

MOLDING LIGHT IN TWO-DIMENSIONAL PHOTONIC LATTICES ↗ R. Fischer, D. Träger, D.N. Neshev, A.A. Sukhorukov, W. Krolikowski, C. Denz, Yu.S. Kivshar | Opt. Photon. News (Optics in 2006) 12 (2006) 38



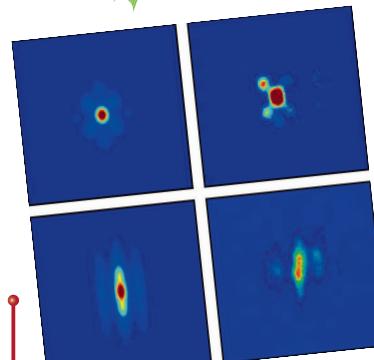
› Dreidimensionale Darstellung einer anisotropen selbststabilisierten Mode in einem phototischen Gitter | Three-dimensional image of an anisotropic self-trapped mode in a photonic lattice

OPTICALLY INDUCED NONLINEAR WAVE-GUIDES ↗ Ph. Jander and C. Denz | in "Optical Waveguides – From Theory to Applied Technologies", M. Calvo, V. Lakshminarayanan (Eds), Taylor & Francis Ltd. (2007), ISBN 978157446982

PATTERN CONTROL AND MODE INTERACTION IN A PHOTOREFRACTIVE SINGLE FEEDBACK SYSTEM ↗ Ph. Jander, C. Ripperda, C. Denz | J. Opt. Soc. Am. B 24 (2007) 553-558

MOTION-DETECTING MODULAR MICROSCOPE SYSTEM ↗ F. Holtmann, V.V. Krishnamachari, O. Grothe, H. Deitmar, G. Berger, C. Denz | Britisches Patentamt, Nr. EP2013654 (A2) (2007); Système de microscope modulaire de détection de mouvement, F. Holtmann, V.V. Krishnamachari, O. Grothe, H. Deitmar, G. Berger, C. Denz | Europäisches Patentamt, Nr. WO2007128433 (2007)

FROM PATTERN CONTROL TO SYNCHRONIZATION: CONTROL TECHNIQUES IN NONLINEAR OPTICAL FEEDBACK SYSTEMS ↗ B. Gütlich, C. Denz | in "Handbook of Chaos Control" Verlag: Wiley-Vch, 2007, ISBN 978-3527406050



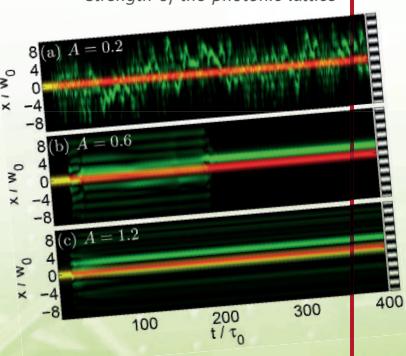
› Numerik (links) und Experiment (rechts) zu diskreten Solitonen in phototischen Diamant- (oben) und Quadrat-Gittern (unten) | Numerics (left) and experiment (right) of discrete solitons in diamond (top) and square (bottom) photonic lattices

ANISOTROPIC PHOTONIC LATTICES AND DISCRETE SOLITONS IN PHOTOREFRACTIVE MEDIA ↗ B. Terhalle, A.S. Desyatnikov, C. Bersch, D. Träger, L. Tang, J. Imbrock, Yu.S. Kivshar, C. Denz | Appl. Phys. B 86 (2007) 399-405

SELECTED PAPERS OF THE 2006 SPRING MEETING OF THE QUANTUM OPTICS AND PHOTONICS SECTION OF THE GERMAN PHYSICAL SOCIETY ↗ C. Denz, M. Lewenstein | Appl. Phys. B 86 (3) (2007)

STABILIZATION OF COUNTERPROPAGATING SOLITONS BY PHOTONIC LATTICES ↗ S. Koke, D. Träger, Ph. Jander, M. Chen, D.N. Neshev, W. Krolikowski, Yu.S. Kivshar, C. Denz | Opt. Expr. 15 (2007) 6279-6292

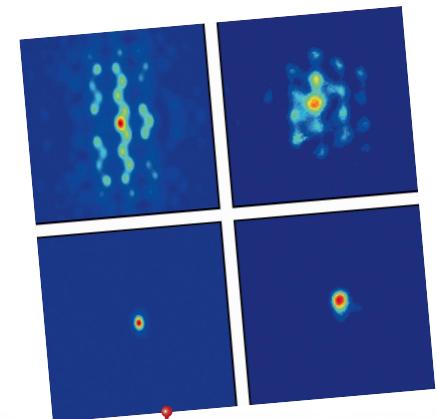
› Dynamik gegenläufiger Solitonen bei zunehmender Stärke des phototischen Gitters | Dynamics of counterpropagating solitons for increasing strength of the photonic lattice



DETECTION OF MICRO-ORGANISMIC FLOWS BY LINEAR AND NONLINEAR OPTICAL METHODS ↗ H. Petermeier, W. Kowalczyk, A. Delgado, C. Denz, F. Holtmann | Exp. Fluids 42 (2007) 611-623

# ZEITSTRAHL

NICHTLINEARE PHOTONIK 2001-2011

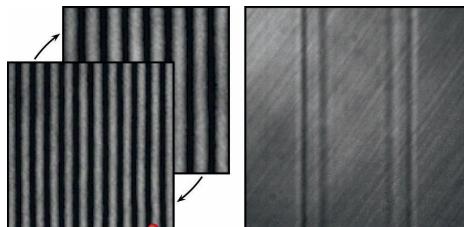


**DISCRETE AND DIPOLE-MODE GAP SOLITONS IN HIGHER-ORDER NONLINEAR PHOTONIC LATTICES**  
↳ P. Rose, T. Richter, B. Terhalle, J. Imbrock, F. Kaiser, C. Denz | Appl. Phys. B 89 (2007) 521-526

↳ Numerik (links) und Experiment (rechts) zur Entstehung eines diskreten Solitons in einem phototischen Dreiecks-gitter | *Numerics (left) and experiment (right) of discrete soliton formation in a triangular photonic lattice*

**DYNAMIC AND STATIC POSITION CONTROL OF OPTICAL FEEDBACK SOLTIONS**  
↳ B. Gütlich, H. Zimmermann, C. Cleff, C. Denz | Chaos 17 (2007) 037113

**GRADIENT INDUCED MOTION ON CONTROL OF DRIFTING SOLITARY STRUCTURES IN A NONLINEAR OPTICAL SINGLE FEEDBACK EXPERIMENT** ↳ C. Cleff, B. Gütlich, C. Denz | Phys. Rev. Lett. 100 (2008) 233902



↳ Multiplexen (links) und Brillouin-Zonen-Spektroskopie (rechts) eines multiperiodischen Gitters | *Multiplexing (left) and Brillouin zone spectroscopy (right) of a multiperiodic lattice*

**SYNCHRONIZATION OF SPATIOTEMPORAL COMPLEX STATES BY INCOHERENT COUPLING**  
↳ K. Havermann, B. Gütlich, C. Denz | Journ. Europ. Opt. Soc. 3 (2008) 08001

**OPTICALLY-INDUCED PHOTONIC SUPERLATTICES BY HOLOGRAPHIC MULTIPLEXING** ↳ P. Rose, B. Terhalle, J. Imbrock, C. Denz | J. Phys. D: Appl. Phys. 41 (2008) 224004

**HYBRID MULTINARY MODULATION CODES FOR PAGE-ORIENTED HOLOGRAPHIC DATA STORAGE** ↳ G. Berger, M. Dietz, C. Denz | J. Opt. A: Pure Appl. Opt. 10 (2008) 115305

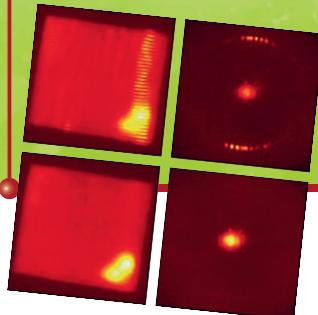
**ASSOCIATIVE DATA SEARCH IN PHASE-ENCODED VOLUME HOLOGRAPHIC STORAGE SYSTEMS**  
↳ G. Berger, M. Dietz, N. Brauckmann, C. Denz | Appl. Phys. B 92 (2008) 145-152

**HOLOGRAPHIC DATA STORAGE IN PHOTOREFRACTIVE BISMUTH TELLURITE**, W. Horn, I. Földvári, C. Denz | Journ. Phys. D: Appl. Phys. 41 (2008) 224006

**OBSERVATION OF MULTIVORTEX SOLITONS IN PHOTONIC LATTICES**  
↳ B. Terhalle, T. Richter, A.S. Desyatnikov, D.N. Neshev, W. Krolikowski, F. Kaiser, C. Denz, Yu.S. Kivshar | Phys. Rev. Lett. 101 (2008) 013903

**CONTROL OF BROAD-AREA VERTICAL-CAVITY SURFACE EMITTING LASER EMISSION BY OPTICALLY INDUCED PHOTONIC CRYSTALS** ↳ B. Terhalle, N. Radwell, P. Rose, C. Denz, T. Ackemann | Appl. Phys. Lett. 93 (2008) 151114

↳ Ausgang eines VCSELs ohne (oben) und mit (unten) Emissionskontrolle durch einen optisch induzierten phototischen Kristall | *Output of a VCSEL without (top) and with (bottom) emission control via an optically induced photonic crystal*



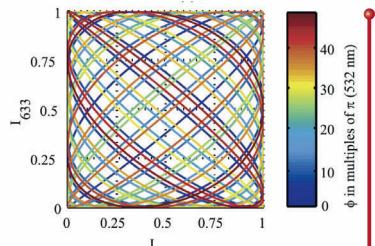
2007 >

2008 >

56 >



› Erweiterung des eindeutigen Phasenmessbereichs durch Zwei-Wellenlängentechnik | Extension of the uniqueness of the phase transfer function by two-wavelengths techniques



#### LABEL-FREE ANALYSIS OF MICROFLUIDIC MIXING PROCESSES BY DYNAMIC PHASE CONTRAST MICROSCOPY

◀ F. Holtmann, M. Eversloh, C. Denz | J. Opt. A: Pure Appl. Opt. 11 (2009) 034014

FULL-FIELD PARTICLE VELOCIMETRY WITH A PHOTOREFRACTIVE OPTICAL NOVELTY FILTER ▶ M. Woerdemann, F. Holtmann, C. Denz | Appl. Phys. Lett. 93 (2008) 021108

TIME-RESOLVED DETECTION OF MICROFLUIDIC MIXING PROCESSES BY LABELFREE DYNAMIC PHASE CONTRAST MICROSCOPY  
◀ F. Holtmann, M. Eversloh, M. Woerdemann, C. Denz | Visualization in Fluid Mechanics Eds. J.P. Prenel et al., Curran Ass. Inc.

MEASUREMENT OF THREE-DIMENSIONAL VELOCITY FIELDS IN MICROFLUIDICS BY STEREOSCOPIC DYNAMIC PHASE CONTRAST MICROSCOPY  
◀ M. Oevermann, F. Holtmann, C. Denz | Nonlinear Optics: Materials, Devices and Spatio-Temporal Effects, European Optical Society

#### SPECIAL ISSUE "NONLINEAR OPTICAL MANIPULATION, PATTERNING AND CONTROL IN NANO- AND MICRO-SCALE SYSTEMS"

◀ C. Denz, F. Simoni | J. Opt. A: Pure Appl. Opt. 11 (3) (2009)

#### HOLOGRAPHIC PHASE CONTRAST FOR DYNAMIC MULTIPLE-BEAM OPTICAL TWEEZERS

◀ M. Woerdemann, F. Holtmann, C. Denz | J. Opt. A: Pure Appl. Opt. 11 (2009) 034010

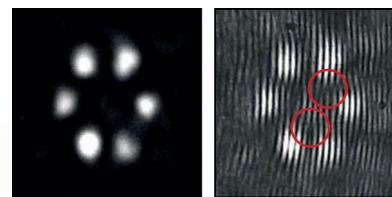
#### NONLINEAR DYNAMIC PHASE CONTRAST MICROSCOPY FOR MICROFLOW ANALYSIS

◀ F. Holtmann, M. Woerdemann, C. Denz | in "Notes on Numerical Fluid Mechanics and Multidisciplinary Design – Imaging Measurement Methods for Flow Analysis", Vol 106, 2009,

2009 >

#### OBSERVATION OF DOUBLE CHARGE DISCRETE VORTEX SOLITONS IN HEXAGONAL PHOTONIC LATTICES

◀ B. Terhalte, T. Richter, K. J. Law, D. Göries, P. Rose, T. J. Alexander, P. Kevrekidis, A. S. Desyatnikov, W. Krolikowski, F. Kaiser, C. Denz, Yu. S. Kivshar | Phys. Rev. A 79 (2009) 043821



› Experimentell realisiertes diskretes Vortex-Soliton mit zweifacher Ladung in einem gestreckten Hexagon-Gitter | Experimentally realized discrete double-charge vortex soliton in a stretched hexagonal lattice

#### SPATIAL PHOTOREFRACTIVE SOLITONS WITH PICOSECOND LASER PULSES

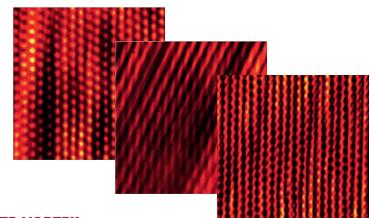
◀ J. Imbrock, C. Heese, C. Denz | Appl. Phys. B 95 (2009) 261-268

PHOTOREFRACTIVE MATERIALS, EFFECTS AND DEVICES: CONTROL OF LIGHT AND MATTER ▶ C. Denz, K. Buse | Universitätsdruckerei Universität Bonn, 2009

#### DYNAMIC PHASE-CONTRAST STEREOSCOPY FOR MICROFLOW VELOCIMETRY

◀ F. Holtmann, M. Oevermann, C. Denz | Appl. Phys. B 95 (2009) 633-636

TWO-STEP HOLOGRAPHIC RECORDING IN PHOTOREFRACTIVE LITHIUM NIOBATE CRYSTALS USING ULTRASHORT LASER PULSES ▶ C. Nölleke, J. Imbrock, C. Denz | Appl. Phys. B 95 (2009) 391-397



› Seitenansichten eines 3D photonischen Gitters (von oben: x-y, x-z und y-z-Ebene) | Side views of a 3D photonic lattices (from top: x-y, y-z, and y-z plane)

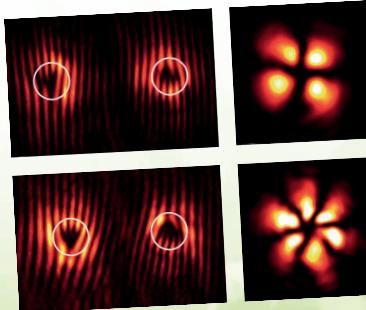
THREE-DIMENSIONAL OPTICALLY INDUCED RECONFIGURABLE PHOTOREFRACTIVE NONLINEAR PHOTONIC LATTICES  
◀ J. Xavier, P. Rose, B. Terhalte, J. Joseph, C. Denz | Opt. Lett. 34 (2009) 2625-2627

# ZEITSTRAHL

NICHTLINEARE PHOTONIK 2001-2011

**COMPLEX NONLINEAR PHOTONIC LATTICES: FROM INSTABILITIES TO CONTROL** ↗ J. Imbrock, B. Terhalle, P. Rose,

Ph. Jander, S. Koke, C. Denz, in "Nonlinearities in Periodic Structures and Metamaterials", Eds. C. Denz. S. Flach, Yu. S. Kivshar | Springer Series in Optical Sciences 150, Springer Verlag (2010)



↗ Interferenz eines Vortex der Ladung 2 (oben) und 3, jeweils bei normaler Propagation (links), Phasenkonjugation (Mitte), oder bei Überlagerung (rechts) |  
Interference of a vortex of charge 2 (upper row), and

3, in normal propagation (left), phase conjugated (middle), and superposition of both (right)

**SELF-PUMPED PHASE CONJUGATION OF LIGHT BEAMS CARRYING ORBITAL ANGULAR MOMENTUM**

↖ M. Woerdemann, C. Alpmann, C. Denz |  
Opt. Expr. 17 (2009) 22791-22799

**RECONFIGURABLE OPTICALLY-INDUCED QUASICRYSTALLOGRAPHIC THREE-DIMENSIONAL COMPLEX NONLINEAR PHOTONIC LATTICE STRUCTURES**

↖ J. Xavier, M. Boguslawski, P. Rose, J. Joseph, C. Denz |

Adv. Mater. 22 (2010) 356-360

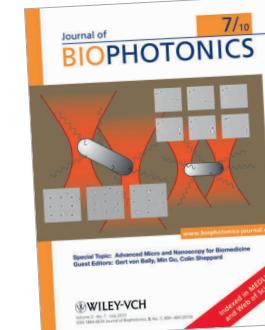


**ANISOTROPY-CONTROLLED TOPOLOGICAL STABILITY OF DISCRETE VORTEX SOLITONS IN OPTICALLY INDUCED PHOTONIC LATTICES**

↖ B. Terhalle, D. Göries, T. Richter, P. Rose, A.S. Desyatnikov, F. Kaiser, C. Denz | Opt. Lett. 35 (2010)

604 -606

**DYNAMICS AND NONLINEAR LIGHT PROPAGATION IN COMPLEX PHOTONIC LATTICES** ↗ B. Terhalle, P. Rose, D. Göries, J. Imbrock, C. Denz, in "Nonlinear Dynamics of Nanosystems", eds. G Radons, B. Rumpf, H.-G. Schuster | Wiley Verlag (2010)



**FULL 3D TRANSLATIONAL AND ROTATIONAL OPTICAL CONTROL OF MULTIPLE ROD-SHAPED BACTERIA**

↖ F. Hörmann, M. Woerdemann, S. Müller, B. Maier, C. Denz |

J. Biophoton. 3 (2010) 468-475

**BOUNDARY-INDUCED LOCALIZED STRUCTURES IN A NONLINEAR OPTICAL FEEDBACK EXPERIMENT**

↖ M. Ayoub, F. Papoff, G.L. Oppo, C. Denz | Europ. Phys. Journ. D 59 (2010)

133–137

**THREE-DIMENSIONAL DATA ACQUISITION BY DIGITAL CORRELATION OF PROJECTED SPECKLE PATTERNS** ↗ M. Dekiff, Ph. Berssenbrügge, B. Kemper, C. Denz, D. Dirksen |

Appl. Phys. B 99 (2010) 449-456

**DYNAMIC AND REVERSIBLE ORGANIZATION OF ZEOLITE L CRYSTALS INDUCED BY HOLOGRAPHIC OPTICAL TWEEZERS**

↖ M. Woerdemann, S. Gläsener, F. Hörmann, A. Devaux, L. De Cola, C. Denz | Adv. Mater. 22, (2010)

4176-4179

**TWO-DIMENSIONAL DIELECTROPHORETIC PARTICLE TRAPPING IN A HYBRID CRYSTAL/PDMS-SYSTEM** ↗ M. Esseling, F. Holtmann, M. Woerdemann, C. Denz | Opt. Expr. 18 (2010)

17404-17411

**DYNAMIC AND REVERSIBLE ORGANIZATION OF ZEOLITE L CRYSTALS INDUCED BY HOLOGRAPHIC OPTICAL TWEEZERS** ↗ M. Woerdemann, S. Gläsener, F. Hörmann, A. Devaux, L. De Cola, C. Denz |

Adv. Mater. 22, (2010)

4176-4179

2009 >

2010 >

58 >



**DYNAMIC MULTIPLE-BEAM COUNTER-PROPAGATING**

**OPTICAL TRAPS USING OPTICAL PHASE-COJUGATION**

↳ M. Woerdemann, K. Berghoff, C. Denz |

Opt. Expr. 18 (2010) 22348-22357



**MANAGING HIERARCHICAL SUPRAMOLECULAR ORGANIZATION WITH HOLOGRAPHIC OPTICAL**

**TWEEZERS** ↳ M. Woerdemann, A. Devaux,

L. De Cola, C. Denz | Opt. & Photon. News 21 (2010) 40

**SPECIAL ISSUE ON SLOW LIGHT** ↳ R. Boyd, O. Hess, C. Denz, E. Paspalakis (Eds.) |

J. Opt. 12 (2010),

**SLOW- AND FAST LIGHT IN PHOTO-**

**REFRACTIVE SBN:60** ↳ W. Horn,

J. von Bassewitz, C. Denz | J. Opt.

12 (2010) 104011

**COMPENSATION OF SPATIAL INHOMOGENEITIES IN A CAVITY**

**SOLITON LASER USING A SPATIAL**

**LIGHT MODULATOR** ↳ N. Radwell,

P. Rose, C. Cleff, C. Denz,

T. Ackemann | Opt. Expr. 18 (2010) 23121-23132

**DYNAMIC CONTROL OF LOCALIZED**

**STRUCTURES IN A NONLINEAR**

**FEEDBACK EXPERIMENT** ↳ M. Ayoub,

B. Gütlich, C. Denz, F. Papoff,

G.-L. Oppo, W. J. Firth, in "Localized States in Physics: Solitons and Patterns", Eds. O. Descalzi, M. Clerc, S. Residori, G. Assanto. (Eds.) | Springer (2011)

**COUNTERPROPAGATING**

**OPTICAL BEAMS AND SOLITONS**

↳ M. S. Petrovic, M. R. Belic,

C. Denz, Y. S. Kivshar | Laser & Photonics Rev. 5 (2011) 214-233

**MATHIEU BEAMS AS VERSATILE**

**LIGHT MOULDS FOR 3D MICRO**

**PARTICLE ASSEMBLIES**

↳ C. Alpmann, R. Bowman,

M. Woerdemann, M. Padgett, C. Denz | Opt. Expr. 18 (2010) 26084-26091

**DEPTH-RESOLVED VELOCIMETRY OF HAGEN-POISEUILLE AND ELECTRO-OSMOTIC FLOW USING DYNAMIC PHASE-CONTRAST MICROSCOPY** ↳ M. Esseling, F. Holtmann, M. Woerdemann, C. Denz | Appl. Opt. 49 (2010) 6030-6038

**SYSTEMATIC APPROACH TO COMPLEX PERIODIC VORTEX**

**AND HELIX LATTICES** ↳ J. Becker, P. Rose, M. Boguslawski, C. Denz |

Opt. Expr. 19 (2011) 9848-9862

**ANDERSON LOCALIZATION OF LIGHT NEAR BOUNDARIES**

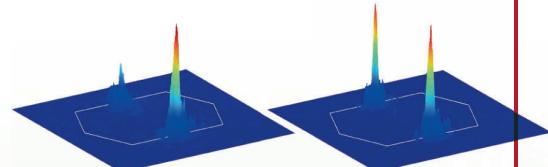
**OF DISORDERED PHOTONIC LATTICES** ↳ D. M. Jovic,

Y. S. Kivshar, C. Denz, M. S. Belic | Phys. Rev. A 83 (2011) 033813

**DYNAMIC DIFFRACTION AND INTERBAND TRANSITIONS IN TWO-DIMENSIONAL**

**PHOTONIC LATTICES** ↳ B. Terhalte, A. S. Desyatnikov, D. N. Neshev,

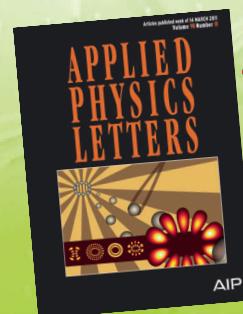
W. Krolikowski, C. Denz, Y. S. Kivshar | Phys. Rev. Lett. 106 (2011) 083902



► Experimentelle Fernfeld-Intensitätsverteilungen von Oszillationen der Zweizustands-Pendellösung in einem gestreckten Hexagongitter |  
Experimental far-field intensity distributions of two-level Pendellösung oscillations in a stretched hexagonal lattice

**NONDIFFRACTING KAGOME LATTICE** ↳ M. Boguslawski,

P. Rose, C. Denz | Appl. Phys. Lett. 98 (2011) 061111



**OPTICAL ASSEMBLY OF MICRO PARTICLES INTO HIGHLY ORDERED STRUCTURES USING INCE-GAUSSIAN BEAMS**

↳ M. Woerdemann, C. Alpmann, C. Denz | Appl. Phys. Lett. 98 (2011) 111101

**2011 >**



60 > |



## LEHRE UND ÖFFENTLICHKEIT TEACHING AND OUTREACH

Löten einer Blinklichtschaltung | Soldering a flashlight

## MExLab

### MÜNSTERS EXPERIMENTIERLABOR

Heranwachsende begeistern sich für physikalische Themen, wenn sie durch selbstbestimmtes Experimentieren die eigene Kompetenz in naturwissenschaftlich-technischen Zusammenhängen erfahren. Zumeist verhindern äußere Randbedingungen eine derartige Umsetzung in Schulen, während universitäre Forschungseinrichtungen durchaus Schüler/innen eine solche Lernatmosphäre bieten können.

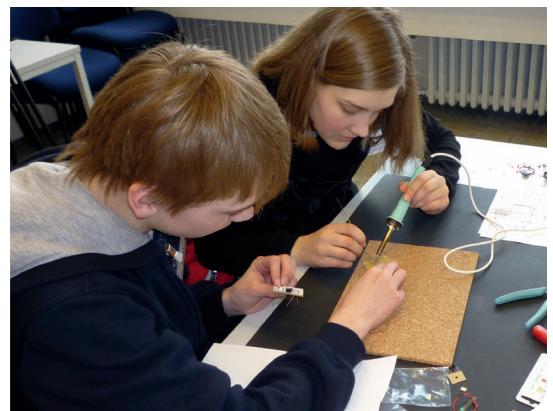
Deshalb war es seit der Gründung der Arbeitsgruppe unsere Vision, durch spielerisches Erleben von naturwissenschaftlichen Vorgängen Schüler/innen neue Erfahrungshorizonte zu eröffnen und sie damit für unsere physikalischen Forschungsthemen so zu begeistern, dass derartige Themen sie auch zukünftig beschäftigen werden. Insbesondere Mädchen sollten durch direkte, praktische Auseinandersetzung mit physikalischen Phänomenen einen anderen, positiven Zugang zur naturwissenschaftlich-technischen Welt erhalten. Dank des Frauenförderpreises und der Unterstützung durch die Freunde und Förderer der WWU konnten wir in diesem Sinne 2007 Münsters Experimentierlabor (MExLab Physik) eröffnen. Seitdem bietet dieser außerschulische Lernort sowohl eine einzigartige Dauerausstellung (MExLab Experimentum) mit zahlreichen interaktiven Experimentierstationen, die direkt den Bezug zu derzeitigen Forschungsschwerpunkten des Fachbereichs herstellen, als auch verschiedene Workshops zu aktuellen Themen aus Mathematik, Informatik, Naturwissenschaft und Technik (MINT) für weiterführende Schulen. Zusätzlich veranstalten wir Ferienkurse sowie Workshops als Events für ein breites Publikum.

### MIT MINT EXPERIMENTIEREN

Auch in anderen Bereichen der WWU hat sich inzwischen die Erkenntnis durchgesetzt, wie wichtig solche Projekte sind und es wurden zahlreiche ähnliche Angebote ins Leben gerufen. Um effektiv den Nachwuchs für MINT begeistern zu können, haben sich im Rahmen der Gemeinschaftsoffensive „Zukunft durch



Experimente mit dem Solarkocher |  
Experimenting with a solar boiler



Innovation“ (zdi) des Landes Nordrhein-Westfalen 2011 die bereits etablierten Experimentierlabore der WWU zum neuen Schülerlabor MExLab.wissen.leben. experiMINte zusammengeschlossen. Es baut auf drei bisher erfolgreich etablierten Säulen auf: Förderung des weiblichen Nachwuchses (MExLab Girls), Workshops zu innovativen Forschungsthemen (MExLab Workshops) und Ausbau der Dauerausstellung (MExLab Experimentum). Zusätzlich werden wir zukünftig durch MExLab Education sowie MExLab Digital Schule und Unterricht noch umfassender fördern. MExLab Education ermöglicht es Lehrkräften nach intensivem Austausch mit Wissenschaftler/innen aktuelle Forschungsthemen direkt in den Unterricht zu integrieren. Schließlich unterstützt MExLab Digital Lehrkräfte und Schüler/innen bei der Auseinandersetzung mit naturwissenschaftlichen Fragestellungen durch virtuelle Experimente sowie durch vertiefende Materialien zur intensiven Vor- und Nachbereitung der Workshops. Über 700 Besucher/innen im Jahr 2010 bestätigen den Erfolg des MExLab-Konzeptes. Ein richtungsweisender Schritt zur Verfestigung von MExLab besteht im Bau eines neuen Gebäudes, welches zukünftig noch mehr Raum zum Forschen in kreativer Atmosphäre bieten wird.



## MExLab

### MÜNSTER'S HANDS-ON SCIENCE LAB

*Self-determined experimentation inspires young scholars for topics in physics by experiencing their scientific abilities. In school this concept is often restrained by the given education setting, whereas research facilities of a university are able to provide a supporting scientific atmosphere.*

*Therefore, since the foundation of our research group, it has been our vision to expand scholars horizon of experience by hands-on experiments with scientific background. In order to establish a long-lasting interest in physics of junior and high school students, we need to create enthusiasm and awareness of the fascination of science and research. Many studies have shown that alternative, playful approaches that allow to discover scientific phenomena by oneself facilitates another, more positive access to the scientific, technical world. Based on substantial support by the award of the equal opportunity office, and an endowment by the friends of our university we were able to open the first hands-on science lab for pupils in Münster, Münsters Experimentierlabor (MExLab Physik), in 2007. Since then, this external faculty offers a unique hands-on exhibition (MExLab Experimentum), including a variety of interactive experimental displays, as well as a remarkable number of workshops on up to date topics ranging from mathematics, and informatics to natural and technical sciences (MINT). MExLab Physik addresses scholars from the 5th to 13th grade. For younger students, holiday*

*workshops are arranged, representing highlights of many students holidays.*

### EXPERIMENTING WITH MINT

*Recently, many MINT faculties have become aware of the lack of interest of junior and high school students in these fields, and thus more external faculties have been established. For a more effective recruiting of young academics in MINT, in 2011, the fusion of student labs of the WWU with MExLab Physik to MExLab wissen.leben.experiMINte was initiated, and subsequently supported by the county government of North Rhine-Westphalia in the frame of the initiative "Zukunft durch Innovation" (zdi). The resulting new science lab MExLab is based on our successfully established pillars: the encouragement of female scholars (MExLab Girls), workshops on cutting-edge research, and the expansion of MExLab Experimentum. Additionally, schools can profit from this newly established science lab by two new pillars: MExLab Education allows teachers to integrate up to date research topics in class based on an extensive exchange with researchers. Finally, MExLab Digital enables teachers and students to address scientific questions by virtual experiments as well as by tutorials even if they can not access locally our science lab. The success of the MExLab concept is confirmed by more than 700 visitors in 2010. A milestone to long-term sustainability of MExLab is the construction of a new building providing even more space for students to experience, exploit and have fun in the fields of MINT.*



Experimente zur Farbstoffsolarzelle |  
Experiments with a dye based solar cell

### Light up your life

#### FÜR GIRLS MIT GRIPS

Trotz intensiver Förderprogramme der letzten Jahre sind junge Frauen in den Naturwissenschaften immer noch deutlich unterrepräsentiert. Auch im Fachbereich Physik überwiegt trotz einer positiven Tendenz der männliche Anteil, zurzeit sind nur 18% der Studierenden Frauen. Weiterhin weiblichen wissenschaftlichen Nachwuchs für den MINT-Bereich zu motivieren, ist für unsere Arbeitsgruppe stets ein wichtiges Anliegen gewesen.

Schülerinnen bei einer Tintenanalyse | Girls analyzing ink

Im Rahmen von Aktivitäten wie dem Girls'Day oder Betriebspraktika wird besonderer Wert darauf gelegt, Mädchen über ein selbständiges Forschen einen möglichst authentischen und lebensweltbezogenen Zugang zu den Naturwissenschaften zu ermöglichen. Als das MExLab Physik im Jahre 2008 dem Aufruf „Frauen an die Spitze“ des Bundesministeriums für Bildung und Forschung mit der neuen Initiative „Light up your life“ folgte, entsprach es daher einem persönlichen Anliegen der Arbeitsgruppe.



„Light up your life – Für Girls mit Grips“ ist eine innovative und forschungsnahe Erlebnisplattform zur Förderung des Interesses von Mädchen an naturwissenschaftlich-technischen Fächern von der 8. bis 10. Jahrgangsstufe. Über einen Zeitraum von drei Jahren ermöglicht dieses Projekt den 175 Teilnehmerinnen einen nachhaltigen Perspektivwechsel ihrer Einstellung zu Forschung und Berufsfeldern im MINT-Bereich: Die Mädchen lernen im Verlauf ihrer gesamten Pubertätsphase in Form von experimentellen Workshops, Exkursionen sowie einer Webcommunity altersgerecht naturwissenschaftlich-technische Themen über das



interdisziplinäre Schwerpunktthema Licht kennen. Hier bietet sich für die Arbeitsgruppe „Nichtlineare Photonik“ ein besonderer Anknüpfungspunkt, die das Team um „Light up your life“ tatkräftig mit Materialien, Laborführungen, Anschauungsobjekten und dem Bezug zur aktuellsten Forschung unterstützt. Die Forschungsthemen der optischen Technologien und der Photonik werden – angepasst auf den schulischen Entwicklungsstand – in experimentellen Workshops durch eigenständige, kreative Beteiligung direkt erlebt.

#### BERUFE MIT LICHT: LIGHT@WORK

Wissenschaftlerinnen der Arbeitsgruppe helfen als altersnahe weibliche Vorbilder aktiv bei der Betreuung der Mädchen mit. Diese Unterstützung ist für das Projekt an der Schnittstelle von universitärer Wissenschaft, außerschulischem Lernort, Schulen und Firmen von zentraler Bedeutung. Des Weiteren bilden Exkursionen zu Forschungseinrichtungen und Firmen eine weitere wichtige Säule des Projekts. Unter dem Motto „Light@work“ erleben die Mädchen Wissenschaftlerinnen bei der Arbeit, wobei sie so nicht nur in persönlichen Kontakt mit Forscherinnen treten, sondern auch neue, interessante Berufsfelder kennenlernen, die sie aktiv in ihre Zukunftsplanung mit einbauen können. Dass dieses Projekt ein Erfolg ist, zeigt sich nicht nur in der anhaltenden Begeisterung der Teilnehmerinnen und in der begleitenden Studie, sondern auch durch die Auszeichnung als „Ausgewählter Ort 2011“ beim bundesweiten Wettbewerb „365 Orte im Land der Ideen“.

Deutschland  
Land der Ideen

Ausgewählter Ort 2011



## Light up your life FOR SAVVY GIRLS

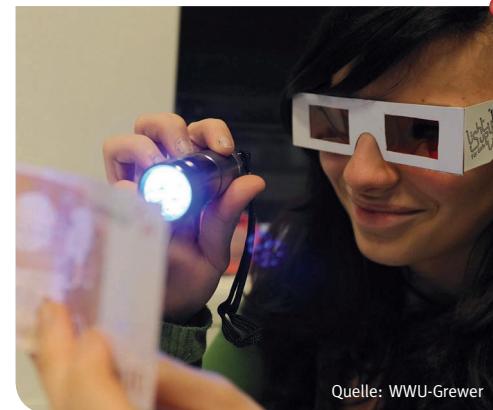
*Despite of many support programs in the past years, women are still a underrepresented in natural sciences. This is especially true for physics, where male students are predominant – only 18% of the students are female. Therefore, encouraging female academics to become interested in so-called MINT fields (MINT stands for Mathematics, Information Science, Natural Sciences and Technologies) has always been a central topic in our research group.*

*< In the framework of measures like Girls'Day or internships, it is a keystone to provide female scholars an authentic access to natural sciences by self-determined approaches. We are participating in the project field "Frauen an die Spitze" of the German Federal Ministry of Education and Research with the new initiative "Light up your life". MExLab Physik complied with a personal concern of the research group.*

*"Light up your life – for savvy girls" is an innovative and research-orientated platform to promote the interest of girls for scientific, technical subjects from the 8th to the 10th grade in junior high schools. Via a three years enduring mentoring, 175 participants experience a sustainable change of perspective on research and profession in MINT. During the phase of adolescence, the girls explore the interdisciplinary topic of "light" in experimental workshops, excursions, and a web community.*

*The vision of light as a natural source of energy, an arts object as well as a highly innovative technical tool is connecting these activities to our research in nonlinear photonics. Together, scientists from the Nonlinear Photonics team and the project team members of "Light up your life" develop workshops with strong connection to actual research topics, exchange ideas for exhibitions, and hands-on devices. It is this fusion of hot scientific topics with novel, self-determined and creativity-boosting teaching concepts especially adapted to the academic stage of the girls that make this project so attractive for female scholars to participate.*

Echtheitsprüfung von Geldscheinen mit Hilfe von Licht I  
Authentication of bank notes by light



Quelle: WWU-Grewer



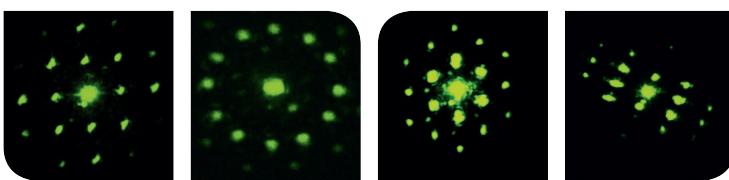
### CAREER WITH LIGHT@WORK

*Female scientists of the research group act as role models, and are integrated into the project by mentoring the girls. This support is crucial for the project which benefits from the cooperation of science, external faculty, schools, and industrial companies. A further supporting pillar is based on excursions to research institutes and industrial companies, the so-called "Light@work" units. Here, the girls have the opportunity to meet researchers at work, and to learn about professions in optic and photonics in real settings. This allows the girls to consider future career option in an economically important technical field which they previously typically did not consider as a field of attractive future profession.*

*The success of this project is not only visible in the enduring enthusiasm of the participants and the results of the accompanying study, but is also reflected in the award "Ausgewählter Ort 2011" through the national competition "365 Orte im Land der Ideen" of the German Government.*

Die Photonik gilt als eine der zukunftsträchtigsten Gebiete zur Informationsübertragung. Die Vision, vollständig optische Informationsübertragungs-systeme zu realisieren, verlangt jedoch die Kontrolle von Licht in all seinen Eigenschaften. Dazu sind nichtlineare optische Effekte von großer Bedeutung – nichtlineare Physik spielt in der Photonik daher eine herausgehobene Rolle.

Musterbildung in einem optischen Rückkopplungssystem | Pattern formation in an optical feedback system



## Nichtlineare Physik in der Photonik

### DAS GANZE IST MEHR ALS DIE SUMME SEINER TEILE

< Nichtlinearitäten sind für die gesamten Naturwissenschaften und die Mathematik, aber auch für zahlreiche aktuelle Anwendungsfelder in Informations- und Nanotechnologie, Materialwissenschaften, Biologie und Medizin von außerordentlicher Bedeutung. Auch in Börsenkursen, Straßenverkehr oder der Dynamik in Gruppen findet man nichtlineares und chaotisches Verhalten. So unterschiedlich diese Erscheinungen sind, sie entstehen aus wenigen Grundregeln der Selbstorganisation – aus einfachen Einzelteilen entstehen fraktale Formen, regelmäßige oder chaotische Muster. Die Entstehung solcher Strukturen basiert auf dem Zusammenwirken einzelner Elemente in einem komplexen System und erzeugt neuartige, sogenannte emergente Eigenschaften – Eigenschaften des Ganzen, die mehr sind als die Summe seiner Teile. Unter dem Begriff Nonlinear Science gehören solche komplexen nichtlinearen Phänomene daher zu den wegweisenden Querschnittsthemen aktueller Forschung.

Sechs Fachbereiche haben sich in diesem Center zusammengeschlossen, um die Natur nichtlinearer Systeme gemeinsam in interdisziplinären Programmen zu untersuchen. Darüber hinaus dient CeNoS als Forum für den Dialog zwischen Geistes- und Naturwissenschaften im Bereich Nonlinear Science. Das CeNoS hat jedoch auch eine starke anwendungsorientierte Komponente: nichtlineare Phänomene können für neue Anwendungskonzepte gewinnbringend genutzt werden.

### NONLINEAR SCIENCE IN DER PHOTONIK

Zu den fundamental nichtlinearen Phänomenen in der Photonik gehören der Laser oder nichtlineare Licht-Material-Wechselwirkungen. Unsere Forschungsaktivitäten im CeNoS sind daher zentriert um Fragestellungen, wie mit Hilfe nichtlinearer Phänomene, deren Verständnis, Kontrolle und Steuerung, optische Rückkopplungssysteme für komplexe Datenübertragungsaufgaben und Anwendungen in Biologie und Medizin realisiert werden können. Wir „zähmen“ mit unseren Ansätzen das Chaos, so dass Licht maßgeschneidert für neuartige Anwendungen eingesetzt werden kann. Beispielhaft sei hier der Forschungsbereich der sogenannten Solitonen genannt. Diese unveränderlichen, nichtlinearen Wellen treten in optischen Systemen ebenso auf wie in der Hydrodynamik oder Astrophysik. Sie können als nichtlineare Wellen im Wasser als Tsunamis furchtbare Energien freisetzen und zu schrecklichen Katastrophen führen. Andererseits versprechen sie als nichtlineare Lichtwellen in der Optik die Realisierung innovativer photischer Kommunikationselemente.

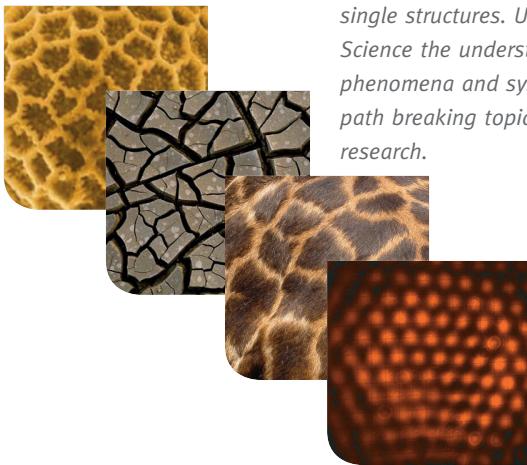
### DAS CENTER FOR NONLINEAR SCIENCE

An der Universität Münster werden diese Themen in vielen Fachbereichen bearbeitet. Das Center for Nonlinear Science (CeNoS) versteht sich als Dach für die grundlagenorientierte Forschung und Lehre an Fragestellungen zu komplexen nichtlinearen Systemen.

Das erste hydrodynamische Soliton, ein Tsunami (Zeichnung K. Hokusai).  
| The first hydrodynamic soliton, a tsunami (paint by K. Hokusai).



*Photonics is considered as one of the most promising future techniques for information processing. The vision to realize all-optical information processing systems however requires the control of light in all its features. For this purpose, nonlinear effects play an important role – nonlinear physics in photonics is therefore of high actual relevance.*



## THE CENTER FOR NONLINEAR SCIENCE

At the University of Münster, topics of nonlinear science are at the center of many faculty research

Nonlinearities are of utmost importance for all natural sciences as well as mathematics, but also for many actual applications fields as information or nanotechnology, material science, biology and medicine. Also, stock exchange markets, traffic jams, or dynamics of social groups show defined nonlinear and chaotic behavior. Although being rather different, all nonlinear phenomena in these systems arise due to the same basic principles of self-organization – fractal, ordered or chaotic patterns appear due to the interaction of simple basic elements. The emergence of these structures is based on the interaction of single elements in a complex system that are a feature of the whole – and are more than the simple single structures. Under the name of Nonlinear Science the understanding of these complex nonlinear phenomena and systems belong to one of the most path breaking topics of actual interdisciplinary research.

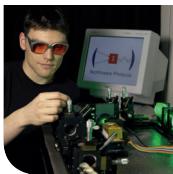
Musterbildung in der Natur: Hexagonale Muster in Pollenkörnern, Erdkrusten, Giraffenfellern und optisches Muster | Pattern formation in nature: hexagonal patterns in pollen grains, mud cracks, giraffe coat, and an optical pattern

topics. The Center for Nonlinear Science (CeNoS) is focusing these activities under a single roof in order to promote research and education in the field of complex nonlinear systems. Six faculties with around 35 groups have been joined to tackle questions of common principles of nonlinear systems in common interdisciplinary research programs. Moreover, CeNoS offers a plenum for discussion between natural sciences and humanities in the field of nonlinear science. CeNoS also has a focus on applications: nonlinear phenomena can be exploited to realize novel concepts of applications in fields as nanotechnology, photonics, biotechnology or medicine.

## NONLINEAR SCIENCE IN PHOTONICS

Among the fundamental nonlinear phenomena in photonics, lasers and nonlinear light-matter interaction are important fields for applications. Our activities in CeNoS are therefore centered around the question, how to realize novel systems for optical information processing or biomedical tools by understanding and controlling nonlinear phenomena by feedback. We are “taming” chaos in order to tailor light for novel applications. As an example let's consider the field of so-called solitons. These nonlinear waves that do not change during propagation are appearing in optics as well as e.g. in hydrodynamics or in astrophysics. As nonlinear water waves, they can lead to frightening and disastrous phenomena as tsunamis, whereas as nonlinear light waves, they can promise the realization of novel innovative photonic communication elements.

Lehre in Nichtlinearer Photonik macht Spaß!  
| Education in Nonlinear Photonics is fun!



**Das Humboldt'sche Ideal der ganzheitlichen Lehre, orientiert am individuellen Bildungsstand und unter Verbindung von Forschung und Lehre, ist uns in der Arbeitsgruppe Nichtlineare Photonik seit Beginn ein großes Anliegen. Unsere Vorlesungen, Übungen, Seminare und Praktika sind daher geprägt von forschungsorientierter Lehre und dem Lernen an aktuellen Forschungsthemen.**

*Humboldt's principle of integrating research into teaching oriented at the individual level of knowledge of students is a goal of the Nonlinear Photonics group since its starting time. Our lectures, exercises, seminars and practical work are therefore governed by research-driven education and learning on actual research topics.*

## Studium und Lehre

### FORSCHUNG IN DIE LEHRE INTEGRIEREN

„Neben vielen individuellen Angeboten wie der eigenständigen „Mini-Forschung“ an realen Forschungsfragestellungen, Vortragstrainings- und Sprechtrainingsseminaren oder Firmen- und Auslandspraktika bieten wir eine Reihe von Lehrveranstaltungen – inzwischen im Bachelor- und Masterstudiengang – an. Selbstverständlich können alle Arten von Abschlussarbeiten - von der Zwei-Fach Bachelorarbeit bis zur Masterarbeit, in unserer Arbeitsgruppe zu vielen attraktiven Themen der nichtlinearen Photonik angefertigt werden.“

### LEHRE IM BACHELOR- UND MASTERSTUDIUM

Im Bachelorstudiengang gehören dazu einerseits die Pflichtveranstaltungen – Vorlesungen, Seminare und Praktika – der Grundlagen der Physik, andererseits beteiligen wir uns am Schwerpunkt **Scientific Instrumentation** mit den Themen Elektronik sowie Laser und optische Messtechnik.

Im Masterstudium bieten wir regelmäßig Veranstaltungen in den Wahlpflichtfächern **Angewandte Physik** (bis 2009), **Nichtlineare Physik** und **Photonik und Magnonik** an. Dazu gehören Vorlesungen, Seminare und Praktika in folgenden Themengebieten:

- Angewandte Physik I + II
- Einführung in die Photonik
- Einführung in die Nichtlineare Physik
- Biophotonik
- Optische Messtechnik in der Medizin
- Nichtlineare Optik
- Kohärente Optik
- Nichtlineare Wellen und Solitonen

## Education and Teaching

### INTEGRATE SCIENTIFIC RESEARCH INTO EDUCATION

„Besides a number of individual offers for students including “Mini-Research” – a self-contained work on real research questions, practicing presentations and scientific speeches, or international and company internships, we are offering a number of teaching lessons – meanwhile within Bachelor- and Master education in physics. Naturally, all types of study theses from the education bachelor thesis up to the master thesis can be realized in our group on many attractive topics of nonlinear photonics.“

### TEACHING IN BACHELOR- AND MASTER EDUCATION

Within Bachelor education, we are not only participating at lectures, seminars and practical exercises on the basics of physics, but also offer courses on electronics and lasers and optical metrology in the focus field **Scientific Instrumentation**.

In Master education, we offer regularly lessons in the focus fields **Applied Physics** (till 2009), **Nonlinear Physics**, and **Photonics and Magnonics**. This includes lectures, seminars, and practical exercises in the following fields:



- Applied Physics I + II
- Introduction to Photonics
- Introduction to Nonlinear Physics
- Biophotonics
- Optical Metrology in Medicine
- Nonlinear Optics
- Coherent Optics
- Nonlinear Waves and Solitons

Wir gratulieren zum 10-jährigen Jubiläum  
und wünschen auch weiterhin viel Erfolg.



# Erfolg macht sexy.

Finanz- und Karriereplanung für Studenten und Berufseinsteiger.

Erfolg stellt sich nicht von selbst ein, man muss ihn machen. Wir unterstützen Sie dabei, indem wir Sie coachen – Sie, Ihre Karriere, Ihr Geld. Mit der Erfahrung von 40 Jahren in der Finanz- und Vermögensberatung von Akademikern, haben wir ein breites Spektrum an Leistungen für Studenten und Berufseinsteiger entwickelt. Damit Sie in Bewerbungsgesprächen und Assessment Centern gut da stehen. Damit Sie immer finanziellen Spielraum haben und optimal abgesichert sind.

Stellen Sie uns auf die Probe.

Tel 0251 • 14484 • 38

MLP Finanzdienstleistungen AG, Geschäftsstelle Münster IV  
Mathias Altebockwinkel, Scharnhorststraße 46, 48151 Münster  
mathias.altebockwinkel@mlp.de, www.mlp-campuspartner.de

 MLP

Finanzberatung, so individuell wie Sie.



## innovative people



Innovative Technologien, Verantwortung vom ersten Tag an, eine interessante und wachstumsstarke Branche. Im ROSEN Technology & Research Center in Lingen kannst Du Deine Ideen einbringen und in interdisziplinären Teams an spannenden Projekten arbeiten. Du bist kreativ, kommunikationsstark und bringst jede Menge Wissen aus Deinem Studium oder aufgrund erster praktischer Erfahrungen mit?

Dann suchen wir Dich als

### Absolvent/in, Praktikant/in oder Diplomand/in

in Forschung und Entwicklung, Produktmanagement oder Projektkoordination/Teilprojektleitung. Mittlerweile sind fast 2000 Mitarbeiter/innen weltweit für ROSEN aktiv - der Standort Lingen zählt mit über 700 Mitarbeiter/innen zu den bedeutendsten Unternehmen der Region.

Bewerben solltest Du Dich insbesondere als Studierender oder Absolvent/in der **Physik, Mathematik, Ingenieurwissenschaften/Wirtschaftsingenieurwesen oder Informatik** am besten per E-Mail.

ROSEN Technology & Research Center Germany

Telefon +49-591-9136-555 | karriere@roseninspection.net | [www.roseninspection.net/karriere](http://www.roseninspection.net/karriere)



## Konferenzen und Veranstaltungen CONFERENCES AND EVENTS

- May 2007 >** Eröffnung des Center for Nonlinear Science  
*Opening of the Center for Nonlinear Science*
- September 2007 >** Sommerschule „Frontiers in Optics“, Nankai Universität, Tianjin, China  
*Summer School “Frontiers in Optics” at the Nankai University, Tianjin, China*
- February 2008 >** Konferenz der COST Aktion MP 0604, „Optical Micromanipulation by Nonlinear Photonics“  
*Conference of the COST Action MP 0604 “Optical Micromanipulation by Nonlinear Photonics”*
- February 2008 >** Konferenz NMOC „Nonlinear Microscopy and Optical Control“  
*Conference NMOC “Nonlinear Microscopy and Optical Control”*
- November 2008 >** Tagung 12. Deutsche Physikerinnentagung DPT o8  
*Conference 12th German Women in Physics Congress DPT o8*
- June 2009 >** Tagung PR 09 „Photorefractive Materials, Effects, and Devices.“  
*Conference PR 09 “Photorefractive Materials, Effects, and Devices.”*
- January 2011 >** Laserworkshop „50 Jahre Laser und Nichtlineare Optik 2010/2011“  
*Laser-Workshop “50 Years of Lasers and Nonlinear Optics 2010/2011”*



The collage includes several brochures and posters:

- A blue banner for the COST MP0604 meeting in Bad Honnef, Germany, dated June 11-14, 2009.
- A yellow poster for the 12. Deutsche Physikerinnentagung at WWU Münster, November 6-9, 2008.
- A green poster for the Laser-Workshop "50 Jahre Laser und Nichtlineare Optik 2010/2011" at WWU Münster, January 21, 2011.
- A blue poster for the Nonlinear Microscopy and Optical Control (NMOC) 2008 conference at WWU Münster, January 21, 2011.
- A white poster for the Eröffnung des Center for Nonlinear Science at WWU Münster, May 7, 2007.
- A blue poster for the German-Chinese Summer School on "Frontiers in Optics - from Nonlinear to Extreme Optics" at WWU Münster, January 2011.

72 >



**TEAM | KOOPERATIONEN | PROJEKTE  
TEAM | COOPERATIONS | PROJECTS**

## Arbeitsgruppe heute

Michael Eßeling

Christian Mertens

Álvaro Barosso Peña

Sebastian Kroesen

Thomas Schemme

Michaela Lemmer

Bianka Muschalek

Julian Becker

Jörg Imbrock

Stefan Gläsener



Cornelia Denz

Andreas Kelberer

Sybille Niemeier



## Team today

Mike Wördemann

Diana Nordhaus

Janning Herrmann

Inga Zeisberg

Marko Heyse

Wolfgang Horn

Mousa Ayoub

Lena Dewenter

Falko Diebel



Martin Boguslawski

Christina Alpmann

Annika Kruse

Nicht im Bild

# TEAM

GEMEINSAM FÜR DIE PHOTONIK VON MORGEN

## Ehemalige



### DISSERTATIONEN | PhD THESES

- 2010 Bernd Terhalle
- 2008 Gernot Berger
- 2007 Björn Gütlich
- 2006 Denis Träger
- 2005 Vishnu Vardhan Krishnamachari
- 2003 Carsten Weilnau

### DIPLOMARBEITEN | DIPLOMA THESES

- 2011 Christina Heßeling
- 2011 Katharina Ditte
- 2010 Christina Alpmann
- 2010 Konrad Berghoff
- 2010 Florian Hörner
- 2010 Martin Boguslawski
- 2010 Fabian Sibbers
- 2010 Michael Eßeling
- 2010 Alex Kindsvater
- 2009 Jan Paul von Bassewitz
- 2009 Dennis Görries
- 2009 Michael Oevermann

- 2009 Mousa Ayoub
- 2009 Sebastian Kosmeier
- 2009 Alexander Pirkl
- 2008 Nils Alexander Sanetra
- 2008 Thomas Denis
- 2008 Patrick Rose
- 2008 Carsten Cleff
- 2008 Philipp Bersenbrügge
- 2008 Markus Dekiff
- 2008 Mathias Bernd Eversloh
- 2008 Katharina Havermann
- 2008 Clemens Heese
- 2008 Felix Johan Lehmann
- 2008 Christian Nölleke
- 2008 Stephan Stürwald
- 2008 Hendrik Wolff
- 2007 Mike Wördemann
- 2007 Christoph Bersch
- 2007 Alexander Hartmann
- 2007 Nicoletta Brauckmann
- 2007 Sebastian Koke

- 2007 Johannes Laven
- 2007 Christian Remmersmann
- 2007 Matthias Westhäuser
- 2007 Bernd Terhalle
- 2006 Mathias Dietz
- 2006 Christian Ripperda
- 2006 Holger Zimmermann
- 2006 Wolfgang Horn
- 2006 Niklas Andermahr (Geb. Mönter)
- 2005 Hendrik Deitmar
- 2005 Oliver Grothe
- 2005 Alexander Höink
- 2005 Patrick Langehanenberg
- 2004 Christian Kronholz
- 2004 Jochen Schröder
- 2003 Oliver Kamps
- 2003 Christoph Schulz
- 2003 Martin Stumpe



## Alumni



### BACHELORARBEITEN |

#### BACHELOR THESSES

- 2010 Markus Paßlick
- 2009 Jonas Inhestern
- 2009 Felix Butzbach

### LEHRAKTSSTUDIENGÄNGE |

#### TEACHER STUDIES

#### ZWEI-FACH BACHELOR |

#### BACHELOR OF EDUCATION

- 2010 Maren Schmeling
- 2010 Vanessa Menke
- 2010 Tobias Lahme
- 2010 Christian Beck
- 2009 Paul Möllers
- 2008 Mark Schmitz

#### MASTER OF EDUCATION

- 2010 Melanie Buxhoid

#### STAATSEXAMEN | STATE EXAM

- 2008 Ramona Teriete
- 2005 Inga Zeisberg

### EHEMALIGE MITARBEITER/INNEN |

#### FORMER GROUP MEMBERS

- 2009-2011 Dr. Jianing Liu
- 2004-2008 Matthias Schönebäumer
- 2004-2005 Albert Wirp
- 2002-2006 Nina Sagemerten

### EHEMALIGE GÄSTE | FORMER GUESTS

- 2010 Prof. Dr. Wang Zhaohui (CAS Beijing, China)
- 2010 Wei Jiang (CAS Beijing, China)
- 2010 Alvin Sashala Naik (Univ. Paris Sud, France)
- 2009 Daniel Kane (Univ. of Strathclyde, Glasgow, UK)
- 2009-2010 MTech Jolly Xavier P (IIT Delhi, India)
- 2009 Dr. Joby Joseph (IIT Delhi, India)
- 2008 Dr. Riccardo Castagna (Univ. della Marche, Ancona, Italy)
- 2008 Dr. Andrey Sukhoroukov (ANU Canberra, Australia)
- 2008 Sangwoo Ha (ANU Canberra, Australia)
- 2008 Dr. Neal Radwell (Univ. of Strathclyde, Glasgow, UK)
- 2008 Timi Tebug (Université Paris Sud, France)
- 2007 Calvyn Howells (Univ. of Strathclyde, Glasgow, UK)

2007 Leonard Pacitti (Univ. of Strathclyde, Glasgow, UK)

2006 Anatoly Sherman (Technion, Haifa, Israel)

2005-2006 Dr. Xinzhen Zhang (TEDA, Tianjin, China)

2005-2006 Liqin Tang (TEDA, Tianjin, China)

2005 Matthieu Geffroy (Univ. Paris Sud, France)

2005 Anne Drillien (Univ. Paris Sud, France)

2005 Florence Doutre (Univ. Sophia Antipolis, Nice, France)

2004 Prof. Dr. Yuri S. Kivshar (ANU Canberra, Australia)

2004 Hosam Sherif (DIT, Ireland)

2003 Dr. Milan Petrovic (IOP Belgrade, Serbia)

2002 Prof. Dr. Milivoj Belic (TAMU Qatar, Doha)

2002 Dr. Aleksandra Strinic (IOP Belgrade, Serbia)

2002 Prof. Dr. Wieslaw Krolikowski (ANU Canberra, Australia)

2001-2002 Dr. Anton Desyatnikov (ANU Canberra, Australia)

2001 Dr. Istvan Földvari Hungarian Academy of Sciences, SZFKI, Budapest, Hungary

(also in 2002, 2004, 2005)

2001 Dr. Jürgen Petter (TU Darmstadt)

# TEAM

**GEMEINSAM FÜR DIE PHOTONIK VON MORGEN**



## Preise und Auszeichnungen

## **AWARDS AND DISTINCTIONS**

- 2011** > Projekt „Light up your life“ wird Ort im Land der Ideen

**2011** > Bernd Terhalle > Springer Dissertationspreis, Veröffentlichung der Dissertation  
*Controlling Light in Optically Induced Photonic Lattices*

**2010** > Sebastian Kroesen > Best Presentation Award, EOS Jahrestagung 2010

**2010** > Michael Esseling > „Infineon Master Award“, Fachbereich Physik

**2009** > Cornelia Denz > Fellow of the European Optical Society

**2009** > Inga Zeisberg > Frauenförderpreis der WWU

**2007** > Cornelia Denz > Fellow of the Optical Society of America

**2007** > Bernd Terhalle > „Infineon Master Award“, Fachbereich Physik

**2006** > Mike Woerdemann > „Student Award 2006“, Nano2Life

**2006** > Frank Holtmann > Posterpreis für beste Arbeit, „Second Annual Meeting of Na

**2005** > Vishnu Vardhan Krishnamachari > Sybille-Hahne-Preis für Naturwissenschaften

**2005** > Inga Zeisberg > Posterpreis für beste Arbeit, Deutsche Gesellschaft für Angewa

**2003** > Cornelia Denz > Frauenförderpreis der WWU



N24

10:22 Uhr  
Mittwoch, 25. Februar 2015

BACHRICHTE WISSEN TIPPS & SERVICE HEIMKINO TV

Politik Panorama Leute Sport Internet & Medien Computer & Technik Auto Web

GESCHÄFTS LINIEN KOMMUNIKATION

Geschehen in Deutschland | Nachrichten | Pressemitteilungen

Student bremst Lichtrauhafen aus

Ein Student aus Münster hat bei Panopto und dem Unternehmen Lichtraum einen Patentstreit beigebracht und will nun eine F2F-Geldstrafe entgegennehmen. Der Urheberrechtsverletzung des Lichtraums kann es ein Verbot

Psychologische Schulabschluss Klausuren aus Münster hat die Geschäftsführung von Lichtraum beschuldigt, dass sie die Prüfungsaufgaben der Hochschulpraktikanten in verschiedenen Prüfungen wiederholen durften. Lichtraum bezweigt im Verfahren mit 200.000 Euro eine Entschädigung, um die Prüfungsaufgaben nicht mehr zu missgönne, es sei verlangt worden, wenn es sich um eine Prüfung handelt und feste Strafen abzuschaffen. (Bettina 27/27 Gedächtnis)

Link zum Thema



A photograph from a press conference. On the left, Michael Ebeling, wearing a yellow shirt, is smiling and looking towards the camera. On the right, Prof. Dr. Cornelia Denz, wearing a dark top, is also smiling. They are standing in front of a banner that reads "Pressemitteilung upm EXZELLENTE OPTIK Auszeichnung für Prof. Dr. Cornelia Denz Münster (upm), 24. Oktober 2007". In the background, there are other people and what looks like a lecture hall or conference room setting.

## Pressespiegel

### PRESS REVIEW



Nonlinear systems are sensitive. A bit of energy or a small change make them unpredictable. Prof. Cornelia Denz explains why her research on photonics has value for precisely this reason



In der Universität Münster konzentriert sich Julian über ein Dreieck aus schwäbischer Pappa und buntem Farbfest. Der fünfjährige hat den ganzen Vormittag mit dem kleinen wie die anderen 15 Kinder des Ferienprogramms das Service- und Umweltzentrum der Uni für die Zeit, in der zwar Schülern, aber nicht Kindern keine Sommerferien sind. Das Projektangebot für die Kinder der Uni-Beschäftigungen organisiert

Bereit unterzutauchen. "So kommen Kinder im Grundschulalter etwas ins Bild", erläutert Julian. Der fünfjährige hat den ganzen Vormittag mit dem kleinen wie die anderen 15 Kinder des Ferienprogramms das Service- und Umweltzentrum der Uni für die Zeit, in der zwar Schülern, aber nicht Kindern keine Sommerferien sind. Das Projektangebot für die Kinder der Uni-Beschäftigungen organisiert

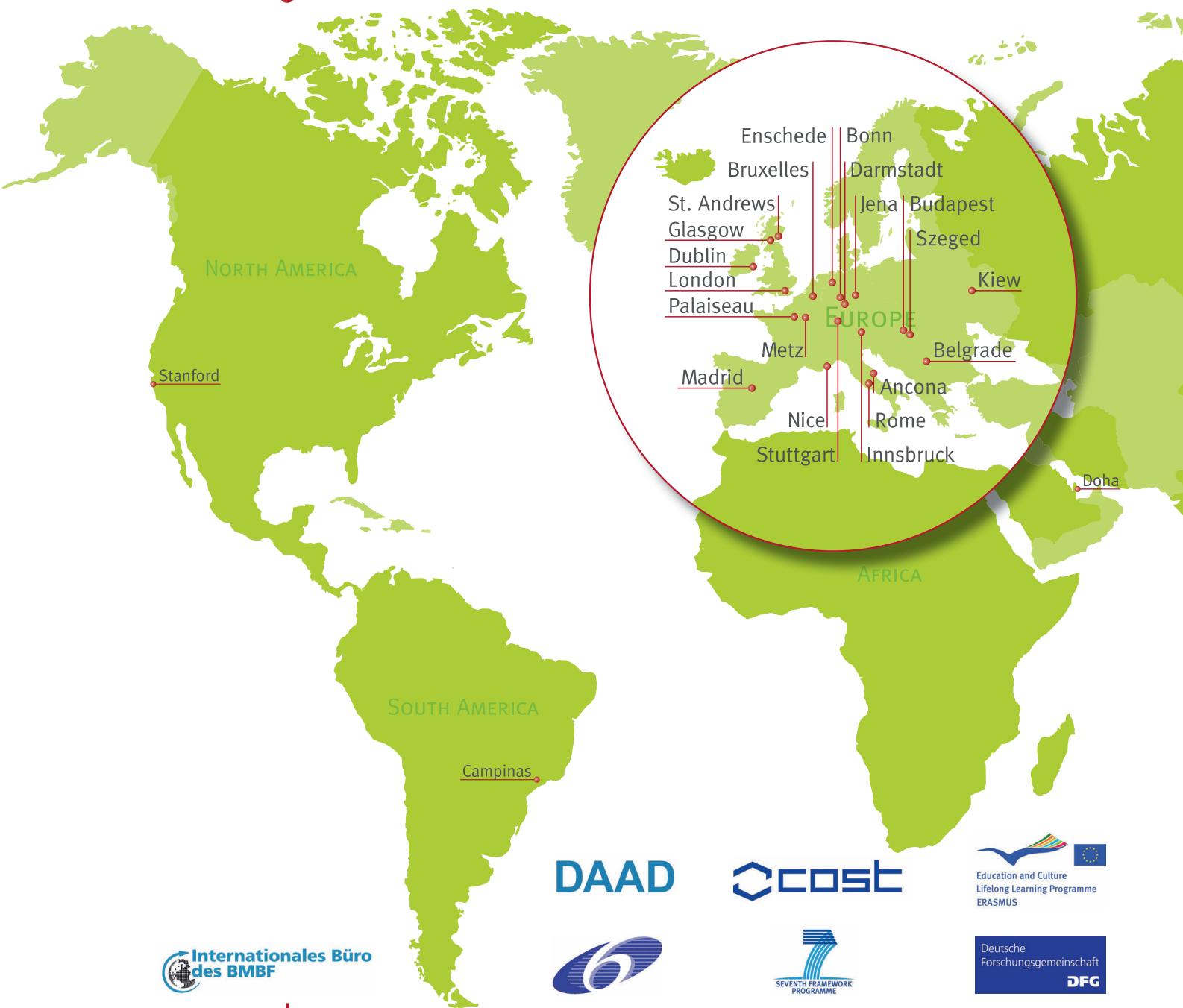


Das Prinzip der Phasenmodulation. Am unteren Rand befindet sich ein Minilaser-Datenspeicher, der auf dem Spiegel zwischen dem Platz und der Spezialspiegel im Tarnnetz steht. Der Referenzstrahl eines Tarnnetz-solcher Systeme wird von einem Datenstrahl überdeckt, um die für die Speicherung benötigte Gravität nur wieder zu polarisieren. Beide Strahlen werden dann auf einen wiederverwendenden Minilaser gerichtet und sind die externen schnellen Zugriffe.

Die Phasenmodulation wird durch das Material, das der Laser in einem gasgekühlten optischen Kristall durchdringt, vorgenommen. Dieser Kristall besteht aus einem Gasgemisch aus Argon und Wasserstoff, das die Ausbreitung der Welle verzögert. Ein elektronisches Muster absorbiert

# KOOPERATIONEN

WELTWEITE FREUNDSHAFTEN





## INTERNATIONALE AKTIVITÄTEN

### BINATIONALE KOOPERATIONEN | BINATIONAL COOPERATIONS

**Australian National University Canberra**, Australia ← Prof. Dr. Yu. S. Kivshar | **Budapest University of Technology and Economics**, Hungary ← Prof. Dr. E. Lorincz | **Chinese Academy of Sciences, and Tsinghua University**, Beijing, China ← Prof. Dr. Z. Wang | **Dublin Institute of Technology**, Ireland ← Prof. Dr. V. Toal | **Hungarian Academy of Sciences**, Budapest, Hungary ← Prof. Dr. I. Földvari | **Imperial College London**, UK ← Prof. Dr. P. French | **Indian Institute of Technology**, New Delhi, India ← Prof. Dr. K. Singh, Dr. J. Joseph | **INSTITUT D'OPTIQUE THÉORIQUE ET APPLIQUÉE**, Palaiseau, Frankreich ← Prof. Dr. G. Roosen, Dr. G. Pauliat, Dr. N. Dubreuil | **Institut Nonlineaire de Nice**, France ← Profs. Dr. G.-L. Lippi, R. Kaiserl | **Medizinische Universität Innsbruck**, Österreich ← Prof. Dr. M. Ritsch-Marte | **Nankai University**, Tianjin, China ← Prof. Dr. X. Jingjun ← Dr. X. Zhang | **Stanford University**, USA ← Prof. Dr. B. Hesse-link | **Supelec et Université Paul Verlaine**, Metz, France ← Prof. Dr. N. Fressengas, Dr. D. Wolfersberger, Dr. M. Sciamanna | **Texas A&M University**, Doha, Qatar ← Prof. Dr. M. Belic | **Universidad Autonoma de Madrid**, Spain ← Prof. Dr. F. Agullo-Lopez ← Prof. Dr. M. Carrascosa-Rica | **Universidad Estadual de Campinas**, Brazil ← Prof. Dr. J. Freijlich | **Universita de Roma Tre**, Italy ← Prof. Dr. G. Assanto | **Università degli Studi La Sapienza**, Rome, Italy ← Prof. Dr. E. Fazio | **Università Politecnica delle Marche**, Ancona, Italy ← Prof. Dr. F. Simoni | **Université Libre de Bruxelles**, Belgium ← Prof. Dr. P. Mandel | **University of Belgrade**, Serbia ← Prof. Dr. M. Belic, Dr. M. Petrovic | **University of Glasgow**, UK ← Prof. Dr. M. Padgett | **University of Kiew**, Ukraine ← Prof. Dr. S. Odoulov | **University of Queensland**, Bris-

bane, Australia ← Prof. Dr. N. Heckenberg, H. Rubinsztein-Dunlop | **University of St. Andrews**, St. Andrews, UK ← Prof. Dr. K. Dholakia | **Technical University of Szczecin**, Poland ← Prof. Dr. Ewa Weinert-Raczka | **University of Szeged**, Hungary ← Prof. Dr. P. Ormos | **University of Strathclyde**, Glasgow, UK ← Prof. Dr. W. J. Firth, G.-L. Oppo, T. Ackemann, F. Papoff | **University of Twente**, Enschede, The Netherlands ← Prof. Dr. V. Subramanian, Prof. Dr. M. Bennink

### KOOPERATIONEN IN EUROPÄISCHEN NETZWERKEN | COOPERATIONS IN EUROPEAN NETWORKS

EU COST Actions P8, MP 0604  
EU FP 7 Network of Excellence Photonics4Life  
EU FP 6 Network of Excellence Nano2Life

### ERASMUS PARTNEREINRICHTUNGEN | ERASMUS PARTNER INSTITUTIONS

**Institut Nonlineaire de Nice**, France  
**Université Sophia Antipolis**, Nice, France  
**Dublin Institut of Technology**, Dublin, Irland  
**University of Strathclyde**, Glasgow, UK

### NATIONALE KOOPERATIONEN | NATIONAL COOPERATIONS

Technische Universität Darmstadt ← Prof. Dr. F. Kaiser Schiller-Universität und IPHT, Jena ← Prof. Dr. J. Popp  
Universität Bonn ← Prof. Dr. K. Buse  
Universität Stuttgart ← Prof. Dr. H. Giessen  
Universität Erlangen-Nürnberg ← Prof. Dr. A. Delgado  
Techn. Universität München ← Prof. Dr. R. Westermann  
Universität zu Köln ← Prof. Dr. Berenike Maier

## Förderorganisationen | Funding Organisations

FÖRDERUNG VON 2001-2011 | FUNDING 2001-2011

- Deutsche Forschungsgemeinschaft
- Bundesministerium für Bildung und Forschung
- Volkswagenstiftung
- Deutscher Akademischer Austausch Dienst
- European Framework Programmes 5-7
- European Science Foundation
- Innovationsministerium Nordrhein-Westfalen
- Adolf Messer-Stiftung
- Royal Society of United Kingdom
- Sybille Hahne-Stiftung
- Wilhelm und Else Heraeus-Stiftung
- und im Rahmen von Firmenkooperationen



Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung



Internationales Büro  
des BMBF

Deutsche  
Forschungsgemeinschaft  
**DFG**

**DAAD**



SEVENTH FRAMEWORK  
PROGRAMME



**c****cost**

**ORGA**  
The Smart Card Integrator

**B|BRAUN**  
SHARING EXPERTISE

**BASF**  
The Chemical Company

**COHERENT**®

**DAIMLER**

# LCOS - Spatial Light Modulators and Scientific CCD Cameras

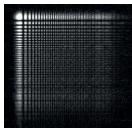


## Features:

- Pure phase control - linear and precise
- Outstanding phase stability
- Up to 95% light utilisation efficiency
- High diffraction efficiency
- Unique laser power handling capability

## Applications:

- Optical micromanipulation (optical tweezers)
- Laser pulse- and wavefrontshaping (STED, CARS)
- Adaptive optics, aberration correction (ophthalmology)
- Multipoint laser material processing (lasermarking, silicon wafer scribing)



## Features:

- High-speed readout 45 frames/second (1920 x 1440) up to 1273 frames/second
- Low noise 3 electrons (r.m.s.)
- High resolution 2.8 megapixel
- High dynamic range 4500:1

## Applications:

- High-speed fluorescence microscopy
- Semiconductor inspection
- X-ray scintillator readout
- Failure analysis

**HAMAMATSU**  
PHOTON IS OUR BUSINESS

dialog@hamamatsu.de · www.hamamatsu.de

# Innovate to New Heights!

**LINOS ist jetzt Qioptiq!**

Nutzen Sie unsere 130-jährige Erfahrung in der Fertigung qualitativ hochwertiger und innovativer Optiken, Opto-Mechaniken und optischer Systeme.

Ob Technik oder Wissenschaft - bei Qioptiq erhalten Sie für jede Ihrer feinoptischen Anforderungen die passende Komponente.

Engste Fertigungstoleranzen sorgen bei allen unseren Produkten für höchste Präzision in Serie!

In unserem neuen Online-Shop finden Sie 4.800 bewährte und neu entwickelte Optikkomponenten für Research & Development-Anwendungen.

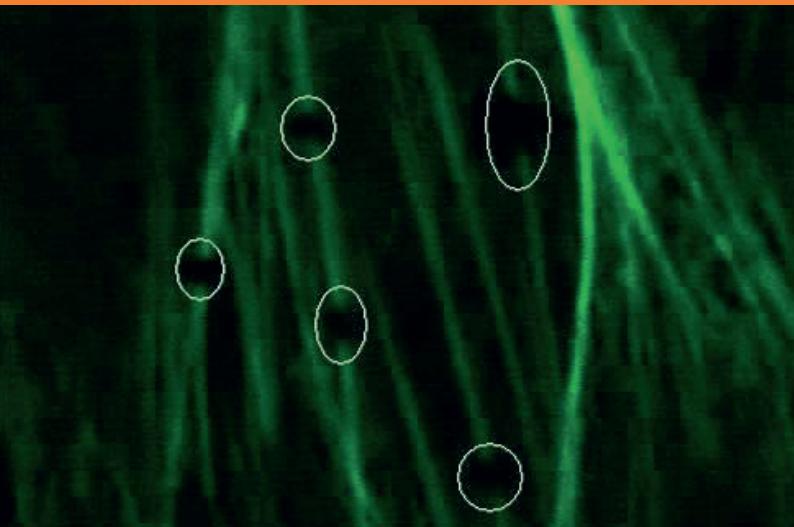
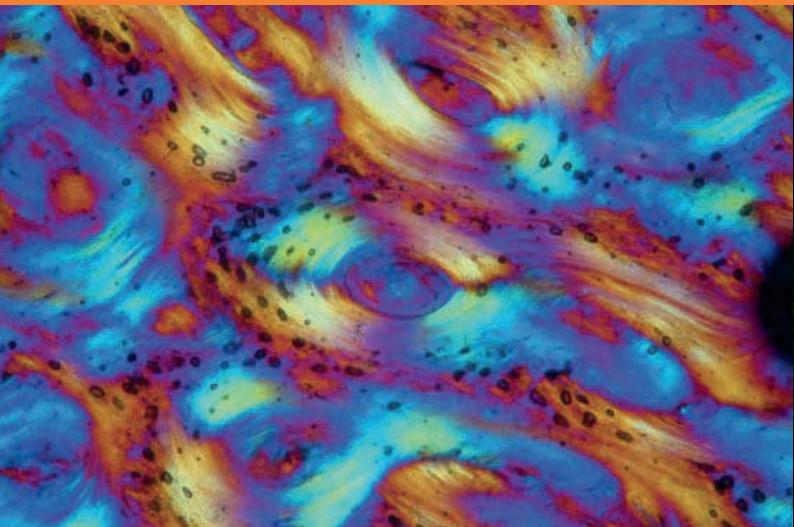
[www.qioptiq-shop.com](http://www.qioptiq-shop.com)

Fordern Sie auch unsere aktuelle Highlightbroschüre an!

Qioptiq  
[sales@qioptiq.de](mailto:sales@qioptiq.de)  
Tel.: +49 (0)551 - 6935 0  
[www.qioptiq.de](http://www.qioptiq.de)



# Femto-Solutions for Life Sciences



## TissueSurgeon

- Native Tissue Sectioning
- 3D Sectioning of Tissue
- Native Hard Tissue Processing
- OCT-Controlled Cutting Process

## CellSurgeon

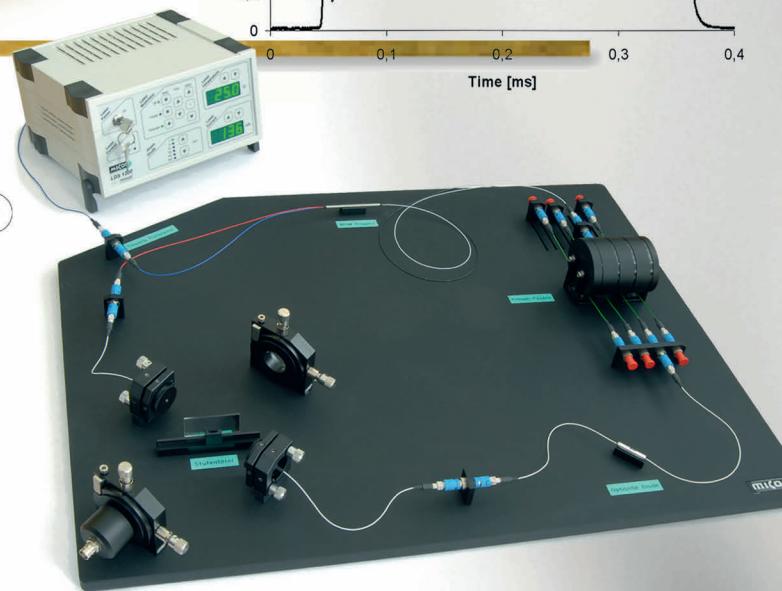
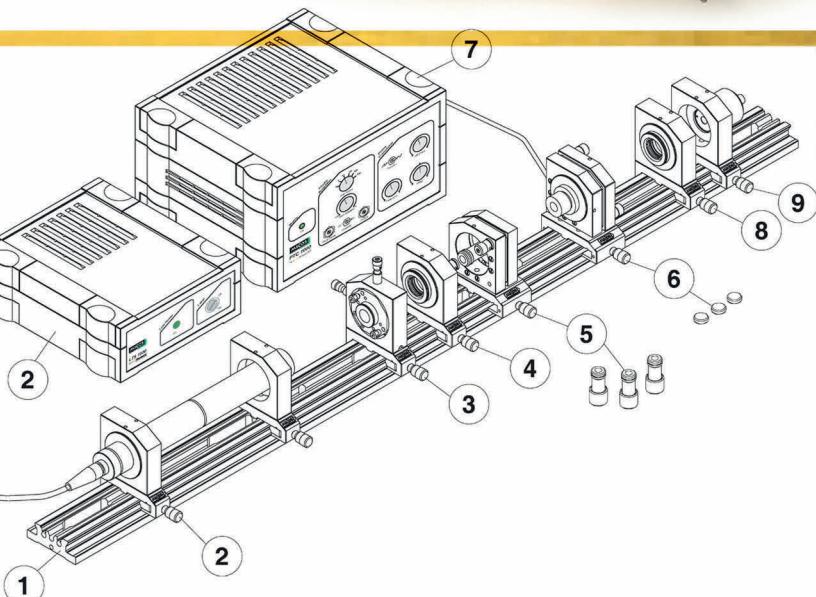
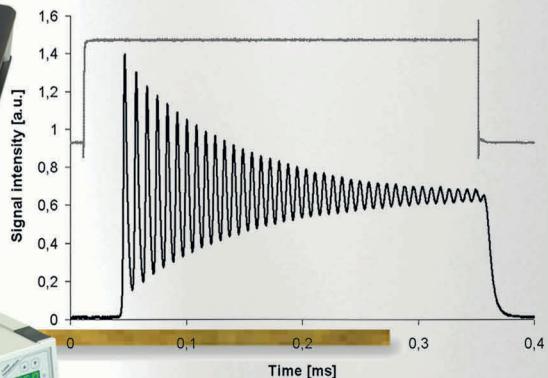
- Combines Cell Manipulation & Imaging
- Cell Transfection by Optoporation
- Nanosurgery in Living Cells and SMOs
- Multiphoton Imaging

# campus®

## EDUCATIONAL SYSTEMS

precision made in germany

# micos



| Laser Fundamentals

| Optics Basics

| phone: +49 7634 5057 230

| Fiber Optics

| Material Processing

| info@micos-online.com

| Laser Metrology

| Physics Experiments

| www.micos-online.com

# DIE ANTWORT

auf die Herausforderung moderner Lebendzell-Mikroskopie:

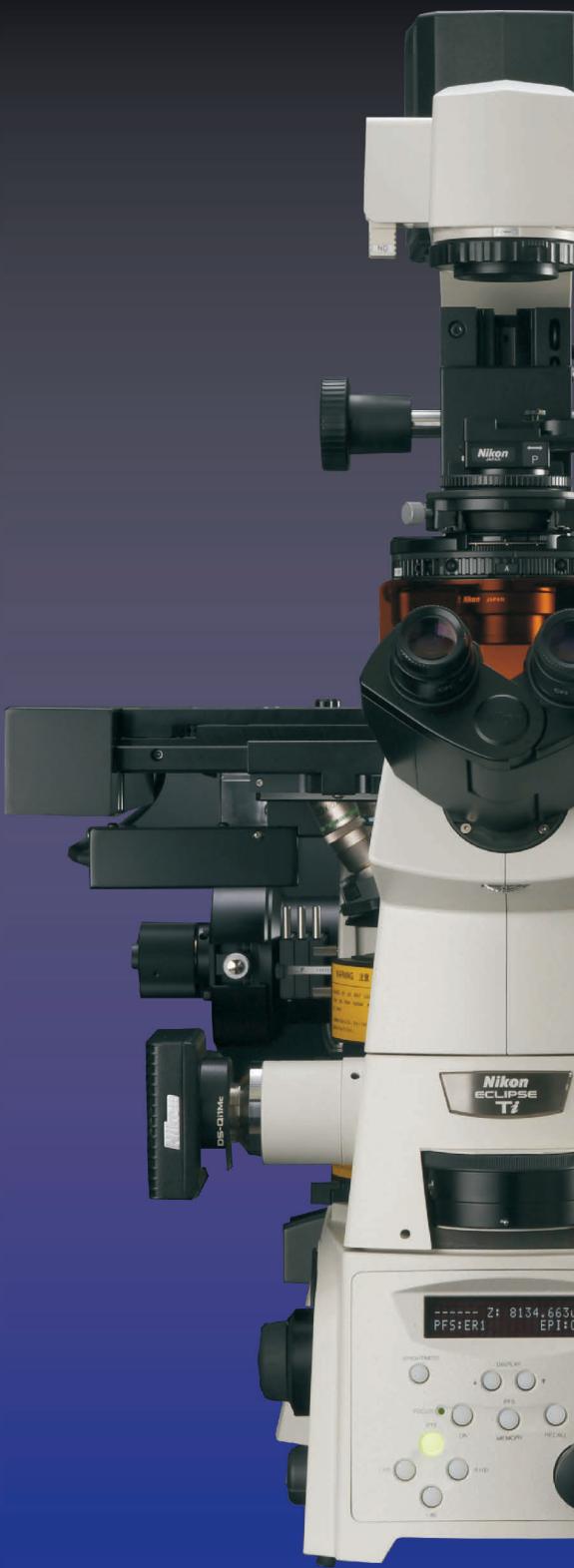
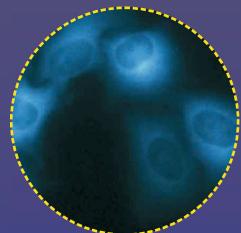
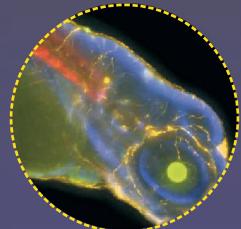
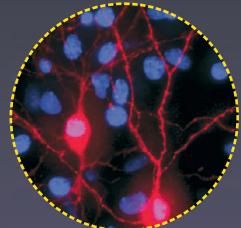
Das  
inverse  
Mikroskop

# Ti

Mit Perfect Focus  
System, externem  
Phasenkontrast  
und vielem mehr ...



Interessiert? Tel. +49 211 94 14 0  
[mikroskope@nikon.de](mailto:mikroskope@nikon.de) . [www.nikoninstruments.eu](http://www.nikoninstruments.eu)





Westfälische Wilhelms-Universität Münster | *University of Muenster*

**Institut für Angewandte Physik | Nichtlineare Photonik**

*Institute of Applied Physics | Nonlinear Photonics*

Corrensstraße 2/4 | 48149 Münster | Germany

phone +49 (0)251 83 335-18

fax +49 (0)251 83 398-11

[www.nichtlineare-photonik.de](http://www.nichtlineare-photonik.de)