



Laboratorium für  
Nano- und Quantenengineering

11  
102  
1004

Leibniz  
Universität  
Hannover



Jahresbericht 2016

Laboratorium für Nano- und Quantenengineering

Annual Report 2016

Laboratory of Nano and Quantum Engineering

## Seite Inhalt

*Page Content*

- 3 | Grußworte  
*Greetings*
- 4 | Ziel des Laboratoriums  
*Goals of the Laboratory*
- 6 | Forschung  
*Research*
- 12 | Mitglieder  
*Members*
- 22 | Aktuell in 2016  
*News in 2016*
- 31 | Aktivitäten in 2016  
*Activities in 2016*
- 32 | NanoDay 2016  
*NanoDay 2016*
- 36 | Forschungsbau  
*Research building*
- 44 | Studiengang Nanotechnologie  
*Study Course Nanotechnology*
- 48 | Promotionsprogramm "Hannover School for Nanotechnology"  
*PhD program "Hannover School for Nanotechnology"*
- 68 | Wissenschaftliche Projekte  
*Scientific Projects*

## Impressum

### *Imprint*

Herausgeber/**Editor**:  
Laboratorium für  
Nano- und Quantenengineering  
Leibniz Universität Hannover  
Schneiderberg 39  
30167 Hannover  
Germany  
[www.LNQE.uni-hannover.de](http://www.LNQE.uni-hannover.de)

Druck/**Print**:  
Druck Team Druckgesellschaft mbH,  
Hannover

Titelbild/**Cover picture**  
LNQE-Forschungsbau

Verantwortlich/**Responsible**:  
Fritz Schulze Wischeler

**Liebe Leserin, lieber Leser,**

im nicht immer einfachen Umfeld eines stark interdisziplinär geprägten universitären Forschungsinstituts können wir doch auf ein erfolgreiches Jahr 2016 für das LNQE zurückblicken. Im Frühjahr wurde der Folgeantrag für unser Niedersächsisches Promotionsprogramm „Hannover School for Nanotechnology“ bewilligt. Der wissenschaftliche Fokus liegt diesmal auf kleinsten Sensoren. Das Programm ist als neue Sektion „hsn-sensors“ bereits im Oktober gestartet. Wie bereits beim Vorgänger „hsn-energy“ werden wir das Programm mit zusätzlichen Doktorandinnen und Doktoranden auffüllen und so die Anzahl an Promovierenden im Programm verdoppeln. Der Koordinator der hsn ist Rolf Haug.

Bei der Einwerbung einer neuen DFG-Forscherguppe „From Few to Many-Body Physics with Dipolar Quantum Gases“ war Silke Ospelkaus (Quantenoptik) erfolgreich. Ebenfalls erfolgreich waren Christoph Tegenkamp und Herbert Pfnür (beide Festkörperphysik), deren DFG-Forscherguppe „Metallic nanowires on the atomic scale: Electronic and vibrational coupling in real world systems“ nach einer sehr positiven Evaluation für weitere drei Jahre verlängert wird. Gratulation! An weiteren Initiativen wird konzentriert gearbeitet, so dass wir hoffen, 2017 mit der Unterstützung der LNQE-Mitglieder weitere, große Vorhaben auf den Weg bringen zu können.

Im April hatten wir zum ersten Mal einen „LNQE-Nachmittag“ mit vier Vorträgen zum Thema Energie und im September unseren zwölften ganztägigen Workshop NanoDay. Ein besonderes Highlight war unser erstes „Joint Symposium“ mit dem Center for Nanointegration Duisburg-Essen (CENIDE) im August mit über 70 Teilnehmerinnen und Teilnehmern in Duisburg, wo wir uns zum überregionalen fachlichen Austausch trafen.

Organisatorisch gab es 2016 eine Verstärkung im Vorstand, wo wir Christian Ospelkaus (Quantenoptik) und Marc Christopher Wurz (Mikroproduktionstechnik) neu begrüßen.

Viele Spaß beim Lesen!

**Dear Reader,**

*In the not always easy environment of a highly interdisciplinary university research institute, we can nevertheless look back on a successful year 2016 for the LNQE. In the spring, the follow-up proposal for our Lower Saxony programme “Hannover School for Nanotechnology” was approved. The scientific focus is this time on the smallest sensors. The program has already started in October as a new section “hsn-sensors”. As with the predecessor “hsn-energy”, we will fill the programme with additional doctoral students and thus double the number of doctoral candidates in the programme. The coordinator of the hsn is Rolf Haug.*

*Silke Ospelkaus (quantum optics) was successful in the acquisition of a new DFG research group “From Few to Many-Body Physics with Dipolar Quantum Gases”. Christoph Tegenkamp and Herbert Pfnür (both solid-state physics) had also been successful, their DFG research group “Metallic nanowires on the atomic scale: Electronic and vibrational systems in real world systems” is extended for a further three years after a very positive evaluation. Congratulations! On further initiatives is worked very concentrated, so we hope to be able to launch further large projects in 2017 with the support of the LNQE members.*

*In April, we had an “LNQE afternoon” for the first time with four lectures on the subject of energy and in September our twelfth whole-day workshop NanoDay. A special highlight was our first “Joint Symposium” with the Center for Nanointegration Duisburg-Essen (CENIDE) in August with more than 70 participants in Duisburg, where we met for interregional professional exchange.*

*Organizationally, there was a strengthening of the board in 2016, where we welcome Christian Ospelkaus (quantum optics) and Marc Christopher Wurz (microproduction technology).*

*Enjoy the reading!*



Peter Behrens  
- Sprecher des Vorstands -  
- Speaker of the executive board -



Fritz Schulze Wischeler  
- Geschäftsführer -  
- Chief operating officer -

## Ziele des Laboratoriums

### Goals of the Laboratory



LNQE-Forschungsbau am Schneiderberg 39, 30167 Hannover, Deutschland.  
*LNQE research building at Schneiderberg 39, 30167 Hannover, Germany.*

Die Synthese und Kontrolle von Materialien auf Größenskalen im Mikro- bis Nanometerbereich liefert den Zugang zu völlig neuartigen Material- und Systemeigenschaften. Auf diesen Skalen treten Quanteneffekte in Erscheinung, in denen ein noch weitgehend unausgeschöpftes Potenzial an revolutionären, neuartigen Funktionalitäten liegt. Die kontrollierte Manipulation und Beherrschung solcher Materialien und Funktionalitäten erfordert neuartige Werkzeuge. Die Forschung von Naturwissenschaftlern und Ingenieuren fließt bei diesen Strukturgrößen zusammen und setzt so synergetisch Ressourcen frei. Hieraus entwickeln sich völlig neue, nanotechnologische Bauelemente.

Für die dazu erforderliche interdisziplinäre Forschung findet sich im Laboratorium für Nano- und Quantenengineering eine Basis. Hierzu wird in einer breiten Anstrengung das Know-how verschiedener Fachgebiete fokussiert und gebündelt, um aufbauend auf zielgerichteter Grundlagenforschung neue Anwendungsfelder zu erschließen und die Nanotechnologie wirtschaftlich zu nutzen.

Zweck des LNQE ist die selbstlose Förderung der angewandten Forschung auf dem Gebiet mesoskopischer Systeme im Mikro- und Nanobereich. In diesem Rahmen führt die Einrichtung Forschungsvorhaben in interdisziplinärer Zusammenarbeit durch. Deren Ergebnisse macht die Einrichtung der interessierten Öffentlichkeit in geeigneter Form zugänglich.

*Synthesis and control of materials on the micro and nanometer scale gives access to all new material and system properties. On this scale quantum effects appear which have the potential to provide revolutionary capabilities. The manipulation and control of such materials needs new tools. The development of structures on such small scales causes the merger of the research of scientists and engineers. This promotes collaboration and hence the sharing of resources, which leads to new solutions for nanotechnology devices.*

*The Laboratory of Nano and Quantum Engineering provides a base for such essential interdisciplinary research. The know-how of different fields will be focused together to develop new areas of application based on targeted basic research and to utilize nanotechnology economically.*

*The aim of the LNQE is the selfless support of applied research in the field of mesoscopic systems on the micro and nano-scale. Within this scope, the organization undertakes research projects in interdisciplinary cooperation and makes the results available to the interested public in a suitable form.*

*The main task of the organization is basic research in mesoscopic scales and transfer of knowledge into practical application, particularly in the major fields of nanomaterials, mechanics / magnetics, nanoelectronics, optics, quantum systems. A further aim is the education and promotion of young researchers in these fields.*

#### Leibniz Forschungszentrum LNQE

Zur Förderung interdisziplinärer Forschung gibt es in der Leibniz Universität Hannover hochschulintern eine innovative Organisationsstruktur, welche untergliedert ist in interdisziplinär ausgerichteten Leibniz Forschungsinitiativen, Leibniz Forschungszentren und die Leibniz Forschungsschulen, in denen hoch relevante Schwerpunktthemen fach- und fakultätsübergreifend bearbeitet werden. Das LNQE ist eine von zurzeit neun Einrichtungen, die als Leibniz Forschungszentrum eingestuft sind.

Aufgabe der Einrichtung ist die Grundlagenforschung in mesoskopischen Größenskalen und deren Umsetzung in praktische Anwendung, insbesondere in den Schwerpunktfachgebieten Nanomaterialien, Mechanik/Magnetik, Nanoelektronik, Optik, Quantensysteme sowie Ausbildung und Nachwuchsförderung auf diesen Gebieten.

Hierbei hat die Einrichtung insbesondere

- Forschungs- und Entwicklungsvorhaben durchzuführen, die sich auf die Erschließung neuer oder die Verbesserung bereits bekannter Anwendungsmöglichkeiten für Mikro- und Nanotechnik richten;
- Für die praktische Anwendung wissenschaftlicher Erkenntnisse zu sorgen und Kräfte der angewandten Forschung und der Praxis zusammenzuführen;
- Aus- und Fortbildungstätigkeit zu leisten und Hilfseinrichtungen für die wissenschaftliche Arbeit und deren Auswertung in der angewandten Forschung zu betreiben;
- Die interdisziplinäre Zusammenarbeit der einzelnen Mitglieder zu fördern und zu verbessern, insbesondere durch die Einrichtung eines gemeinsamen Pools von Verfahrens- bzw. Diagnostiktechniken, der den einzelnen Mitgliedern zur Verfügung steht;
- Bei Erfüllung der ordnungsgemäßen Aufgaben der Einrichtung mit anderen Forschungseinrichtungen des In- und Auslands zusammenzuarbeiten.

Zur Verwirklichung seiner Zwecke und Aufgaben betreibt das Laboratorium für Nano- und Quantenengineering ein eigenes Gebäude in Hannover mit Laboren, Geräten etc. und insbesondere Reinräumen.

*The LNQE would like to achieve the following goals*

- *Execute research and development which is directed to open up new applications or improve already known applications for micro- and nano-scale techniques;*
- *Arrange for practical application of scientific findings and to combine the forces of applied research and practice.*
- *Give education and training and to operate auxiliary facilities for the scientific work and its realization in applied research;*
- *Promote and improve the interdisciplinary cooperation of its individual members, in particular by implementing a shared pool of processing and diagnostic techniques, which is accessible by the individual members;*
- *Cooperate with other research centers, both in Germany and abroad.*

*To realize its mission the Laboratory of Nano and Quantum Engineering runs its own building in Hanover hosting labs, equipment, etc. and in particular clean room facilities.*

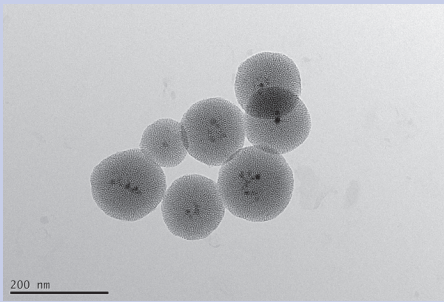


„LNQE-Nachmittag“ mit vier Fachvorträgen zum Thema Nanotechnologie und Energie mit anschließendem gemütlichen Beisammensein am 27. April 2016.  
*“LNQE afternoon” with four lectures on nanotechnology and energy, followed by a get-together on 27 April 2016.*

#### **Leibniz Research Center LNQE**

*Leibniz Universität Hannover has set up its own innovative organizational structure to promote interdisciplinary research, consisting of Leibniz Research Initiatives, Leibniz Research Centers and Leibniz Research Schools. The system enables scientists to pursue cutting-edge research across traditional subject and faculty boundaries. The LNQE is one of nine facilities currently ranked as a Leibniz Research Center.*

## Forschung Research



Nanoporöse magnetische Kern-Schale-Silica-Nanopartikel mit Magnetit-Kernen.

*Nanoporous magnetic core-shell silica nanoparticles with magnetite cores.*

(D. P. Warwas, P. Behrens/ACI)

Die Arbeitsgruppen des LNQE arbeiten Interdisziplinär über die Fachgrenzen hinweg zusammen auf dem Gebiet Nanotechnologie. Die Begriffe Nanoengineering, Nanoanalytik und Nanomaterialien kennzeichnen die Forschung des LNQE. Zusätzlich konzentriert sich das LNQE auf (zurzeit) drei übergreifende Forschungsschwerpunkte: Nanotechnologie für die Energieforschung, Nanotechnologie für die Sensorik und Nanotechnologie für die Biomedizintechnik & Nanomedizin.

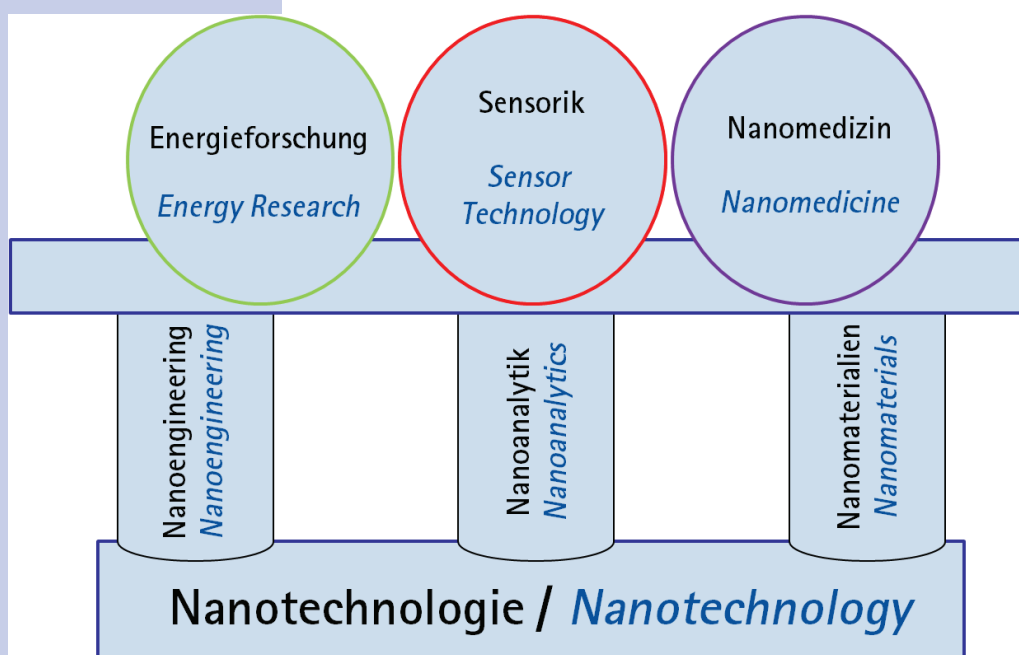
### Nanotechnologie

Die Nanotechnologie beschreibt die Erforschung und Manipulation von Dingen auf kleinsten Dimensionen. Generell beschäftigt sich die Nanotechnologie mit Strukturen im Größenbereich von 1-100 Nanometer in mindestens einer Raumrichtung. 100 Nanometer sind in etwa ein Tausendstel des Durchmessers eines normalen menschlichen Haares. Bei diesen kleinen Abmessungen treten Oberflächeneigenschaften gegenüber den Volumeneigenschaften der Materialien immer mehr in den Vordergrund und darüber hinaus müssen oft quantenphysikalische Effekte berücksichtigt werden.

*The work groups of the LNQE Interdisciplinary work across disciplinary boundaries along in the field of nanotechnology. The terms nanoengineering, nanoanalytics and nanomaterials featuring the research of the LNQE. In addition, the LNQE focuses on (currently) three overarching research areas: nanotechnology for energy research , nanotechnology for sensing and nanotechnology for biomedical engineering & nanomedicine.*

### Nanotechnology

*The nanotechnology describes the study and manipulation of objects at the smallest sizes. In general, nanotechnology deals with structures ranging in size from 1-100 nanometers in at least one spatial direction. 100 nanometers are roughly one-thousandth of the diameter of a normal human hair. With these small dimensions surface properties come to the forefront compared with the bulk properties of materials and often quantum effects must be considered.*



Forschungsstruktur des Laboratoriums für Nano- und Quantenengineering.  
*Research structure of the Laboratory of Nano and Quantum Engineering.*

## Nanoengineering

Nanoengineering ist das Engineering auf der Nanoskala, also das gezielte künstliche Herstellen von Strukturen der Nanotechnologie wie zum Beispiel winzigster Transistoren auf Computerchips. Der mit dem Nanoengineering eng verwandte Begriff Quantenengineering zielt auf die Erzeugung und Manipulation eines definierten Quantenzustandes ab, wie zum Beispiel der Realisierung eines Bose-Einstein-Kondensats oder eines Bauelements mit gezielt eingestelltem Elektronenspin. Die Größe solcher Systeme ist oft ebenfalls im Nanometerbereich.

Beispiele für aktuelle Forschungsarbeiten im Laboratorium sind Quanteninterferenz und Quantentransport in niedrigdimensionalen Systemen, Quantensensoren auf der Basis von integrierten atomoptischen Systemen, atomare Systeme in Nanostrukturen, atomare Inertialsensoren, Einsatz von einfachen und gekoppelten Quantenpunktsystemen bei der Quanteninformationsverarbeitung sowie Spineffekte. Anwendung von nanoskaligen Materialien in Dünnschichtsolarzellen, Herstellung und Charakterisierung von Photonischen Kristallen, Nanostrukturen und Bausteinen für die Plasmonik, Kohärenzeffekte bei der Elektronenloch-Spin-Kopplung und die Anwendung von spinpolarisierten Ladungsträgern in Halbleiterlasern.

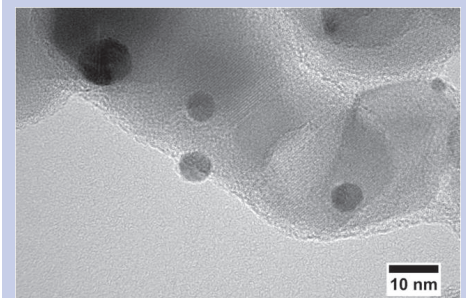
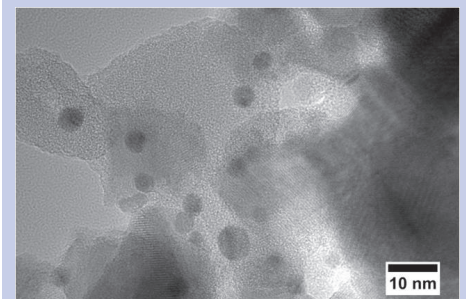
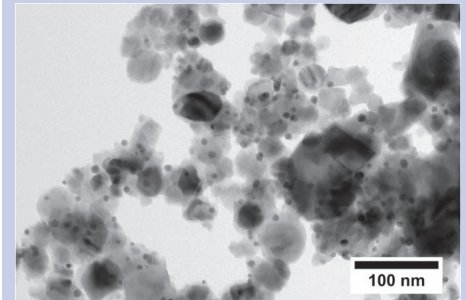
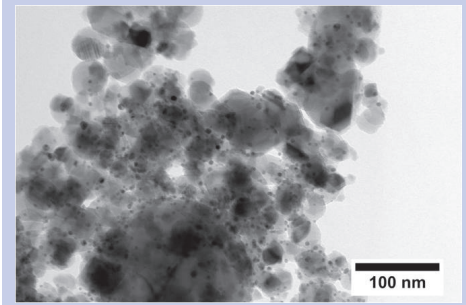
Für die Herstellung kleinster Strukturen werden vielfältigste Techniken verwendet, wobei die Weiterentwicklung und das Verständnis dieser Techniken zum Teil selbst Gegenstand der Forschung sind. Die Strukturierungstechniken sind zum Beispiel Fotolithographie, Elektronenstrahlolithographie, Oberflächen-Laserstrukturierung, 3D Two-Photon Lithographie, Oberflächenbearbeitung mit dem Rasterkraftmikroskop und Strukturierung mit dem Rastertunnelmikroskop. Hinzu kommen die Dünnschichttechniken der Halbleitertechnologie wie Aufdampfen, Sputtern, Tempern, chemische Gasphasenabscheidung, Molekularstrahlepitaxie, Implantieren von Ionen, Oxidation, Ätzprozesse (Plasmaätzen, RIE und Nasschemisches Ätzen) und Atomlagenabscheidung.

## Nanoengineering

*Nano engineering is engineering on the nanoscale, i. e. the selective artificial fabrication of nanotechnology structures such as tiny transistors on computer chips. The closely related term, quantum engineering, aims to produce and manipulate a defined quantum state, such as the realization of a Bose-Einstein condensate or an electronic device with controllable electron spin. The size of such systems is also often in the nanometer range.*

*Examples of current research in the laboratory are quantum interference and quantum transport in low dimensional systems, quantum sensors based on integrated atom-optical systems, atomic systems in nanostructures, atomic inertial sensors, use of single and coupled quantum dot systems in quantum information processing, and spin effects. Applications of nanoscale materials in thin film solar cells, characterization of photonic crystals, nanostructures and devices for plasmonics, coherence effects at electron-hole-spin coupling and application of spin-polarized carriers in semiconductor lasers.*

*For the manufacture of very small structures a wide variety of techniques are used in the laboratory. The further development and understanding of these techniques is in part the subject of the research. The structuring techniques are for example photolithography, electron beam lithography, laser surface structuring, 3D two-photon lithography, surface processing with an atomic force microscope and patterning with the scanning tunneling microscope. In addition the thin film techniques of semiconductor technology are used such as evaporation, sputtering, annealing, chemical vapor deposition, molecular beam epitaxy, implanting ions, oxidation and etching processes (plasma etching, etching with RIE and wet chemical etching) and atomic layer deposition.*



TEM-Messungen von gold-dotierten superparamagnetischen Nanopartikeln als Katalysator für die Oxidation von Alkoholen.  
*TEM measurements of gold-doped superparamagnetic nanoparticles as catalyst for oxidations of alcohols.*  
 (S. R. Chaudhuri, A. Kirschning/OCl)

## Nanoanalytik

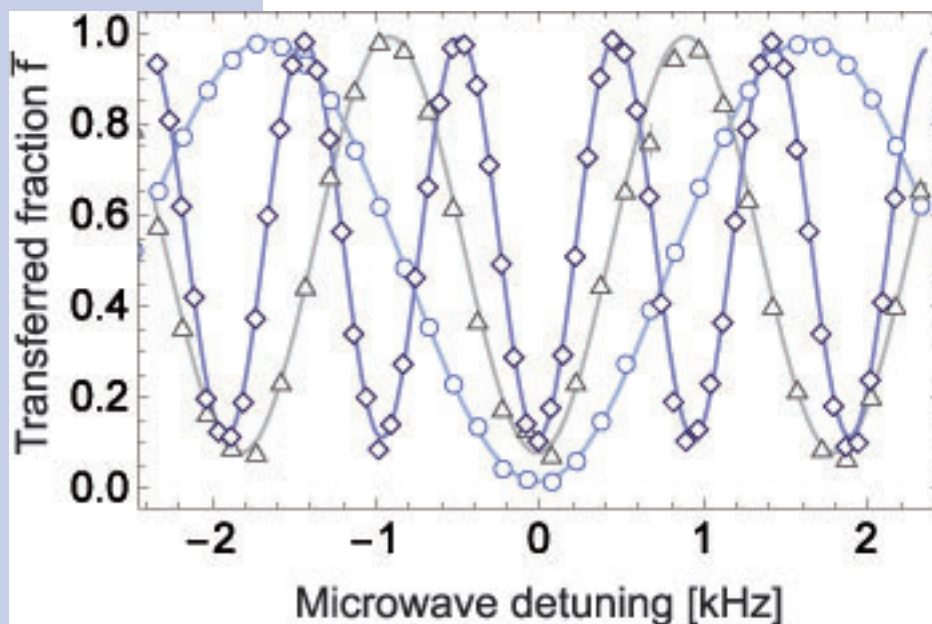
Die künstlich erzeugten Strukturen und Materialien werden auf vielfältigste Art untersucht und analysiert. Die Analytik im Nanometerbereich benötigt unterschiedlichste und neuste Geräte und Verfahren. Die nötige technologische Ausrüstung steht den Arbeitsgruppen zentral im LNQE-Forschungsbau zur Verfügung (unter „Technologie im Forschungsbau“ auf der Website) und wird durch die Ausstattung in den Instituten (als „Gerätepool der Mitglieder“ auf der Website) ergänzt.

Als wichtige Verfahren der Nanoanalytik sind zu nennen: Transmissionselektronenmikroskopie (TEM), Rasterelektronenmikroskopie (REM), Rasterkraftmikroskopie (AFM), Rastertunnelmikroskopie (STM), Konfokalmikroskopie, Spektrale Ellipsometrie, Röntgen-Diffraktometrie etc.

## Nanoanalytics

*The artificially created structures and materials are investigated in a wide variety and analyzed. The analysis in the nanometer range requires variety and latest equipment and techniques. The necessary technological equipment is centrally located in the LNQE research building (under “Technology in the Research Building” on the website) and is complemented by the equipment in the institutions (as “Equipment Pool of the Members” on the website).*

*Important methods of nanoanalysis: transmission electron microscopy (TEM), scanning electron microscopy (SEM), atomic force microscopy (AFM), scanning tunneling microscopy (STM), confocal microscopy, spectral ellipsometry, X-ray diffraction etc.*



Ausgangssignal eines Atominterferometers. Die interferometrische Sequenz, basierend auf einem atomaren Zweistufensystem, besteht aus einem Mikrowellenimpuls, einer Wartezeit (der sogenannten Ramsey-Zeit) und einem zweiten Mikrowellenimpuls. Die Phasenverschiebung, die durch die Mikrowellenverstimmung (x-Achse) und die Ramsey-Zeit eingestellt wird, führt zu den Ramsey-Interferenzmuster im Bruchteil der Atome, die von dem Grundzustand auf den angeregten Wert (y-Achse) übertragen werden. Das Interferometer wird mit drei verschiedenen Ramsey-Zeiten betrieben.

*Output signal of an atom interferometer. The interferometric sequence, based on an atomic two-level system, consists of a microwave pulse, a waiting time (the so called Ramsey time) and a second microwave pulse. The phase shift, set by the microwave detuning (x-axis) and the Ramsey time, results in the Ramsey fringes in the fraction of atoms transferred from the ground state to the excited level (y-axis). The interferometer is operated with three different Ramsey times.*

(I. Kruse, C. Klempt/IQO)



## Nanomaterialien

Nanomaterialien verschiedenster Form, Stoffzusammensetzung und Größe im Nanometerbereich werden im Laboratorium hergestellt und untersucht. Nanopartikel besitzen aufgrund ihrer kleinen Abmessungen spezielle chemische und physikalische Eigenschaften, die sich deutlich von den Eigenschaften von makroskopischen Partikeln und Festkörpern unterscheiden. Die Ursache hierfür ist das große Verhältnis von Oberfläche zu Volumen der Nanopartikel, wodurch sie stark mit Ihrer Umgebung wechselwirken. Hinzu kommen gegebenenfalls quantenmechanische Effekte.

Die Herstellung von Nanopartikeln mit gezielt einstellbaren Eigenschaften, die Nutzbarmachung von Nanopartikeln für bestimmte Anwendungen und das physikalische Grundlagenverständnis von Nanopartikeln und deren Wirkungsweise stehen im Laboratorium im Vordergrund. Die Nanopartikel werden chemisch synthetisiert oder lasergestützt erzeugt.

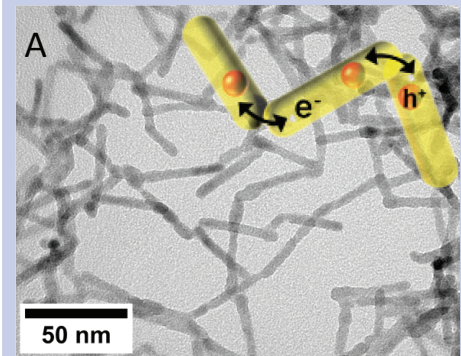
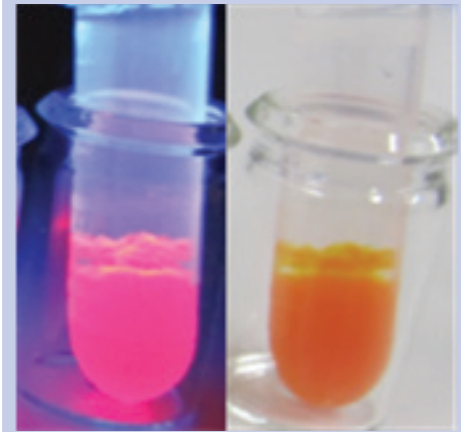
Aktuelle Forschungsvorhaben sind unter anderem Untersuchungen von Nanopartikeln für Farbstoff-Solarzellen, Beschichtungen mit Nanopartikeln für selbstreinigende Oberflächen, Nanopartikel mit photokatalytischen Eigenschaften zur Reinigung von Luft und Wasser, Überstrukturen von Nanopartikeln, erweiterte Formkontrolle von Nanopartikeln sowie biokompatible Nanomaterialien für die Medizin wie zum Beispiel Implantate für das Innenohr. Darüber hinaus wird immer auch die mögliche Toxizität von Nanomaterialien berücksichtigt und untersucht. Ein weiterer Schwerpunkt ist die Simulation auf der Nano-Ebene, es werden in Multiskalen-Analysen der Einfluss der Nanomaterialien und allgemein Grenzflächen auf makroskopische Objekten modelliert.

## Nanomaterials

*Nanomaterials of various shapes, composition, and size in the nanometer range are produced and analyzed in the laboratory. Nanoparticles due to their small size have special chemical and physical properties that differ significantly from the properties of macroscopic particles and solids. This is due to the large ratio of surface to volume of the nanoparticles, so that they strongly interact with their environment. Added to this in many cases is the increased importance of quantum mechanical effects.*

*The preparation of nanoparticles with controlled properties, the utilization of nanoparticles for specific applications and the fundamental physical understanding of nanoparticles and their function are in the foreground of the laboratory. The nanoparticles are synthesized chemically or produced via laser-based techniques.*

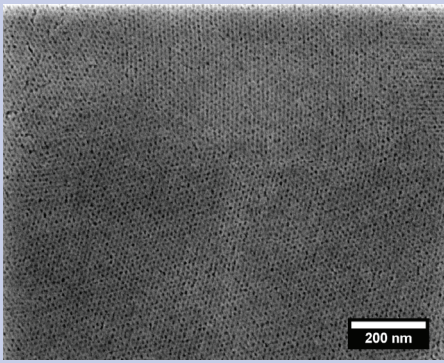
*Current research projects include studies of nanoparticles for dye solar cells, creating self-cleaning surfaces by nanoparticle coatings, nanoparticles with photocatalytic properties for the purification of air and water, superstructures of nanoparticles, advanced shape control of nanoparticles, and bio-compatible nanomaterials for medical applications such as implants for the inner ear. In addition, the potential toxicity of nanomaterials must always be considered and investigated. Another focus is the simulation and modeling at the nano level, in multi-scale analysis of the impact of nanomaterials and interfaces on macroscopic objects.*



Aerogele und Hydrogele aus CdSe/CdS Nanorods. Unten eine TEM-Aufnahme eines Aerogels und eine Skizze des entsprechenden Modells.

*Aerogels and hydrogels from CdSe/CdS nanorods. Below a TEM image of an aerogel and a sketch of the corresponding model.*

(S. Sánchez-Paradinas, D. Dorfs, S. Friebe, A. Freytag, A. Wolf, N. C. Bigall/PCI)



Geordnetes Nanoporensystem eines Titandioxidfilmes, hergestellt via Dip-Coating auf einem Wafer.

*Ordered nanoporous system of a titanium dioxide film, produced by dip-coating on a wafer.*

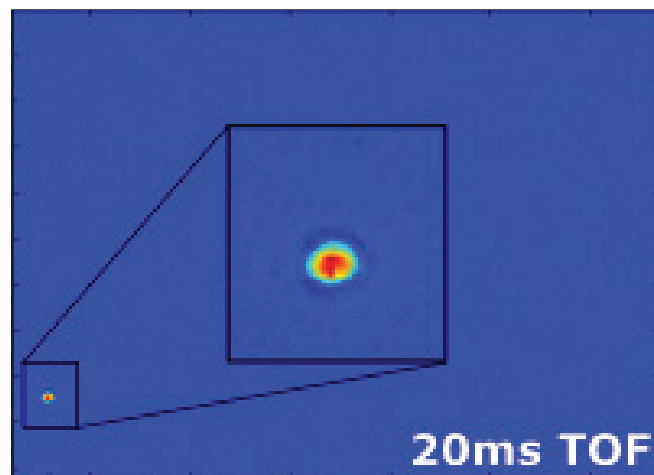
(P. Abendroth, D. Nettelroth, P. Behrens/ACI)

### Übergreifender Forschungsschwerpunkt: Nanotechnologie für Energieforschung

Energiewandlung, Energietransport und Energiespeicherung sind grundlegende Fragen für die Zukunft unserer Gesellschaft. Hier kann das neue Gebiet der Nanotechnologie wichtige Beiträge leisten. Der Energietransport auf der Nanoskala, sowie die Energiewandlung in nanostrukturierten Systemen stellen bis heute nur sehr wenig untersuchte Themenkomplexe dar. Allerdings können die auftretenden wissenschaftlichen Fragestellungen nur interdisziplinär von Naturwissenschaftlerinnen und Naturwissenschaftlern, von Ingenieurinnen und Ingenieuren gemeinsam bewältigt werden, da hierbei die grundlegenden Quanteneffekte in Nanostrukturen sowohl aus physikalischer als auch aus chemischer Sicht untersucht werden müssen und diese Effekte nur nutzbar gemacht werden können, wenn auch materialwissenschaftliche und ingenieurwissenschaftliche Aspekte berücksichtigt werden. Für die Bearbeitung dieser Fragestellungen sind deshalb interdisziplinär ausgebildete Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler notwendig.

### Overarching research areas: nanotechnology for energy research

*Energy conversion, energy transport and energy storage are fundamental issues for the future of our society. Here, the new field of nanotechnology can make important contributions. The energy transport at the nanoscale, as well as the conversion of energy in nanostructured systems represent today very little investigated topics. However, the occurring scientific questions can only be interdisciplinary tackled jointly by natural scientists and engineers, since in this case the basic quantum effects in nanostructures must be examined from both a physical and a chemical perspective, and these effects can only be made available when materials science and engineering aspects are considered. Therefore interdisciplinary trained scientists are necessary to deal with these issues.*



Absorptionsbild eines Bose-Einstein-Kondensats mit  $4 \times 10^5$  Atomen, das mit einem Atom-Chip nach 20 ms freier Expansion erzeugt wurde.

*Absorption image of a Bose-Einstein-Condensate with  $4 \times 10^5$  atoms created with an atom chip after 20 ms of free expansion.*

(M. Wahnschaffe, A. Bautista-Salvador, C. Ospelkaus, W. Herr, J.-B. Wang, M. Sa-helghozin, S. Seidel and E. M. Rasel/IQO)

## Übergreifender Forschungsschwerpunkt: Nanotechnologie für Sensorik

Im Bereich Sensorik spielt Nanotechnologie eine immer größere Rolle. Sensoren mit nanoskaligen Oberflächen, Sensoren, die Informationen aus der nanoskopischen Welt in die makroskopische Welt übertragen und Sensoren, die Nanoeffekte als Sensorprinzip nutzen, können zusammenfassend als Nanosensoren definiert werden. Ziel ist zum einen eine deutliche Verbesserung der Empfindlichkeit und Präzision mit Nanosensoren gegenüber herkömmlichen Sensoren, zum anderen aber auch die Möglichkeit zur Detektion von Dingen, die vorher nicht möglich waren, wie z. B. Schnelltests für Krebs oder der gezielte Nachweis von Einzelmolekülen. Gegenwärtig gibt es viele mögliche Herstellungsstrategien für Nanosensoren, darunter Top-down-Lithographie, Bottom-up-Assembly und der molekulare Selbstorganisation.

## Nanotechnologie für die Biomedizintechnik & Nanomedizin

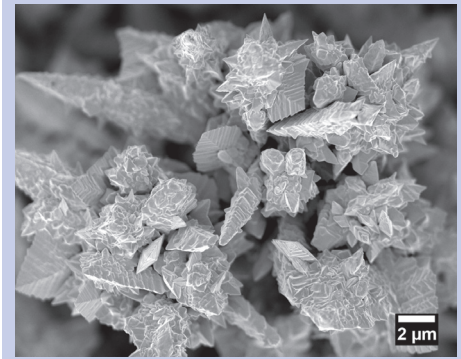
Im Bereich Medizin kommt Nanotechnologie immer häufiger zum Einsatz. Zum Beispiel werden im LNQE Nanopartikel und Nanomaterialien für ein kontrolliertes Drug Delivery hergestellt und charakterisiert, z.B. durch Ausnutzung der magnetischen Hyperthermie; bei Implantaten wird die Wechselwirkung mit dem Körper moduliert; neuronale Elektroden werden in ihrer Funktion verbessert; mit Lasertechniken werden Scaffolds für das Tissue Engineering hergestellt, die dann mit Zellen besiedelt werden; Nanofibers werden für den Bau neuerartiger Ionenmobilitätsspektrometer für die Atemgasanalyse verwendet.

## Overarching research areas: nanotechnology for sensing

*In sensor technologies, nanotechnology plays an increasingly important role. Sensors with nanoscale surfaces, sensors that transfer information from the nanoscopic world in the macroscopic world and sensors that use nanoeffects as sensor principle can be defined as nanosensors in summary. The aim is on the one hand a significant improvement in sensitivity and precision with nanosensors over conventional sensors, and on the other hand, the possibility of detecting things that were previously not possible, such as rapid tests for cancer or specific detection of individual molecules. There are currently many possible strategies for producing nano-sensors, including top-down lithography, bottom-up assembly and molecular self-assembly.*

## Nanotechnology for Biomedical Engineering & Nanomedicine

*In the area of medicine, nanotechnology is increasingly used. For example nanoparticles and nanomaterials for controlled drug delivery are produced and characterized in the LNQE, for example, by utilizing the magnetic hyperthermia; in implants, the interaction is modulated with the body; Neural electrodes are improved in function; Laser techniques scaffolds for tissue engineering are produced, which are then seeded with cells; Nanofibers are used for the construction of novel ion mobility spectrometer for respiratory gas analysis.*



REM-Aufnahme von dendritisch gewachsenem Gold (für Anwendung in Quecksilbersensoren).  
SEM image of dendritically grown gold (for use in mercury sensors).  
(K. D. Kreisköther, D. Nettelroth, P. Behrens/ACI)

## Mitglieder Members



**Prof. Dr. Detlef W. Bahnemann**  
 Institut für Technische Chemie  
 Leibniz Universität Hannover  
 Callinstraße 3  
 D-30167 Hannover  
 Phone: +49 (0)511 762 5560  
 Fax: +49 (0)511 762 2774  
 bahnmann@iftc.uni-hannover.de  
 www.tci.uni-hannover.de/photochemie.html

Kernkompetenzen/*Core competencies:*

- Photokatalyse/*Photo catalysis*
- Selbstreinigende, superhydrophile und antibakterielle Oberflächen/*Self-cleaning, superhydrophilic, and antibacterial surfaces*
- Metall- und Halbleiter-Nanopartikel/*Metal and semiconductor particles*
- Nanokristalline transparente Beschichtungen/*Nanocrystalline transparent coatings*
- Funktionsprüfungen nach DIN, CEN und ISO/*Functional test according to DIN, CEN, and ISO*



**Prof. Dr.-Ing. Bernd-Arno Behrens**  
 Institut für Umformtechnik und Umformmaschinen  
 Leibniz Universität Hannover  
 An der Universität 2  
 D-30823 Garbsen  
 Phone: +49 (0)511 762 2164  
 Fax: +49 (0)511 762 3007  
 behrens@ifum.uni-hannover.de  
 www.ifum.uni-hannover.de

Kernkompetenzen/*Core competencies:*

- Blechumformung/*Sheet metal forming*
- Massivumformung/*Massive forming*
- Umformmaschinen/*Metal forming machines*
- CA – Techniken/*Computer aided engineering*
- Numerische Methoden/*Numerical methods*
- Biomedizintechnik/Prothesendesign/*Biomedical Engineering/prosthesis design*



**Prof. Dr. Peter Behrens**  
 - Vorstand LNQE -  
 - *Executive Board LNQE*-  
 Institut für Anorganische Chemie  
 Leibniz Universität Hannover  
 Callinstraße 9  
 D-30167 Hannover  
 Phone: +49 (0)511 762 3660  
 Fax: +49 (0)511 762 3006  
 peter.behrens@acb.uni-hannover.de  
 www.acb.uni-hannover.de

Kernkompetenzen/*Core competencies:*

- Kontrollierte Synthese von Festkörpern, Materialien und Nanomaterialien/*Controlled synthesis of solid-state compounds, materials, and nanomaterials*
- Sol-Gel-Prozesse, kontrollierte Kristallisation, Solvothermalsynthesen/*Sol-gel processes, controlled crystallisation, solvothermal syntheses*
- Nanoporöse Materialien/*Nanoporous materials*
- Biomaterialien/*Biomaterials*
- Biomineralisation/*Biomineralisation*
- Modellierung von Festkörpern/*Modeling of solid-state compounds*

Kernkompetenzen/*Core competencies:*

- Überstrukturen von Nanopartikeln (superparamagnetisch, plasmonisch, halbleitend)/*Superstructures of nanoparticles (superparamagnetic, plasmonic, semiconducting)*
- Hydrogele und Aerogele aus kolloidalen Nanopartikeln/*Hydrogels and aerogels from colloidal nanoparticles*
- Kolloidale Überkristalle von Nanopartikeln/*Colloidal supercrystals of nanoparticles*
- Multifunktionale Polymernanobeads/*Multifunctional polymernanobeads*
- Funktionalisierung und Phasentransfer von Nanopartikeln/*Functionalization and phase transfer of nanoparticles*

**Dr. Nadja Bigall**

Institut für Physikalische Chemie und Elektrochemie  
Leibniz Universität Hannover  
Callinstr. 3A  
D-30167 Hannover  
Phone: +49 (0)511 762 14439  
Fax: +49 (0)511 762 19121  
nadja.bigall@pci.uni-hannover.de  
www.bigall.pci.uni-hannover.de

Kernkompetenzen/*Core competencies:*

- Simulation von Solarzellen/*Simulation of solar cells*
- Si-Materialforschung/*Si material research*
- Si-Dünnschichtzellen/*Si thin-film solar cells*
- Si-Waferzellen/*Si wafer cells*
- Zellcharakterisierung/*Characterisation of solar cells*
- Modultechnologie/*Module technology*
- Selektive Schichten/*Selective layers*
- Sonnenkollektoren/*Solar thermal collectors*

**Prof. Dr.-Ing. Rolf Brendel**

Institut für Festkörperphysik  
Abteilung Solarenergie  
Leibniz Universität Hannover  
Appelstraße 2  
D-30167 Hannover  
Phone: +49 (0)511 762 5863  
Fax: +49 (0)511 762 2904  
rolf.brendel@isfh.de  
www.isfh.de

Kernkompetenzen/*Core competencies:*

- Katalyse/*Catalysis*
- Membrane/*Membranes*
- Poröse Materialien/*Porous materials*
- Wirt/Gast-Komposite/*Host-guest composites*
- Brennstoffzellen/*Fuel cells*
- Farbstoff-Solarzellen/*Dye solar cells*
- Elektronenmikroskopie/*Electron microscopy*

**Prof. Dr. Jürgen Caro**

Institut für Physikalische Chemie und Elektrochemie  
Leibniz Universität Hannover  
Callinstraße 3-3a  
D-30167 Hannover  
Phone: +49 (0)511 762 3175  
Fax: +49 (0)511 762 19121  
juergen.caro@pci.uni-hannover.de  
www.caro.pci.uni-hannover.de





**Prof. Dr. Boris Chichkov**  
 Laser Zentrum Hannover e. V.  
 Nanotechnology Division  
 Hollerithallee 8  
 D-30419 Hannover  
 Phone: +49 (0)511 2788 316  
 Fax: +49 (0)511 2788 100  
 b.chichkov@lzh.de  
 www.lzh.de

- Kernkompetenzen/*Core competencies*:
- Nanotechnologie mit dem Laser/*Nanotechnology with laser*
  - Zwei-Photonen-Polymerisation/*Two-photon polymerization*
  - Charakterisierung von Laserprozessmissionen/*Characterisation of laser process emissions*
  - Nichtlineare maskenlose Lithographie/*Nonlinear maskless lithography*
  - Laserbasierte Nanopartikel-Erzeugung/*Laser-based nanoparticle generation*
  - EUV-Messtechnik/*EUV-Metrology*



**Dr. Dirk Dorfs**  
 Institut für Physikalische Chemie und Elektrochemie  
 Leibniz Universität Hannover  
 Callinstraße 3A  
 D-30167 Hannover  
 Phone: +49 (0)511 762 14440  
 Fax: +49 (0)511 762 19121  
 dirk.dorfs@pci.uni-hannover.de  
 www.pci.uni-hannover.de/ag\_dorfs.html

- Kernkompetenzen/*Core competencies*:
- Synthese von kolloidalen Nanopartikeln (Halbleiter und Metalle)/*Synthesis of colloidal nanoparticles (semiconductors and metals)*
  - Kolloidale Nanopartikel komplexer Zusammensetzung/*Colloidal nanoparticles of complex composition*
  - Erweiterte Formkontrolle von Nanopartikeln (Stäbchen, verzweigt, hohl, etc.)/*Advanced shape control of nanoparticles (rods, branched, hollow, etc.)*
  - Optische Eigenschaften von Nanopartikeln/*Optical properties of nanoparticles*
  - Wechselwirkungen verschiedener Nanopartikel (Metall/Halbleiter etc.)/*Interactions of various nanoparticles (metal / semiconductor, etc.)*



**Prof. Dr. Wolfgang Ertmer**  
 Institut für Quantenoptik  
 Leibniz Universität Hannover  
 Welfengarten 1  
 D-30167 Hannover  
 Phone: +49 (0)511 762 2231  
 Fax: +49 (0)511 762 2211  
 ertmer@iqo.uni-hannover.de  
 www.iqo.uni-hannover.de

- Kernkompetenzen/*Core competencies*:
- Quantenengineering/*Quantum engineering*:
  - Optische Atomuhren/*Optical atom clocks*
  - Bose-Einstein-Kondensate/*Bose-Einstein condensates*
  - Ultrakalte Bose-Fermi Mischungen/*Ultra-cold Bose-Fermi mixtures*
  - Rein-optische Atomlaser/*Pure optical atom lasers*
  - Ultrakalte Neon-Atome/*Ultra-cold neon atoms*
  - Quantensensoren/*Quantum sensors*:
  - Sagnac-Interferometrie/*Sagnac interferometry*
  - Atominterferometrie/*Atom interferometry*
  - Atomoptik mit Mikrostrukturen/*Atom optics with microstructures*
  - Fundamentale Physik im Weltraum/*Fundamental physics in space*
  - Lasermedizin und Biophotonik/*Laser medicine and biophotonics*

Kernkompetenzen/*Core competencies:*

- Erzeugung, Stabilisierung, Funktionalisierung und Anwendung von Nanopartikeln und Nanostrukturen/*Fabrication, stabilization and application of nanoparticles and nanostructures*
- Partikelstabilisierung und Funktionalisierung/*stabilization and functionalization of nanoparticles*
- Maßgeschneiderte Nanokomposite und Nanopartikel-Dünnschichten sowie magnetische Nanomaterialien/*Optimized polymer nanocomposite materials and nanoparticulate and nanocomposite thin films as well as magnetic nanomaterials*

## Prof. Dr. Georg Garnweitner

Institut für Partikeltechnik  
Technische Universität Braunschweig  
Volkmaroder Str. 5  
D-38104 Braunschweig  
Phone: +49 (0)531 391 9615  
Fax: +49 (0)531 391 9633  
g.garnweitner@tu-bs.de  
www.ipat.tu-bs.de

Kernkompetenzen/*Core competencies:*

- Quanteneffekte/*Quantum Effects*
- Nanostrukturierung/*Nanostructuring*
- Niederdimensionale Systeme/*Low dimensional systems*
- Nanoelektronik/*Nanoelectronics*
- Quanten Hall Effekt/*Quantum Hall effect*
- Quantenpunkte/*Quantum dots*

## Prof. Dr. Rolf J. Haug

- Vorstand LNQE -  
- *Executive Board LNQE*-  
Institut für Festkörperphysik  
Abteilung Nanostrukturen  
Leibniz Universität Hannover  
Appelstraße 2  
D-30167 Hannover  
Phone: +49 (0)511 762 2901  
Fax: +49 (0)511 762 2904  
haug@nano.uni-hannover.de  
www.nano.uni-hannover.de

Kernkompetenzen/*Core competencies:*

- Basistechnologien in der organischen Synthese/*Enabling technologies in organic synthesis:*
  - Festphasen-unterstützte Synthese/*Solid-phase assisted synthesis*
  - Mikroreaktoren/*microreactors*
  - neuartige Strategien zur Immobilisierung von Katalysatoren/*novel immobilization strategies for catalysts*
  - Methodenentwicklung in der organischen Synthese/*methodology development in organic synthesis.*
- Naturstoffsynthese/*Natural product synthesis:*
  - Totalsynthese und Mutasyntese von biologisch aktiven Naturstoffen - Antiinfektiva, Antitumormittel, etc/*total synthesis and mutasynthesis of biologically active natural products - antiinfectives, antitumor agents, etc*
  - Natürliche Produkte als Werkzeuge für die Medikamentenforschung und Auffinden von biologischen Target/*Natural products as tools for drug research and finding of biological targets.*

## Prof. Dr. Andreas Kirschning

Institut für Organische Chemie  
Leibniz Universität Hannover  
Schneiderberg 1B  
D-30167 Hannover  
Phone: +49 (0)511 762 4614  
Fax: +49 (0)511 762 3011  
andreas.kirschning@oci.uni-hannover.de  
www.akoci.uni-hannover.de/AK\_Kirschning/





**PD Dr. Carsten Klempt**  
Institut für Quantenoptik  
Leibniz Universität Hannover  
Welfengarten 1  
D-30167 Hannover  
Phone: +49 (0)511 762 2238  
Fax: +49 (0)511 762 2211  
klempt@iqo.uni-hannover.de  
www.iqo.uni-hannover.de

Kernkompetenzen/*Core competencies:*

- Ultrakalte Materie/*Ultra-cold matter*
- Atomare Bose-Einstein-Kondensate und quantenentartete Fermigase/*Atomic Bose-Einstein condensates and quantum degenerate Fermi gases*
- Ultrakalte Moleküle/*Ultra-cold molecules*
- Nichtklassische Materiewellen/*Non-classical matter waves*
- Squeezing und Verschränkung von neutralen Atomen/*Squeezing and entanglement of neutral atoms*



**Prof. Dr. Michael Oestreich**  
Institut für Festkörperphysik  
Abteilung Nanostrukturen  
Leibniz Universität Hannover  
Appelstraße 2  
D-30167 Hannover  
Phone: +49 (0)511 762 3493  
Fax: +49 (0)511 762 2904  
oest@nano.uni-hannover.de  
www.nano.uni-hannover.de/oest/

Kernkompetenzen/*Core competencies:*

- Spinelektronik in Halbleitern/*Spinelectronics in semiconductors:*
- Spin-Rausch Spektroskopie/*Spin-noise spectroscopy*
- g-Faktor Spektroskopie/*g-Factor spectroscopy*
- Optische Spin-Auswahlregeln/*Optical spin-selection rules*
- Reduktion der Laserschwelle/*Reduction of laser threshold*
- Spin-Dephasierung/*Spin dephasing*
- Dynamik von Biexitonen/*Dynamics of biexcitons*



**Prof. Dr. Christian Ospelkaus**  
- Vorstand LNQE -  
- *Executive Board LNQE*-  
Institut für Quantenoptik  
Leibniz Universität Hannover  
Welfengarten 1  
D-30167 Hannover  
Phone: +49 (0)511 762 17644  
Fax: +49 (0)511 762 2211  
christian.ospelkaus@iqo.uni-hannover.de  
www.iqo.uni-hannover.de

Kernkompetenzen/*Core competencies:*

- Quantenkontrolle gespeicherter Ionen in Hinblick auf Quanteninformation und Präzisionsmessungen/*Quantum control of stored ions in terms of quantum information and precision measurements*



Kernkompetenzen/*Core competencies:*

- Atomare und molekulare Quantengase und ultrakalte Moleküle/*Atomic and molecular quantum gases and ultracold molecules*

## Prof. Dr. Silke Ospelkaus

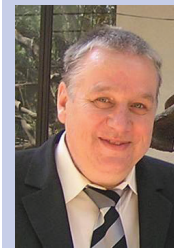
Institut für Quantenoptik  
Leibniz Universität Hannover  
Welfengarten 1  
D-30167 Hannover  
Phone: +49 (0)511 762 17645  
Fax: +49 (0)511 762 2211  
silke.ospelkaus@iqo.uni-hannover.de  
www.iqo.uni-hannover.de

Kernkompetenzen/*Core competencies:*

- Neuartigen Materiallösungen für die Si-basierende Elektronik/*New materials for Si-based electronics*
- Alternative Bauelemente-Konzepte, neue nanoelektronische Funktionalität/*Alternative device concepts, new nanoelectronic functionalities*
- Kristalline Seltener-Erden-Oxide/*Crystal-line rare earth oxides*
- Wachstum von ultradünnen epitaktischen Heterostrukturen mit vergrabenen Metalloxiden in Silizium/*Growth of ultra-thin epitaxial heterostructures with buried metal oxides on silicon*
- Engineering der Grenzflächen von 2D-Nanostrukturen/*Interface engineering of 2D nanostructures*

## Prof. Dr. H. Jörg Osten

Institut für Materialien und Bauelemente der Elektronik  
Leibniz Universität Hannover  
Schneiderberg 32  
D-30167 Hannover  
Phone: +49 (0)511 762 4211  
Fax: +49 (0)511 762 4229  
osten@mbe.uni-hannover.de  
www.mbe.uni-hannover.de

Kernkompetenzen/*Core competencies:*

- Leitfähigkeit in reduzierten Dimensionen/*Conductivity in reduced dimensions*
- Molekulare Elektronik/*Molecular electronics*
- Funktionalisierte Isolatoren/*Functionalized insulators*
- Nanostrukturierte Metall/Isolator-Systeme/*Nanostructured metal/insulator systems*

## Prof. Dr. Herbert Pfnür

Institut für Festkörperphysik  
Abteilung Atomare und molekulare Strukturen  
Leibniz Universität Hannover  
Appelstraße 2  
D-30167 Hannover  
Phone: +49 (0)511 762 4819  
Fax: +49 (0)511 762 4877  
pfnuer@fkp.uni-hannover.de  
www.fkp.uni-hannover.de/home.html





**Prof. Dr. Ernst Rasel**  
Institut für Quantenoptik  
Leibniz Universität Hannover  
Welfengarten 1  
D-30167 Hannover  
Phone: +49 (0)511 762 19203  
Fax: +49 (0)511 762 2211  
rasel@iqo.uni-hannover.de  
www.iqo.uni-hannover.de

Kernkompetenzen/*Core competencies:*

- Atomoptik/*Atom Optics*
- Quantenoptik/*Quantum Optics*
- Präzisionsensoren für Raum und Zeit/  
*Precision Sensors of Space and Time*



**Prof. Dr. Franz Renz**  
Institut für Anorganische Chemie  
Leibniz Universität Hannover  
Callinstraße 9  
3D-0167 Hannover  
Phone: +49 (0)511 762 4541  
Fax: +49 (0)511 762 19032  
franz.renz@acd.uni-hannover.de  
www.ak-renz.uni-hannover.de

Kernkompetenzen/*Core competencies:*

- Koordinationschemie/*Coordination chemistry*
- Molekulare Schalter/*Molecular switches*
- Mößbauer Spektroskopie/*Mößbauer spectroscopy*



**Prof. Dr. Detlev Ristau**  
Laser Zentrum Hannover e. V., Laser  
Components Department  
Hollerithallee 8  
30419 Hannover  
Phone: +49 511 2788 240  
Fax: +49 511 2788 100  
d.ristau@lzh.de  
www.lzh.de/de/abteilungen/laserkomponenten

Kernkompetenzen/*Core competencies:*

- Entwicklung und präzise Kontrolle von Ionenprozessen zur Herstellung hochwertiger optischer Schichten / *Development and precise control of modern ion processes for the production of high quality and stable optical coatings*
- Charakterisierung optischer Laserkomponenten / *Characterization of optical laser components*

Kernkompetenzen/*Core competencies:*

- Graphen und Nanostrukturierung von Graphen/*Graphene and nanostructuring of graphene*
- Funktionalisierung von Halbleiteroberflächen/*Functionalization of semiconductor surfaces*
- Korrelierte elektronische Systeme/*Correlated electronic systems*
- Kollektive Phänomene/*Collective phenomena*
- Transport in niedrigdimensionalen Strukturen/*Transport in low dimensional structures*

## Prof. Dr. Christoph Tegenkamp

Institut für Festkörperphysik  
Abteilung Atomare und molekulare Strukturen  
Leibniz Universität Hannover  
Appelstraße 2  
D-30167 Hannover  
Phone: +49 (0)511 762 2542  
Fax: +49 (0)511 762 4877  
pfnuer@fkp.uni-hannover.de  
www.fkp.uni-hannover.de/home.html

Kernkompetenzen/*Core competencies:*

- Silizium-basierte nano- und optoelektronische Bauelemente/*Silicon-based nanoelectronic and optoelectronic devices*
- Materialien für optoelektronische Bauelemente auf Siliziumsubstraten/*Materials for optoelectronic devices on silicon substrates*
- Molekularstrahlepitaxie mit Silizium und Germanium/*Molecular beam epitaxy of silicon and germanium*
- Modifikation der Hetero-Epitaxie mit Surfactants/*Modification of heteroepitaxy with surfactants*
- Herstellung und Charakterisierung von Si/Ge-epitaktischen Filmen und Hetero-Bauelementen/*Fabrication and characterization of Si/Ge-epitaxial films and heterodevices*

## Prof. Dr.-Ing. Tobias Wietler

Institut für Materialien und Bauelemente der Elektronik  
Leibniz Universität Hannover  
Schneiderberg 32  
D-30167 Hannover  
Phone: +49 (0)511 762 5042  
Fax: +49 (0)511 762 4229  
wietler@mbe.uni-hannover.de  
www.mbe.uni-hannover.de

Kernkompetenzen/*Core competencies:*

- Dünnschichttechnik/*Thin Film Technology*
- Mechanische Mikrobearbeitung und -montage/*Mechanical Micromachining and Microassembly*
- Mikrotribologie/*Microtribology*
- Konzepte im Bereich der Aus- und Weiterbildung in der Mikrosystemtechnik/*Concepts of education and advanced training in microtechnology*
- Aufbau- und Verbindungstechnik auf Waferniveau/*Assembly and packaging at wafer level*

## Dr.-Ing. Marc Christopher Wurz

- Vorstand LNQE -  
- *Executive Board LNQE*-  
Institut für Mikroproduktionstechnik  
Leibniz Universität Hannover  
An der Universität 2  
D-30823 Garbsen  
Phone: +49 (0)511 762 5102  
Fax: +49 (0)511 762 2867  
rissing@imt.uni-hannover.de  
www.impt.uni-hannover.de





**Prof. Dr.-Ing. Stefan Zimmermann**

- Vorstand LNQE -

- *Executive Board LNQE* -

Institut für Grundlagen der Elektrotechnik  
und Messtechnik

Leibniz Universität Hannover

Appelstraße 9a

D-30167 Hannover

Phone: +49 (0)511 762 4671

Fax: +49 (0)511 762 3917

[zimmermann@geml.uni-hannover.de](mailto:zimmermann@geml.uni-hannover.de)

[www.geml.uni-hannover.de](http://www.geml.uni-hannover.de)

Kernkompetenzen/*Core competencies:*

- Sensorik und Messtechnik/*Sensors and Measurement Science*
- Medizin- und Sicherheitstechnik/*Medical and Safety Technology*
- Mikrosystemtechnik/*Micro system technology*

## Emeriti

### Kernkompetenzen/*Core competencies:*

- Mikro- und Nanosensorik/*Micro- and nanosensors*
- Mikro- und Nanoaktorik/*Micro- and nanoactors*
- Mikro- und Nanotribologie/*Micro- and nanotribology*
- Mechanische Mikro- und Nanobearbeitung/*Mechanical micro- and nanoprocessing*
- Mikromontage/*Micro assembly*
- Management of Technology (MOT)/*Management of Technology (MOT)*
- Ausbildungskonzepte für Mikro- und Nanotechnik/*Educational concepts for mikro and nano technics*

### Prof. Dr.-Ing. Hans-Heinrich Gatzen

Institut für Mikrotechnologie  
Leibniz Universität Hannover  
An der Universität 2  
D-30823 Garbsen  
Phone: +49 (0)511 762 5103  
Fax: +49 (0)511 762 2867  
gatzen@imt.uni-hannover.de  
www.imt.uni-hannover.de



### Kernkompetenzen/*Core competencies:*

- MOSFETs mit hochbeweglichen heteroepitaktischen Germanium-Kanälen auf Siliziumsubstraten/*MOSFETs with high-mobility heteroepitaxial germanium channels on silicon substrates*
- Resonante Tunnelbauelemente/*Resonant-tunneling devices*
- Nanocluster MOS-Speicher/*Nanocluster MOS-memories*
- Gatedielektrika hoher Dielektrizitätskonstante/*Gate dielectrics with high dielectric constant*
- Degradationsphänomene in Gate- und Tunneloxiden/*Degradation phenomena in gate- and tunnel-oxides*
- Full-band Monte-Carlo Transportsimulation/*Full-band Monte-Carlo transport simulation*

### Prof. Dr. Karl R. Hofmann

Institut für Materialien und Bauelemente der Elektronik  
Leibniz Universität Hannover  
Schneiderber 32  
D-30167 Hannover  
Phone: +49 (0)511 762 4220  
Fax: +49 (0)511 762 4229  
hofmann@mbe.uni-hannover.de  
www.mbe.uni-hannover.de





Hannover  
School for  
Nanotechnology

15.03.2016

## Aktuell in 2016 News in 2016

### Niedersächsisches Promotionsprogramm zur Nanosensorik bewilligt

**Das mit zwölf Stipendien geförderte, koordinierte Doktorandenprogramm startet im Oktober 2016**

Das Niedersächsische Ministerium für Wissenschaft und Kultur hat zwölf neue Promotionsprogramme bewilligt, darunter das Programm „Hannover School for Nanotechnology: Interdisciplinary Approaches for Smallest Sensors“ (hsn-sensors). Bewilligt wurden zwölf Georg-Christoph-Lichtenberg-Stipendien sowie die dazu benötigten Sach- und Reisekosten. Die gesamte Förderungsumme beträgt 802.800,- Euro für den Zeitraum vom 01.10.2016 bis 30.09.2020. Die Projektleiter sind Hochschullehrerinnen und -Lehrer des Forschungszentrums Laboratorium für Nano- und Quantenengineering (LNQE) der Leibniz Universität und der Hochschule Hannover. Koordinator dieses Programms ist das LNQE-Vorstandsmitglied Professor Dr. Rolf Haug.

Das Ziel des Promotionsprogramms hsn-sensors ist die interdisziplinäre Ausbildung von jungen Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern auf dem hochaktuellen Gebiet der Nanotechnologie mit Fokussierung auf Nanosensoren. Im Bereich der Sensorik spielt Nanotechnologie eine immer größere Rolle. Sensoren mit nanoskaligen Oberflächen, Sensoren, die Informationen aus der nanoskopischen Welt in die makroskopische Welt übertragen und Sensoren, die Nanoeffekte als Sensorprinzip nutzen, können zusammenfassend als Nanosensoren definiert werden. Ein Hauptmerkmal von Nanosensoren ist ihre geringe Größe, wodurch sie ressourcenschonend hergestellt werden können und sich hervorragend in kleine elektronische Geräte integrieren lassen. Derartige Nanosensoren werden aufgrund neuer Messeffekte eine deutliche Verbesserung der Empfindlichkeit und Selektivität gegenüber herkömmlichen Sensoren besitzen.

### Lower Saxony PhD-program on Nanosensor Technology granted

**The with twelve scholarships funded, coordinated PhD program starts in October 2016**

*For the use of LNQE research building, the Executive Board decided a User Agreement.*

*The Lower Saxony Ministry for Science and Culture has approved twelve new doctoral programs, including the program "Hannover School for Nanotechnology: Interdisciplinary Approaches for Smallest sensors" (hsn-sensors). Granted were twelve Georg-Christoph-Lichtenberg-Scholarships and material and travel expenses for this purpose. The total grant amounts to 802 800,- EUR for the period from 01/10/2016 to 09/30/2020. The principal investigators are university teachers from the research center Laboratory of Nano and Quantum Engineering (LNQE) of Leibniz Universität and from the University of Applied Science and Arts in Hannover. Coordinator of the program is the LNQE board member Professor Dr. Rolf Haug.*

*The aim of the doctoral program hsn-sensors is the interdisciplinary training of young scientists on the highly topical field of nanotechnology with a focus on nanosensors. Nanotechnology is playing an ever greater role in the field of sensor technology. Sensors with nanoscale surfaces, sensors that transfer information from the nanoscopic world in the macroscopic world and sensors that use nanoeffects as sensor principle, can be collectively defined as nanosensors. A key feature of nanosensors is their small size which allows them to be produced cost-efficiently and excellently integrated into small electronic devices. Such nanosensors are based on new measurement effects have a significant improvement in sensitivity and selectivity compared to conventional sensors. However, they are allow also the*

Sie werden aber auch die Möglichkeit zur Detektion von Parametern und Stoffen erlauben, die vorher nicht detektiert werden konnten. Nanosensoren basieren häufig auf anderen Messprinzipien als herkömmliche Sensoren, was faszinierende Möglichkeiten für Forschung und Entwicklung eröffnet.

Die hsn-sensors hat sich zum Ziel gesetzt, in exzellenten Forschungsprojekten mit möglichst kurzer Promotionsdauer eine hervorragende Ausbildung ohne Qualitätsverlust zu ermöglichen. Das ambitionierte Ziel ist es, in der Dauer der Stipendien von maximal drei Jahren zu promovieren. Dies wird insbesondere durch eine Koordination der Masterzeit im Hinblick auf die spätere Promotion erreicht. Für die exzellentesten Studierenden bietet hsn-sensors eine Fast-Track Option an.

Die Fragestellungen und Themenkomplexe der Nanosensorik können nur durch enge Zusammenarbeit verschiedenster wissenschaftlicher Disziplinen bearbeitet und gelöst werden. Involviert sind Arbeitsgruppen aus Physik, Chemie und Ingenieurwesen. Allerdings hat jede Disziplin ihre eigene Fachsprache, sodass oft die Kommunikation über Fachgrenzen hinweg sehr schwierig ist. Deshalb besteht ein wesentliches Ziel von hsn-sensors darin, die Doktorandinnen und Doktoranden zu interdisziplinärem Arbeiten anzuleiten und zu schulen. Sie erhalten ein maßgeschneidertes Lehrangebot mit Nanotechnologie-Kursen als Basiskursen, Sensorik-Kursen als Spezialkurse, Seminaren, Kolloquien und Kursen zur Förderung von persönlichen Fähigkeiten. Entsprechend der interdisziplinären Ausrichtung dieses Promotionsprogramms wird jede Doktorandin, jeder Doktorand von zwei Dozenten unterschiedlicher Fachrichtungen betreut.

Die Hannover School for Nanotechnology stellt, aufbauend auf dem vom LNQE federführend initiierten Bachelor- und Masterstudiengang Nanotechnologie an der Leibniz Universität Hannover, die logische Fortführung

*possibility for the detection of parameters and materials that could not be detected before. Nanosensors are often based on different measurement principles than conventional sensors, which open up exciting possibilities for research and development.*

*The hsn-sensors has set itself the goal of providing outstanding education in excellent research projects with the shortest possible time to doctorate without quality loss. The ambitious goal is to obtain a PhD in the duration of fellowship in up to three years. This shall be achieved through a coordination of the master time in view of the subsequent promotion. For the most excellent students hsn-sensors offers a fast track option.*

*The issues and topics of the nanosensor technology can be worked on and solved only through close cooperation of different scientific disciplines. Involved are research groups from physics, chemistry and engineering. However, each discipline has its own scientific language, so often the communication across disciplines is very difficult. Therefore, a key objective of hsn-sensors is to guide the doctoral students to interdisciplinary work and train them. They will receive a tailor-made education program with nanotechnology courses as basic courses, sensing courses as special courses, seminars, symposia and courses to promote personal skills. According to the interdisciplinary nature of this doctoral program, each PhD student is supervised by two professors from different disciplines.*

*The Hannover School for Nanotechnology presents, building on the Bachelor and Master degree program nanotechnology at the Leibniz Universität Hannover initiated by the LNQE, the logical continuation of nanotechnology education in Hannover. Currently, the Hannover School for Nanotechnology, also promoted as Lower Saxony PhD program, qualifies PhD students on nanotechnology with a focus on transformation, transport and stor-*

der Nanotechnologie-Ausbildung in Hannover dar. Zurzeit bildet die Hannover School for Nanotechnology, ebenfalls gefördert als Niedersächsisches Promotionsprogramm, Doktorandinnen und Doktoranden in Nanotechnologie mit dem Schwerpunkt Transformation, Transport und Speicherung von Energie auf der Nanoskala aus. Nanosensorik ist der neue Spezialisierungsbereich, der ab Oktober 2016 startet.

Exzellente Promotionsbedingungen bietet hsn-sensors insbesondere durch die Kooperation der Partner. Durch die Grundlagenforschung in der Leibniz Universität Hannover und deren Umsetzung in Anwendungen und Demonstratoren in der Hochschule Hannover erfahren die Stipendiatinnen und Stipendiaten die ganze Forschungskette einer Idee zu einem möglichen Produkt. Durch den interdisziplinären regen Austausch untereinander, mit den verschiedenen Partnern in Instituten und den Gastaufenthalten bei internationalen Partnern werden die Studierenden maximal interdisziplinär, international und mit allen heutzutage immer stärker benötigten persönlichen Kompetenzen ausgebildet. Dies wird durch gezielte Weiterbildungen unterstützt. Ein besonderer Schwerpunkt von hsn-sensors soll darüber hinaus die Förderung von jungen Wissenschaftlerinnen sein, die in den meisten Natur- und Ingenieurwissenschaftlichen Fächern unterrepräsentiert sind.

Räumliches Zentrum von hsn-sensors wird (wie bereits jetzt auch schon) der LNQE-Forschungsbau sein. Alle Veranstaltungen, Workshops und Seminare finden dort statt und die hsn-Geschäftsstelle ist dort untergebracht.

*age of energy at the nanoscale. Nanosensor technology is the new specialization area which starts from October 2016.*

*Excellent doctorate conditions offers hsn-sensors in particular through cooperation with its partners. Through basic research in the Leibniz Universität Hannover and their implementation in applications and demonstrators in the University of Applied Science and Arts in Hannover the scholarship holders experience the whole research chain from an idea to a possible product. Through the interdisciplinary lively exchange among themselves, with the various partners in institutions and guest stays with international partners, students are educated maximally interdisciplinary, internationally and with all nowadays increasingly required personal skills. This is supported by targeted training. A special focus of hsn-sensors will be the promotion of young female scientists, which are underrepresented in most science and engineering subjects.*

*Spatial center of hsn-sensors will be (as already is) the LNQE research building. All events, workshops and seminars will be held there and the hsn-office is housed there.*



## Professor Caro wird Akademiemitglied der Sächsischen Akademie der Wissenschaften

### Auszeichnung für LNQE-Mitglied

Am 8. April 2016 wurden im Rahmen der Frühjahrstagung der Sächsischen Akademie der Wissenschaften (SAW) im Festsaal des Alten Rathauses zu Leipzig die neu gewählten Akademiemitglieder durch den Präsidenten der SAW, Prof. Dr. H. Wiesmeth, im Beisein des Ministerpräsidenten des Freistaats Sachsen, S. Tillich, in ihr Amt eingeführt. Wir freuen uns, dass sich unter den neuen Akademiemitgliedern auch das LNQE-Mitglied Prof. Dr. Jürgen Caro vom Institut für Physikalische Chemie und Elektrochemie befindet.

## Verstärkung im Vorstand

**Professor Christian Ospelkaus (Quantenoptik) und Dr.-Ing. Marc Christopher Wurz (Mikroproduktionstechnik) in den Vorstand gewählt.**

Der Vorstand des LNQE erhält doppelte Verstärkung:

Prof. Dr. Christian Ospelkaus vom Institut für Quantenoptik erforscht die Quantenkontrolle gespeicherter Ionen in Hinblick auf Quanteninformation und Präzisionsmessungen. Seine Gruppe betreibt Labore an der Leibniz Universität Hannover und an der PTB in Braunschweig, wo Prof. Ospelkaus die Arbeitsgruppe „Trapped-Ion Quantum Engineering“ leitet.

Dr.-Ing. Marc Christopher Wurz ist Oberingenieur am Institut für Mikroproduktionstechnik. Die Kernkompetenzen des Institutes für Mikroproduktionstechnik liegen im Bereich der Dünnschichttechnik insbesondere in der Mikroaktorik und Mikrosensorik, den Bereichen der mechanischen Mikrobearbeitung und - Montage, Aufbau- und Verbindungstechnik sowie Mikrotribologie. Dr.-Ing Wurz übernimmt den LNQE-Vorstandsposten von Prof. Rissing.

## Professor Caro is new Academician of the Saxon Academy of Sciences

### Award for LNQE Member

*On April 8, 2016, were in the context of the spring meeting the Saxon Academy of Sciences in the ballroom of the Old Town Hall of Leipzig, the newly elected academicians by the President of the SAW, Prof. Dr. H. Wiesmeth, attended by the Prime Minister of Saxony, S. Tillich, introduced into their office. We are pleased that the LNQE Member Prof. Dr. Jürgen Caro from the Institute of Physical Chemistry and Electrochemistry is among the new Academicians.*

## Reinforcing the Executive Board

**Professor Christian Ospelkaus (quantum optics) and Dr.-Ing. Marc Christopher Wurz (micro production technology) elected to the board.**

*The Board of LNQE receives double recruitment:*

*Prof. Dr. Christian Ospelkaus from the Institute for Quantum Optics explores the quantum control of stored ions in terms of quantum information and precision measurements. His group operates laboratories at the University of Hanover and at the PTB in Braunschweig, where Prof. Ospelkaus leads the research unit "Trapped Ion Quantum Engineering".*

*Dr.-Ing. Marc Christopher Wurz is chief engineer at the Institute for Micro Production Technology. The core competencies of the Institute of micro production technology are in the range of thin-film technology in particular in the micro actuators and microsensors, the fields of mechanical micromachining and - assembly, packaging technology and microtribology. Dr. Wurz takes over the LNQE executive position of Prof. Rissing.*

12.04.2016



03.06.2016



Prof. Dr. Christian Ospelkaus



Dr.-Ing. Marc Christopher Wurz

12.08.2016

## **DFG-Forschergruppen zu Quantenphysik in Gasen und in Nanodrähten**

### **Zwei Forschergruppen unter Koordination von LNQE-Mitgliedern**

Besondere Erfolge für Mitglieder des Laboratoriums für Nano- und Quantenengineering (LNQE) der Leibniz Universität Hannover beim Förderprogramm „Forschergruppen“ der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG):

Die DFG-Forschergruppe „From Few to Many-Body Physics with Dipolar Quantum Gases“ wird neu eingerichtet, die erste Förderperiode ist drei Jahre lang. Erforscht werden sollen die dipolaren Kräfte von ultrakalten Gasen. Sprecherin der neuen Forschergruppe ist LNQE-Mitglied Prof. Silke Ospelkaus vom Institut für Quantenoptik.

Die DFG-Forschergruppe „Metallic nanowires on the atomic scale: Electronic and vibrational coupling in real world systems“ wird nach einer sehr positiven Evaluation für weitere drei Jahre verlängert. Die Forschung konzentriert sich auf kleinste Nanodrähte, die ein quantenmechanisches eindimensionales System darstellen. Insbesondere die Kopplung der Drähte zur Außenwelt ist von großem Interesse. Die beiden Sprecher der Forschergruppe sind die LNQE-Mitglieder Prof. Christoph Tegenkamp und Prof. Herbert Pfnür vom Institut für Festkörperphysik, Abteilung ATMOS.

Herzlichen Glückwunsch vom LNQE!

## **DFG Research Units on Quantum Physics in Gases and in Nanowires**

### **Two research units coordinated by LNQE members**

*Particular success for members of the Laboratory of Nano and Quantum Engineering (LNQE) of the Leibniz Universität Hannover in the program “Research Units” of the German Research Foundation (DFG):*

*The research unit “From Few to Many-Body Physics with dipolar quantum gas” is now established, the first funding period is three years. Research will be undertaken on dipolar forces of ultracold gases. Spokeswoman of the new research unit is LNQE Member Prof. Silke Ospelkaus from the Institute of Quantum Optics.*

*The DFG research unit “Metallic nanowires on the atomic scale: Electronic and vibrational coupling in real world systems” will be extended after a very positive evaluation for another three years. The research focuses on smallest nanowires that represent a quantum mechanical one-dimensional systems. In particular, the coupling of the wires to the outside world is of great interest. The two speakers of the research unit are the LNQE members Prof. Christoph Tegenkamp and Prof. Herbert Pfnür from the Institute of Solid State Physics, Department ATMOS.*

*Congratulations from LNQE!*

## Joint Symposium LNQE und CENIDE

### Erfolgreiche Auftaktveranstaltung

Um erfolgreich im Größenbereich von 1 bis 100 Nanometer zu forschen, müssen die Natur- und Ingenieurwissenschaften eng zusammenarbeiten. Zum überregionalen fachlichen Austausch rund um das Thema Nanotechnologie trafen sich daher kürzlich über 70 Teilnehmerinnen und Teilnehmer zum ersten gemeinsamen Symposium des Laboratorium für Nano- und Quantenengineering (LNQE) der Leibniz Universität Hannover und dem Center for Nanointegration Duisburg-Essen (CENIDE). Eine Fortsetzung ist geplant.

In zahlreichen Vorträgen am Campus Duisburg gaben die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler beider Nanotechnologie-Zentren einen Einblick in ihre aktuellen Forschungsschwerpunkte. Dass die Nanotechnologie sehr interdisziplinär ist, wurde dabei schnell deutlich: die Spanne der Vorträge reichte von heterogenen Katalysatoren, Quantentransport in Graphen, Magnetismus nanoskaliger Systeme bis hin zur Nanotechnologie im Maschinenbau, optischen Eigenschaften von Nanomaterialien, Nanosensoren, Plasmonischen Nanopartikeln für die Katalyse und Biomedizin sowie Nasschemische Synthese von Nanomaterialien.

Abgerundet wurde das Programm durch eine Führung durch den Forschungsbau NanoEnergieTechnikZentrum (NETZ), wo insbesondere die umfangreichen analytischen Methoden des DFG-Gerätezentrums Interdisciplinary Center for Analytics on the Nanoscale (ICAN) gezeigt wurden.

## Joint Symposium LNQE and CENIDE

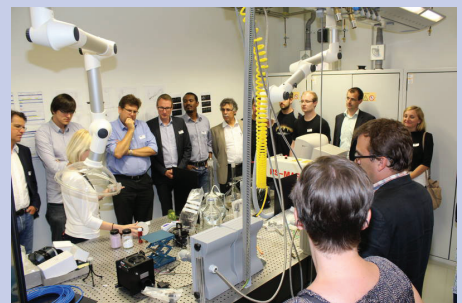
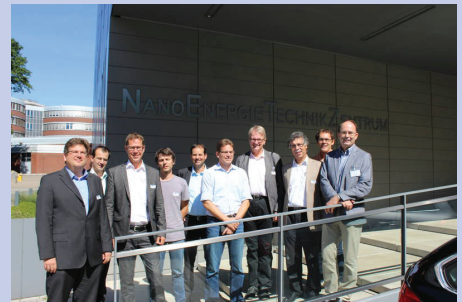
### Successful Launch Event

*For successful research in the size range of 1 to 100 nanometers, the natural sciences and engineering must work closely together. For national professional exchange around the topic nanotechnology therefore recently met 70 participants for the first joint symposium of the Laboratory of Nano and Quantum Engineering (LNQE) of Leibniz Universität Hannover and the Center for Nano Integration Duisburg-Essen (CENIDE). A sequel is planned.*

*In numerous talks on campus Duisburg the scientists of both nanotechnology centers gave an insight into their current research interests. That nanotechnology is very interdisciplinary, it quickly became clear: the margin of the presentations ranged from heterogeneous catalysts, quantum transport in graphene, magnetism of nanoscale systems to nanotechnology in mechanical engineering, optical properties of nanomaterials, nanosensors, plasmonic nanoparticles for catalysis, biomedicine and wet chemical synthesis of nanomaterials.*

*The program was completed by a lab tour of the research building NanoEnergieTechnikZentrum (NETZ), where in particular the extensive analytical methods of the DFG devices center Interdisciplinary Center for Analytics on the Nanoscale (ICAN) were shown.*

07.09.2016



Fotos Joint Symposium  
(c) CENIDE/LNQE.



11.10.2016

### **SolarWorld Junior Einstein Award 2016 für Udo Römer**

Forschungsprojekt für neue Kontakte von Solarzellen vom ISFH und MBE

Der diesjährige „Junior Einstein Award“ von Solarwold wurde an die Nachwuchswissenschaftler Herrn Dr. Udo Römer vom Institut für Solarenergieforschung in Hameln (ISFH) und Herrn Dr.-Ing. Frank Feldmann vom Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme (ISE) vergeben.

Dr. Udo Römer erforschte in seiner Promotion neue passivierende Kontakte, die eine beträchtliche Wirkungsgradsteigerung für Siliziumsolarzellen ermöglichen. Das Forschungsprojekt wurde gemeinsam vom Institut für Solarenergieforschung in Hameln in der Gruppe von Prof. Robby Peibst und vom Institut für Materialien und Bauelemente der Elektronik (MBE) an der Leibniz Universität Hannover in der Gruppe von Prof. Tobias Wietler durchgeführt. Ein Teil der technologisch aufwendigen Arbeiten fanden im Reinraum des Laboratoriums für Nano- und Quantenengineering (LNQE) statt. Herzlichen Glückwunsch vom LNQE!

### **SolarWorld Junior Einstein Award 2016 for Udo Römer**

**Research project for new contacts of solar cells from ISFH and MBE**

*This year's "Junior Einstein Award" by Solarwold was presented to the young scientists Dr. Udo Römer from the Institute for Solar Energy Research in Hameln (ISFH) and Dr.-Ing. Frank Feldmann from the Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems (ISE).*

*In his doctorate, Dr. Udo Römer researched new passivating contacts, which allow a considerable increase in efficiency for silicon solar cells. The research project was jointly carried out by the Institute for Solar Energy Research in Hameln in the group of Prof. Robby Peibst and the Institute for Materials and Devices of Electronics (MBE) at Leibniz Universität Hannover in the group of Prof. Tobias Wietler. Part of the technologically complex work took place in the clean room of the Laboratory of Nano and Quantum Engineering (LNQE). Congratulations from the LNQE!*

17.10.2016

### **Niedersachsen-Technikum 2016**

**Abiturientinnen informieren sich über Nanotechnologie im LNQE**

Das Niedersachsen-Technikum ist ein neues Konzept für die Gewinnung des weiblichen Fachkräftenachwuchses in Wissenschaft und Wirtschaft in den so genannten MINT-Fächern. MINT steht für: Mathematik, Informatik, Naturwissenschaften und Technik. Es richtet sich an junge Frauen, die das Abitur an einem allgemeinbildenden Gymnasium oder einem Fachgymnasium absolviert haben.

Zum Auftakt des diesjährigen Niedersachsen-Technikums stellte das Laboratorium für Nano- und Quantenengineering (LNQE) die Nanotechnologie an der Leibniz Universität Hannover vor. In einem kurzen Vortrag und anschließender

### **Niedersachsen-Technikum 2016**

**Female high school graduates get informed on nanotechnology in the LNQE**

*The Niedersachsen-Technikum is a new concept for the acquisition of the female young specialists in science and business in the so-called MINT subjects. MINT stands for: Mathematics, Computer Science, Natural Sciences and Technology. It is aimed at young women who have just finished high school.*

*At the beginning of this year's Niedersachsen-Technikum, the Laboratory for Nano- and Quantum Engineering (LNQE) presented nanotechnology at the Leibniz Universität Hannover. In a short lecture and subsequent laboratory tour, guests were given insights into current nanotechnology research at the Leibniz Universität Hannover:*

Laborführung erhielten die Gäste Einblicke in aktuelle Nanotechnologie-Forschung an der Leibniz Universität Hannover: Herstellung kleinster Proben im Reinraum, Synthese und Charakterisierung von Nanopartikeln, Gas-Sensorik, Quanteneffekte bei tiefkalten Temperaturen und Elektronen-Mikroskopie. Im abschließenden Gespräch mit Unterstützung des Fachrates wurden die Gäste über den Bachelor- und Masterstudien-gang Nanotechnologie informiert.

## Wissenschaftspreis 2016 für Jenny Schneider

### Auszeichnung für Nachwuchswissenschaftlerin aus dem Arbeitskreis Bahnemann

Die Leibniz Universitätsgesellschaft Hannover e.V. hat die diesjährigen Wissenschaftspreise an insgesamt vier Nachwuchswissenschaftlerinnen und –wissenschaftler verliehen, darunter Frau Dr. Jenny Schneider vom Arbeitskreis Bahnemann des Instituts für Technische Chemie der Leibniz Universität Hannover. Mit dem Wissenschaftspreis Hannover werden seit 1990 herausragende Dissertationen des Wissenschaftlichen Nachwuchses an der Leibniz Universität Hannover geehrt.

In ihrer Doktorarbeit beschäftigte sich Dr. Jenny Schneider mit der „Nanosekunden-Laserblitzlichtphoto-lyse-Untersuchungen zur Aufklärung der photo-induzierten Prozesse in verschiedenen TiO<sub>2</sub> Photokatalysatoren“. Es geht um das Erlangen eines tieferen physikalisch-chemischen Grundlagenverständnisses der Prozesse bei der Photokatalyse mit Titandioxid. Hierbei wurden systematisch in Laser-Versuchen Titandioxid-Partikel mit unterschiedlicher Modifikation, Partikelgröße und Kristallinität untersucht. Die Ergebnisse der Untersuchungen sollten es ermöglichen, sowohl die Eigenschaften anderer Photokatalysatorsysteme zu verstehen als auch gezielt neue Photokatalysatoren mit höherer Aktivität und/oder Anregbarkeit im sichtbaren Spektralbereich zu entwickeln.

Herzlichen Glückwunsch vom LNQE!

*production of the smallest samples in the clean room, synthesis and characterization of nanoparticles, gas sensors, quantum effects in cryogenic temperatures and electron microscopy. In the final discussion with the support by the student representatives, the guests were informed about the Bachelor's and Master's degree course Nanotechnology.*

## Science Prize 2016 for Jenny Schneider

### Award for young scientist from the Bahnemann Group

*The Leibniz Universitätsgesellschaft Hannover e. V. has awarded this year's Science Prizes to a total of four young scientists, including Dr. Jenny Schneider of the Bahnemann Group of the Institute of Technical Chemistry at Leibniz Universität Hannover. Since 1990, outstanding scientific dissertations at Leibniz Universität Hannover have been honored with the Hannover Science Prize.*

*In her doctoral thesis, Dr. Jenny Schneider dealt with "nanosecond laser flash photolysis studies to elucidate the photo-induced processes in various TiO<sub>2</sub> photocatalysts". It is about obtaining a deeper physico-chemical understanding of the processes involved in photocatalysis with titanium dioxide. Titanium dioxide particles with different modification, particle size and crystallinity were systematically investigated in laser experiments. The results of the investigations should make it possible to understand both the properties of other photocatalyst systems as well as to develop new photocatalysts with higher activity and / or excitability in the visible spectral range.*

*Congratulations from the LNQE!*

27.10.2016



Dr. Jenny Schneider

01.12.2016

## Deutsch-Russischer Workshop



Russian-German Workshop

### Treffen über „Solare Brennstoffsynthese“ in Hannover

Der vierte Deutsch-Russische Workshop „Solare Brennstoffsynthese“ fand vom 28.11.2016 bis zum 30.11.2016 im Laboratorium für Nano- und Quantenengineering (LNQE) der Leibniz Universität Hannover statt. Der internationale Workshop wurde von Prof. Dr. Detlef Bahnemann, Leiter des Arbeitskreises „Photokatalyse und Nanotechnologie“ am Institut für Technische Chemie der Leibniz Universität, veranstaltet.

Dreißig Wissenschaftler und Wissenschaftlerinnen aus der Nationalen Universität Sankt-Petersburg, Max-Planck-Institut für Chemische Energie Konversion in Mülheim an der Ruhr, Max-Planck-Institut für Struktur und Dynamik der Materie in Hamburg, der Universität von Arkansas in USA, der Nationalen Universität Uberlandia in Brasilien, der Nationalen Universität Mar del Plata in Argentina, und der Leibniz Universität Hannover diskutierten die neusten Forschungsergebnisse auf dem Gebiet Nanotechnologie und Photokatalyse. Schwerpunktmäßig wurde die Entwicklung potentieller Nanomaterialien für die photokatalytische Wasserstofferzeugung und für den photokatalytischen Schadstoffabbau behandelt.

## Russian-German Workshop

### Meeting on “Solar Fuel Generation” in Hannover

*The fourth German-Russian Workshop “Solar Fuel Generation” took place from November 28, 2016 to November 30, 2016 in the Laboratory of Nano- and Quantum Engineering (LNQE) of the Leibniz Universität Hannover. The international workshop was organized by Prof. Dr. Detlef Bahnemann, head of the “Photocatalysis and Nanotechnology” working group at the Institute of Technical Chemistry at the Leibniz University.*

*Thirty scientists from the National University of Saint-Petersburg, Max Planck Institute for Chemical Energy Conversion in Mülheim an der Ruhr, Max Planck Institute for Structure and Dynamics of Matter in Hamburg, the University of Arkansas in USA, the National University of Uberlandia in Brazil, the National University of Mar del Plata in Argentina, and the Leibniz Universität Hannover discussed the latest research results in the field of nanotechnology and photocatalysis. The development of potential nanomaterials for photocatalytic hydrogen generation and photocatalytic pollutant degradation was dealt with.*

## Aktivitäten in 2016

### Activities in 2016

[Master-Informationsveranstaltung Nanotechnologie](#)  
Informationsveranstaltung

07.01.2016

[Status Meeting 4](#)  
PhD-program „Hannover School of Nanotechnology“

05.02.2016

[LNQE-Nachmittag „Energie“](#)  
Vortragsveranstaltung mit vier Vorträgen

27.04.2016

[Status Meeting 5](#)  
PhD-program „Hannover School of Nanotechnology“

16.06.2016

[Joint Symposium LNQE & CENIDE 2016](#)  
Vortragsveranstaltung mit zehn Vorträgen und Führung

30.08.2016

[Hochschulinformationstage: Studiengang Nanotechnologie](#)  
Informationsveranstaltung und Führung

13.-14.09.2016

[NanoDay2016](#)  
Vortragsveranstaltung mit acht Vorträgen und einer Postersitzung

29.09.2016

[Herbstuniversität Nanotechnologie](#)  
Informationsveranstaltung und Führung

05.10.2016

[Niedersachsen-Technikum für Frauen - im LNQE](#)  
Informationsveranstaltung und Führung

10.10.2016

[Begrüßungsveranstaltung Erstsemester Nanotechnologie](#)  
Feierliche Eröffnungsveranstaltung

17.10.2016

**LNQE** Laboratorium für Nano- und Quantenengineering

Leibniz Universität Hannover

**NanoDay 2016**  
**Thursday 29.09.2016**

Talks: Appelstr. 4, 30167 Hannover, Multimedia Lecture Hall, Technical Computer Science (Building 3703)  
Poster Session: Schneiderberg 39, 30167 Hannover, Foyer, Laboratory of Nano and Quantum Engineering (Building 3430)

**Program**

09:00 Greetings

09:15 - 10:45 Session I (in the multimedia lecture hall)

Electronic transport through atomic wires  
Bio-Micro  
Institute for Solid State Physics, ATMOX,  
Group Pflaiz and Regensperg  
Ray Scattered Spin-Orbit on Graphene,  
Manuel Fritsch  
Institute of Technical Chemistry, Group Silbermann  
Quantum Sensing  
Wolfgang Frey  
Institute of Quantum Optics, Group Rausch  
Observation of a quantum state of  
an atom and collective quantum  
state of a quantum dot  
Mathias Frey

10:45 - 11:15 Coffee break

11:15 - 12:15 Session II

Nanoparticle Classification for Biomedical Applications  
Klaus Biele  
Hannover School for Nanotechnology &  
Institute of Organic Chemistry, Group Bruchberg  
Investigating the influence of quantum nanostructures in polymer  
nanoparticles  
Pinar Chertogal  
Hannover School for Nanotechnology &  
Leopoldinum Hannover, Group Chemistry

12:20 Conference coffee

12:30 - 13:30 Lunch break

13:30 - 15:00 Poster Session (in the LNQE research building)

15:00 - 15:30 Session III

Single trapped ions as nanosensors for microwave near-field  
Rajni Sankar  
Research Institute for Quantum Design, Group C. Diebelius  
Carbonic nanosensor polymers: Promising platform for  
nanosensors  
Bartek Hroczka  
Institute for Organic Chemistry, Group Behrnt  
Physical quantum spintronics: Transport  
Stefan Wollnik  
Institute for Solid State Physics, Nanostructures Section,  
Group Hradil

16:30 - 18:45 Award ceremony of the poster prize

Follow-up: Get together in the LNQE-research building to conclude the  
NanoDay 2016.

www.LNQE.uni-hannover.de  
Guests are welcome!

**SPRINGER NATURE**

## NanoDay 2016

### NanoDay 2016

Der zwölfte NanoDay des LNQE in Hannover

Am Donnerstag, den 29. September 2016 fand der jährliche NanoDay des Laboratoriums für Nano- und Quantenengineering in Hannover statt. In Vorträgen und einer Postersitzung werden die neusten Forschungsergebnisse aus den interdisziplinären Arbeitsgruppen auf dem Gebiet Nanotechnologie präsentiert. Die durch die Leibniz Leibniz Universitätsgesellschaft e. V. geförderten Posterpreise gingen dieses Jahr an:

*The twelfth NanoDay of the LNQE in Hanover*

*On Thursday 29th September 2016 the annual NanoDay of the Laboratory of Nano and Quantum Engineering took place in Hannover/Germany. In eight lectures and a poster session the latest research results from the interdisciplinary working groups in the field of nanotechnology will be presented. The Poster prizes funded by Leibniz Universitätsgesellschaft e. V. were awarded this year to:*

#### *Calorimetric Nanosensor for Mercury Detection in Air*

**M. Allers, S. Lehmann, T. Reinecke and S. Zimmermann**  
Institute of Electrical Engineering and Measurement Technology, Leibniz Universität Hannover

#### *Versatile Fabrication of Voluminous Nanocrystal Superstructures*

**Axel Freytag<sup>1</sup>, Sara Sánchez Paradinas<sup>1</sup>, Massimo Colombo<sup>2</sup>, Nadja C. Bigall<sup>1</sup>**

1 Institut für Physikalische Chemie und Elektrochemie, Leibniz Universität Hannover  
2 Italian Institute of Technology, Italy

#### *Microfabricated ion traps for microwave quantum logic*

**M. Wahnschaffe<sup>1,2</sup>, H. Hahn<sup>1,2</sup>, G. Zarantonello<sup>1,2</sup>, J. Morgner<sup>1</sup>, S. Grondkowski<sup>1</sup>, T. Dubielzig<sup>1</sup>, A. Bautista-Salavador<sup>1,2</sup>, M. Kohlen<sup>1,2</sup> and C. Ospelkaus<sup>1,2</sup>**

1 Institut für Quantenoptik, Leibniz Universität Hannover  
2 Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Braunschweig

Herzlichen Glückwunsch und vielen Dank an alle Vortragenden und Teilnehmer des NanoDay 2016!

*Congratulations and thank you to all lecturers and participants of the NanoDay 2016!*



**Vorträge des NanoDay 2016/Talks of the NanoDay 2016:***Electronic transport through atomic wires***Ilio Miccoli**Institute for Solid State Physics, Atomic and Molecular Structures Section,  
Group Pfnür and Tegenkamp*Dye Sensitized Solar Cells on Ceramics***Manuel Fleisch**

Institute of Technical Chemistry, Group Bahnemann

*Quantum Sensing***Waldemar Herr**

Institute of Quantum Optics, Group Rasel

*Nanoparticle Conjugates for Biomedical Applications***Katja Seidel**Hannover School for Nanotechnology & Institute of Organic Chemistry, Group  
Kirschning*Investigating the influence of quantum nanoparticles in polymer waveguide***Parva Chhantyal**Hannover School for Nanotechnology & Laserzentrum Hannover, Group  
Chichkov*Single trapped ions as a nanosensor for microwave near-fields from scalable microstructures***Martina Wahnschaffe**

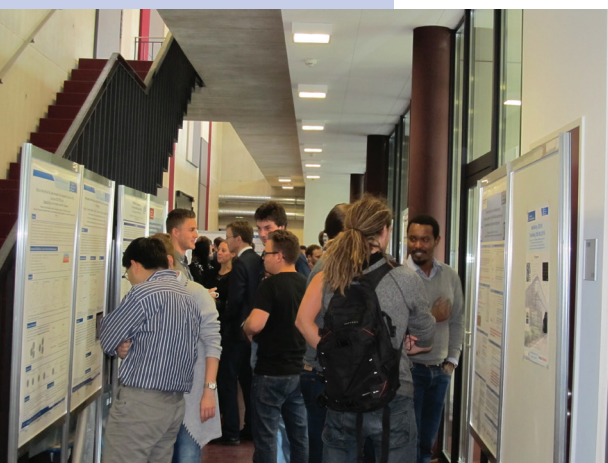
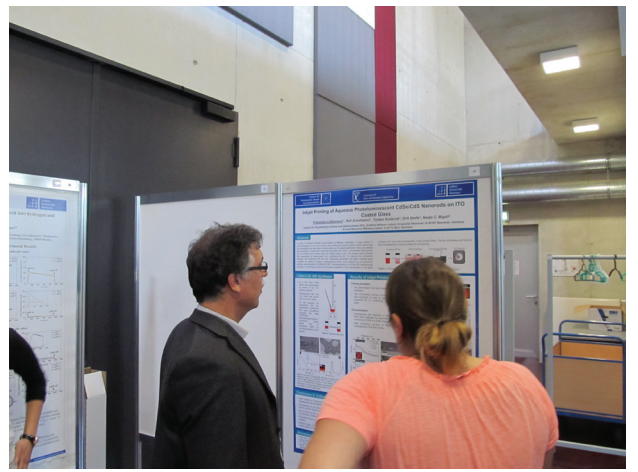
Institute of Quantum Optics, Group C. Ospelkaus

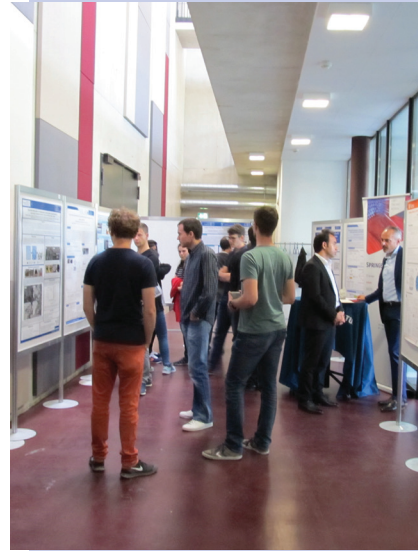
*Conductive coordination polymers: Promising materials for nanosensors***Bastian Hoppe**

Institute for Inorganic Chemistry, Group Behrens

*Feedback controlled single-electron transistor***Timo Wagner**

Institute for Solid State Physics, Nanostructures Section, Group Haug



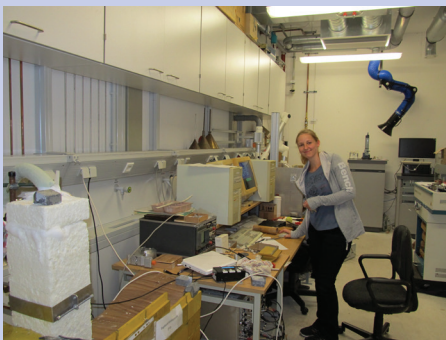


## Forschungsbau *Research Building*



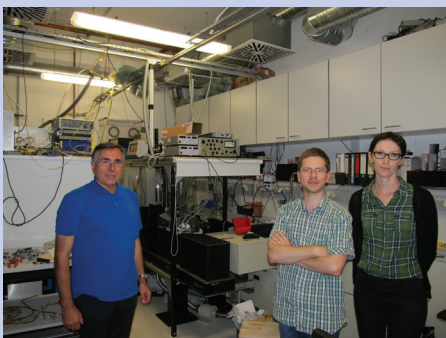
Zur Verwirklichung seiner Ziele betreibt das LNQE ein eigenes Forschungsgebäude in Hannover. Die Labore (435 m<sup>2</sup>), der Forschungsreineiraum (409 m<sup>2</sup>) und die Büroräume (509 m<sup>2</sup>) für ca. 50 Personen werden für interdisziplinäre Projekte, insbesondere aus erfolgreich eingeworbenen, größeren Drittmittelprojekten der Mitglieder genutzt.

*To achieve its objectives LNQE operates its own research building in Hanover. The laboratories (435 m<sup>2</sup>), research clean room (409 m<sup>2</sup>) and offices (509 m<sup>2</sup>) for about 50 persons are used for interdisciplinary projects, particularly from successfully acquired third-party funded large projects of the members.*



Der Forschungsbau wurde vom Land Niedersachsen und mit Bundesmitteln nach einer Empfehlung durch den Wissenschaftsrat (nach Art. 91b Grundgesetz) in besonderer Weise gefördert und ist nach zweijähriger Bauzeit am 20. November 2009 fertig gestellt worden.

*The new research building was funded by Lower Saxony and with federal funds after a recommendation by the German Wissenschaftsrat (under Article 91b Basic Law) in a special way, and is completed after two years of construction on 20th November 2009.*



Durch das Gebäude werden hochwertige Infrastruktur und Technologien zur Verfügung gestellt, die den einzelnen Arbeitsgruppen in Ihren Instituten nicht zur Verfügung stehen. Die offene Bauweise verstärkt nach dem Konzept „Sehen und Begegnen“ den täglichen Kontakt der Wissenschaftler aus den unterschiedlichen Fächern. Dadurch wird es möglich, komplexe Problemstellungen zu lösen, die Kompetenzen aller Fachrichtungen bei allen Teilschritten der

*By the building, high quality infrastructure and technologies are made available to the various working groups that are in their institutes are not available. The open design of the building enhances by the concept of “see and meet” the daily contact between scientists from different disciplines. This makes it possible to solve complex problems that require the skills of all disciplines at all stages of the problem simultaneously. This differs markedly from the usual sequential work-sharing in joint projects and*



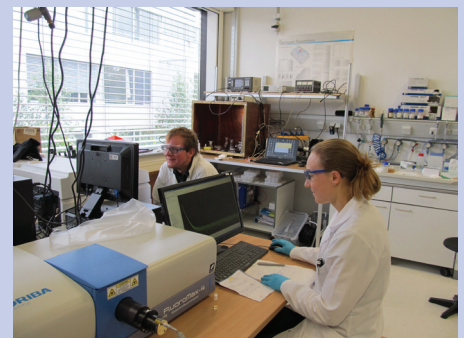
LNQE-Forschungsbau, Schneiderberg 39, 30167 Hannover, Deutschland.  
*LNQE research building, Schneiderberg 39, 30167 Hannover, Germany*

Problemlösung gleichzeitig benötigen. Dies unterscheidet sich deutlich von der sonst üblichen sequenziellen Arbeitsaufteilung in Verbundprojekten und ist somit national, wenn nicht sogar international, vorbildlich und beispielhaft. Durch die Beteiligung von Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler aus den Natur- und Ingenieurwissenschaften werden hierbei sowohl die Grundlagen, als auch mögliche neuartige Anwendungen von Anfang an gleichwertig in der Forschung berücksichtigt.

Zentraler Bestandteil des Forschungsbaus ist der Reinraum. Er ist nach ISO5 / RK 100 im Handlingbereich und ISO6 / RK1000 in den Fluren zertifiziert. Die Hauptfläche des Reinraums ist in mehrere Unterräume unterteilt, in denen sich eine komplette Linie für die Mikroelektronik befindet, d. h. es können ausgehend von einem Wafer komplett alle Prozessschritte ausgeführt werden, um neuartige Bauelemente als Prototypen herzustellen. Durch die Aufteilung in zwei Lithografiebereiche ist sowohl die Bearbeitung von Element- als auch von Verbindungshalbleiter möglich (wobei die Linie hauptsächlich für Silizium ausgelegt ist). Hinzu kommen einige Messräume für Experimente unter Reinraumbedingungen.

*is nationally, if not even internationally, model and best-practice example. By participation of scientists and engineers both the fundamentals as well as possible new applications are considered equivalent in research from the beginning.*

*A central part of the research building is the clean room. It is certified to ISO5 / RK 100 in the handling area and ISO6 / RK1000 in the floors. The main area of the clean room is divided into several subspaces with an entire line for microelectronics, ie starting from a wafer all process steps can be performed to create novel devices as prototypes. By dividing the lithography into two areas, it is possible to process both element and compound semiconductors (where the line is designed primarily for silicon). There are also some measuring rooms for experiments under clean room conditions.*



### Zahlen und Fakten

#### Räume/Hauptnutzflächen

- Labore (435 Quadratmeter): Laserlabore, Chemielabore, Messlabore
- Forschungsreinraum (409 Quadratmeter)
- Büroräume für 44 Personen (509 Quadratmeter)

#### Personen

- Betreiberteam
- 50 Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler aus den Bereichen Chemie, Elektrotechnik, Maschinenbau und Physik

#### Baukosten

- 14 Mio. Euro

#### Förderung

- Der Forschungsbau wird nach einer erfolgreichen Evaluati-on durch den Wissenschaftsrat (nach Artikel 91b Abs. 1 Nr. 3 des Grundgesetzes) durch den Bund gefördert

#### Bauzeit

- ca. 24 Monate
- Die feierliche Schlüsselübergabe war am 20. November 2009

### Numbers and Facts

#### Rooms/main usable area

- Labs (435 square meters): laser laboratories, chemical laboratories, test laboratories
- Research clean room (409 square meters)
- Office space for 44 people (509 square meters)

#### People

- Operator team
- 50 scientist from the fields of chemistry, electrical engineering, mechanical engineering and physics

#### Construction costs

- 14 Mio. euro

#### Funding

- The new construction is funded with federal funds after a recommendation by the German Wissenschaftsrat (under Article 91b para 1 nr. 3 of the Basic Law of Germany ("Grundgesetz") )

#### Construction time

- about 24 month
- The handover was at 20th November 2009

## Technologie im Forschungsbau Technology in the Research Building

### Reinraum allgemein

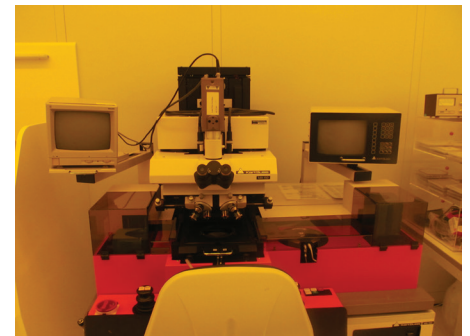
Der Reinraum ist nach ISO5 / Reinraumklasse 100 im Handlingbereich und ISO6 / Reinraumklasse 1000 in den Fluren zertifiziert. Die gemessenen Werte sind besser, es wird Reinraumklasse 10 im Handlingbereich und sonst Reinraumklasse 100 erreicht.

Allgemein: Temperatur: 22 °C +/- 2, Luftfeuchtigkeit 40...60 %

### Fotolithografie Elementhalbleiter (Silizium/Germanium)

Hier: Temperatur: 22 °C +/- 1, Luftfeuchtigkeit 40 +/- 5 %

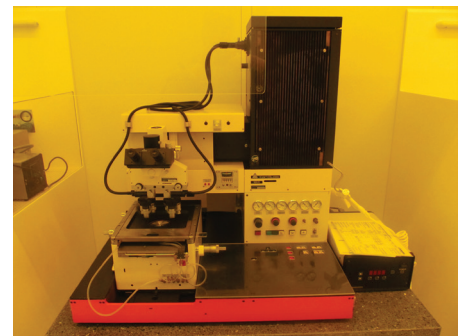
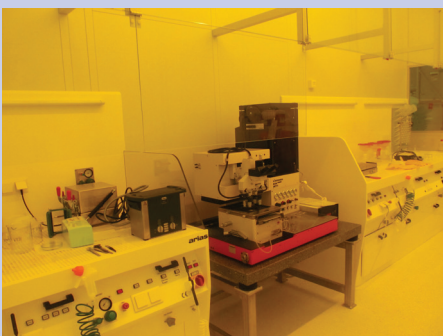
- UV Kontakt- und Proximity-Belichter für runde Wafer (Silizium und Germanium) bis 100 mm Durchmesser. Maskengröße 150\*150 mm<sup>2</sup> quadratisch, minimale Linienbreite 900 nm (SÜSS MA 150)
- UV Handbelichter für Bruchstücke und kleine Wafer
- Lackschleuder mit Heizplatte für runde Wafer bis 200 mm Durchmesser. Ausheizen bis 200°C (SÜSS DELTA 80/8)
- Trockenofen zur Bedampfung von Haftvermittlern
- Nassbänke für die Entwicklung und die Lackentfernung im Ultraschall
- Kühlschränke für Lackchemie
- Plasma-Asher für runde Wafer bis 100 mm Durchmesser, zur Beseitigung von Fotolackresten im O<sub>2</sub>-Plasma (TEPLA 100)



### Fotolithografie Verbindungshalbleiter

Hier: Temperatur: 22 °C +/- 1, Luftfeuchtigkeit 40 +/- 5 %

- UV Kontakt- und Proximity-Belichter für runde Wafer (Verbindungshalbleiter) bis 100 mm Durchmesser. Maskengröße 150\*150 mm<sup>2</sup> quadratisch, minimale Linienbreite 700 nm (SÜSS MA6)
- Lackschleuder mit Heizplatte für runde Wafer bis 100 mm Durchmesser. Ausheizen bis 200°C
- Nassbänke für die Entwicklung und die Lackentfernung



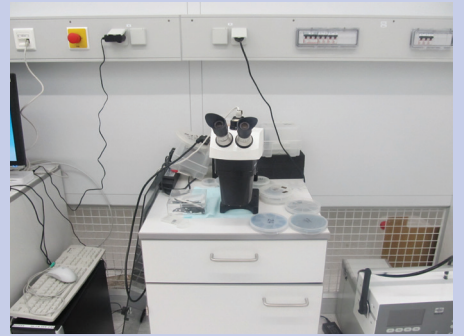
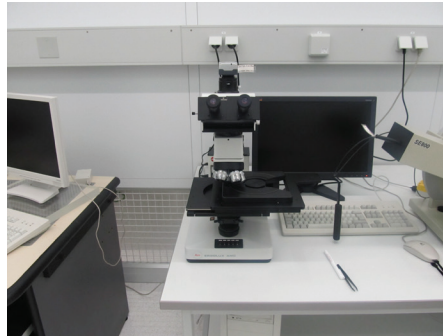
## Nassbänke

Nassbänke für die nasschemische Strukturierung und Reinigung von runden Wafern bis 200 mm Durchmesser (auch Solar)

- RCA-Reinigung (SC1, SC2, HF-Dip)
- Quick-Dump-Rinser
- Spin-Rinser-Dryer
- Nasschemische Ätzprozesse allgemein



## Lichtmikroskope



## Spektrales Ellipsometer

Spektrales Ellipsometer für runde Wafer bis 200 mm Durchmesser (auch Solar), 250-800 nm Wellenlänge, Stage für automatisiertes Mapping der Oberfläche (SENTECH SE 800)



## Konfokalmikroskop

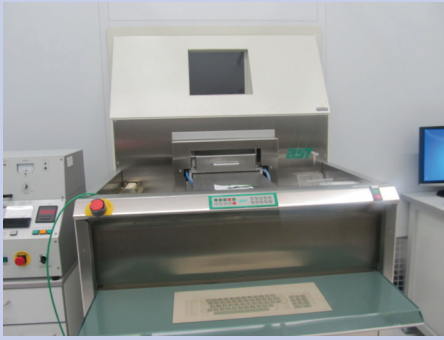
Konfokalmikroskop mit Mirau Interferometer, bis 1500-fache Vergrößerung, Höhenauflösung bis 1 nm (LEICA DCM 3D)



## Plasma Asher

Plasma Asher TePla 100





### Schnellheizöfen

Schnellheizöfen bei Normaldruck, für runde Wafer bis 150 mm Durchmesser, auch Solar, Temperatur bis 1100°C unter Ar, O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub> oder N<sub>2</sub>H<sub>2</sub>. (AST SHS 2000 und Eigenbau)



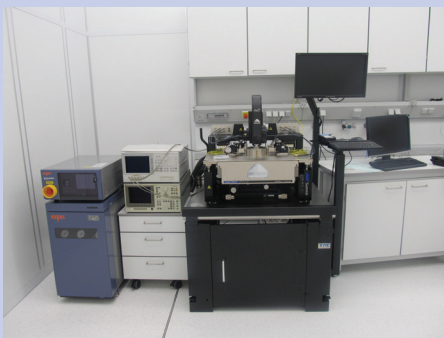
### Polyimid-Ofen

Bis 100 mm Durchmesser, Tempern unter Ar, N<sub>2</sub> oder im Feinvakuum, bis 950°C, rezeptgesteuert.



### Reaktives Ionenätzen (RIE)

Reaktives Ionenätzen für runde Wafer bis 100 mm Durchmesser, ätzen unter Ar, O<sub>2</sub>, SF<sub>6</sub> und CHF<sub>3</sub> (ALCATEL RIE)



### Wafer-Probe Station

Wafer-Probe Station für runde Wafer bis 200 mm Durchmesser (auch Solar), -65°C bis +200°C Proben temperatur, digitales Kamerasystem, 4 Messnadeln (CASCADE SUMMIT 11000). Mit Impedance Analyzer (Agilent 4294A) und Semiconductor Parameter Analyzer (HP 4155).



### Plasma-CVD

Plasma-CVD für runde Wafer bis 100 mm Durchmesser, Herstellung von Oxiden, Nitriden, Poly und Germanium, Substrattemperatur bis 400°C (OXFORD PLASMALAB 90)



### Kathodenzerstäubungsanlage

Kathodenzerstäubungsanlage für runde Wafer bis 200 mm Durchmesser, Gleich- und Wechselspannung, Co-Sputtern von zwei Targets möglich, Plasmaätzen, Magnetron-Anlage (LEYBOLD Z590)



### Aufdampfanlage

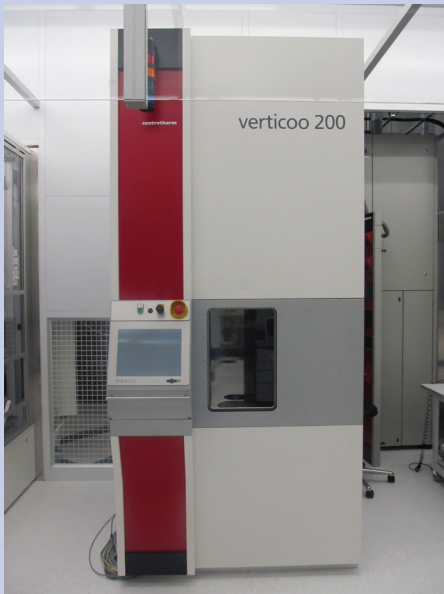
Aufdampfanlage für Runde Wafer bis 100 mm Durchmesser, 4-fach Tiegel und Einzeltiegel, Co-Verdampfen (BALZERS BAK 610)



### Ionenimplantation

Ionenimplanter für runde Wafer bis 300 mm Durchmesser, auch Solar, As, P, B, 5-60 keV (VARIAN VIISa HC)

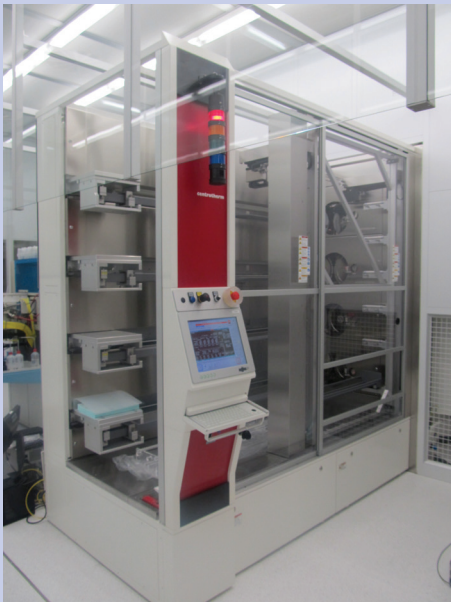




### Vertikalofensystem

Vertikalofensystem Verticoo 200 von Centrotherm, Oxidationsrohr, vertikal, Oxidation trocken und feucht, Feuchtoxidation mit Steamer (Wasserdampf aus DI-Wasser) oder Hydrox-Brenner (Wasserdampf aus  $H_2$  und  $O_2$  verbrannt). Scheibengröße 150 und 200 mm, mit Adaptern auch 100 mm und „Stückchen“, Vollhandlingsystem, aber auch manuell bedienbar. Alle Oxidationsrohre haben einen DCE-Bubbler eingebaut.

Die Anlage ist im Rahmen einer Kooperation mit Fa. Centrotherm im LNQE-Forschungsbau aufgestellt.



### Horizontalofensystem Oxidation und LPCVD

Horizontalofensystem Centrotherm „Europa 2000“ mit LPCVD mit folgender Bestückung der Anlage:

- Oben: SiC-Rohr bis 1285 °C, Oxidation trocken und feucht, Feuchtoxidation mit Steamer (Wasserdampf aus DI-Wasser) oder Hydrox-Brenner (Wasserdampf aus  $H_2$  und  $O_2$  verbrannt).
- Darunter: Polysilizium-Rohr, dotiert und undotiert, amorph und polykristallin, n und p mittels Phosphin und Diboran sowie mit Sauerstoff dotiert als SIPOS.
- Darunter: Nitrid-Rohr, stöchiometrisch ( $Si_3N_4$ ) und Si-reiches Nitrid mit niedrigen Verspannungen d.h. „low-stress-nitride“ herstellbar (kompressiver und tensiler Schichtstress).
- Darunter: LPCVD-TEOS-Rohr, Tieftemperatur-Oxide, momentan noch ohne Plasma-Unterstützung, Temperaturen ab 450°C.

Alle Rohre für 200 mm ausgelegt, Einsatzboote für rechteckige Solarwafer, runde 150 und 100 mm sowie 2“ und 3“ vorhanden. Alle Oxidationsrohre haben einen DCE-Bubbler eingebaut, um eine hochtemperatur-Reinigung mit Chlor zu ermöglichen. Damit erreicht man eine gute Metallionenfreiheit.

Die Anlage ist im Rahmen einer Kooperation mit Fa. Centrotherm im LNQE-Forschungsbau aufgestellt.



### III-V Compact 21 MBE System

Ultrahochvakuum ( $10^{-11}$  Torr) Molekularstrahlepitaxie Anlage von RIBER zum Wachsen von hoch qualitativen Galliumarsenid basierten III-V Verbindungshalbleiter Schichtsystemen.

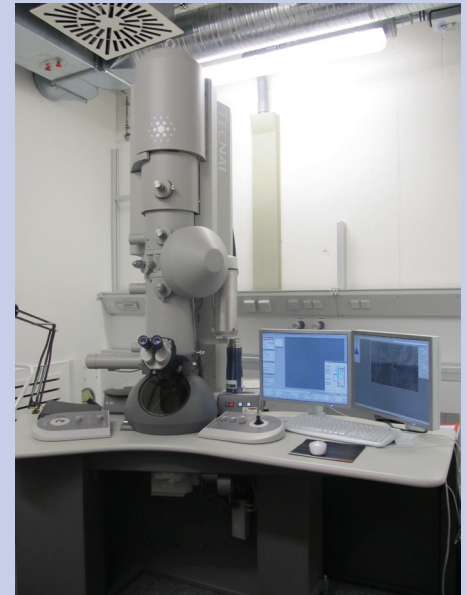
Verfügbare Materialien: Ga, As, Al, In  
Dotierstoff: Si (n-Typ)

Gerät vom Exzellenzcluster QUEST

## Transmissionselektronenmikroskop (TEM)

Das neue TEM im LNQE hat eine Beschleunigungsspannung von 200 kV und als Elektronenemitter eine Feldeffektkathode. Wichtigste Parameter sind:

- Gerätetyp: TEM Tecnai G2 F20 TMP von Fa. FEI
- 200 kV Feldeffekt FEG
- Ölfreies Vakuum
- TEM point resolution: 0,27 nm
- Information limit: 0,14 nm (gemessen!)
- STEM resolution: 0,24 nm
- 1 Hellfeld- und 2 Dunkelfeld-Detektoren +1 HAADF-Detektor
- Tomografie +/- 70°



## Ionenstrahl-Dünnung zur TEM-Probenpräparation

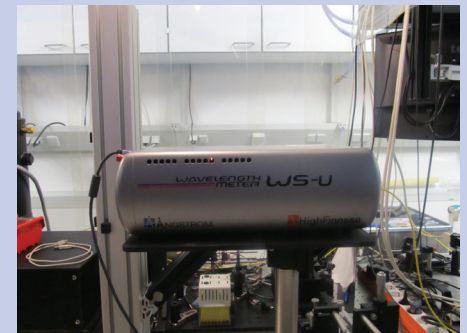
Präzisions-Ionen-Polier-System PIPS von Fa. Gatan für kleine Beschusswinkel variabel zwischen 0° und ±10° zur einseitigen und doppelseitigen Ionenstrahl-Dünnung mit:

- LowEnergy Penning-Ionenquellen 0,1 – 6,0 kV
- Dual Beam Modulation zur Sektoren-Querschnittspräparation Proben-schleuse
- Probenhaltern für ein- und doppelseitige Dünnung
- Ölfreiem Vakuumsystem
- Zoom-TV-Kamerasystem (400x bis 2600x)
- Cold Stage



## Wellenlängemessgerät

Wavelength meter HF-ANGSTROM WS/U-2 von TOPTICA Photonics, 350-1120 nm, mit Multichannel Option und Laser Control Option.



## 4-Spitzen STM/SEM

Nanotechnologie-Großgerät 4-Spitzen STM/SEM von Fa. Omicron, das die Vorteile eines Rasterelektronenmikroskops (SEM) mit denen eines Rastertunnelmikroskops (STM) verknüpft und durch Aufsetzen der Spitzen auf Nanostrukturen elektrische 4-Punkt-Messungen im Ultrahochvakuum erlaubt

Gerät vom Institut für Festkörperphysik, Abteilung Atomare und Molekulare Strukturen



## Studiengang Nanotechnologie

### Study Course Nanotechnology

Durch das LNQE initiiert, bietet die Leibniz Universität Hannover den interdisziplinären Bachelorstudiengang Nanotechnologie an, seit dem Wintersemester 2011/2012 auch als Masterstudiengang. Der Studiengang Nanotechnologie vermittelt die Grundlagen in den Kernfächern Chemie, Elektrotechnik, Maschinenbau und Physik (ergänzt durch Mathematik), wobei den Erfordernissen, die aus der Nanotechnologie erwachsen, im Besonderen Rechnung getragen wird.

*Initiated by the LNQE, Leibniz Universität Hannover provides the interdisciplinary Bachelor study course nanotechnology and also as a master's degree since the winter semester 2011/2012. The study course nanotechnology teaches the basics in the core subjects of chemistry, electrical engineering, mechanical engineering and physics (supplemented by mathematics), while the realization, arising from nanotechnology, considered in particular.*



Erstsemesterbegrüßung der Nanotechnologen 2016.

*Welcome of the first semester nanotechnology students 2016.*

## Bachelorstudiengang

### Bachelor's degree

#### Struktur des Studienganges

Die Regelstudienzeit des Bachelorstudiengangs Nanotechnologie beträgt sechs Semester. Die Ausbildung setzt sich zum einen aus Vorlesungen und Übungen zusammen. Darin werden Grundlagen und vertiefende Kenntnisse aus verschiedenen Studienschwerpunkten gelehrt. Darüber hinaus werden Tutorien angeboten, die dem Erwerb von Schlüsselkompetenzen dienen. Zum anderen erfolgt die praktische Ausbildung durch Laborpraktika, durch insgesamt 12 Wochen berufspraktische Tätigkeiten und Fachexkursionen sowie der Bachelorarbeit als Abschlussarbeit. Insgesamt sind 180 Leistungspunkte (LP) zu erreichen.

#### Structure of the Study Course

*The standard period of study of the bachelor program nanotechnology is six semesters. The training is comprised of lectures and exercises on the one hand. Basic ideas and in-depth knowledge from different major fields of study are taught. In addition, tutoring is offered to the acquisition of key competencies. On the other hand, the practical training occurs by lab courses, by a total of 12 weeks of practical training activities and study tours, and a bachelor thesis as complementary work. A total of 180 credit points (CP) is to be achieved.*

#### Basis Study

*The bachelor's degree is divided into a basic study and a deeper study. In the first three semesters of study are studied the basis of technical, scientific and mathematical skills. The basic study is divided into the following knowledge: general, chemistry, electrical engineering and computer science, mechanical engineering, mathematics, and physics. The courses of the first three semesters are determined.*

#### Grundlagenstudium

Der Bachelorstudiengang gliedert sich ein Grundlagenstudium und in ein Vertiefungsstudium. In den ersten drei Semestern des Grundlagenstudiums werden technische, mathematische und naturwissenschaftliche Kenntnisse vermittelt. Das Grundlagenstudium gliedert sich dabei in folgende Kompetenzfelder: Allgemein, Chemie, Elektrotechnik und Informatik, Maschinenbau, Mathematik, und Physik. Die Kurse der ersten drei Semester sind festgelegt.

Grundlagenkurse/ <i>Basic Courses</i>	109 LP/CP
Vorlesungen und Labore des Vertiefungsstudiums <i>Lectures and laboratory studies of the deepening study</i>	32 LP/CP
Schlüsselkompetenzen/ <i>Key Competencies</i>	11 LP/CP
Fachpraktikum (12 Wochen)/ <i>Internship (12 weeks)</i>	15 LP/CP
Fachexkursionen (3 Tage)/ <i>Study Tours (3 days)</i>	1 LP/CP
Bachelorarbeit (300 Stunden)/ <i>Bachelor Thesis (300 hours)</i>	12 LP/CP
<b>Summe/Sum:</b>	<b>180 LP/CP</b>

Übersicht über zu erbringende Leistungen im Bachelorstudium.  
*Overview of achievements to be proved in the bachelor's degree*

## Vertiefungsstudium

Im Vertiefungsstudium erfolgt eine fachliche Spezialisierung der erlernten Grundlagen in zwei von den Kompetenzfeldern Chemie, Elektrotechnik und Informatik, Maschinenbau und Physik, d. h. die Studierenden wählen sich zwei Kompetenzfelder nach ihren Wünschen aus und gestalten so ihren Stundenplan. Zusätzlich erfolgt eine weitere Spezialisierung durch die Belegung eines Wahl-Kompetenzfeldes aus dem Masterprogramm. Das Vertiefungsstudium beinhaltet darüber hinaus ein Praktikum, Fachexkursionen, die Studienarbeit und die Bachelorarbeit im 6. Semester.

## Schlüsselkompetenzen

Das Modul Schlüsselkompetenzen besteht aus einem Seminar zur Nanotechnologie und einer Reihe von Vorlesungen, aus denen frei gewählt werden kann (z. B. Kurse für Schlüsselkompetenzen, Projektmanagement, Recht, Firmengründungskurse etc.).

## Fachexkursionen

Fachexkursionen zu Firmen, Forschungseinrichtungen oder Fachmessen in einem Umfang von drei Tagen.

## Deepening Study

*In the deepening study a specialization of the learned basics is carried out in two of the competence areas chemistry, electrical engineering and computer science, mechanical engineering and physics, that is the students choose two areas of expertise in accordance with their wishes, and create their timetable. In addition, a further specialization by the choice of a selectable area of expertise from the master program occurs. The deepening study also includes an internship, study tours, study thesis and the Bachelor thesis in the 6th Semester.*

## Key Competences

*The module key competences consists of a seminar on nanotechnology and a series of lectures, from which can be chosen freely (eg courses for key skills, project management, law, company formation courses, etc.).*

## Study Tours

*Excursions to companies, research institutions or trade fairs in a range of three days.*

Leibniz Universität Hannover

Kurs- und Modulkatalog

Studienführer für den Studiengang Nanotechnologie mit den Abschlüssen

Bachelor of Science  
Master of Science

PO2016

Kurs- und Modulkatalog Nanotechnologie.  
*Course and module catalog nanotechnology.*

Leibniz Universität Hannover

Studiengang Nanotechnologie

Nanotechnologie studieren in Hannover

Dr. rer. nat. Katrin Radatz  
Dezernat Fach für Mathematik und Physik  
Raum 4122  
30157 Hannover  
Tel: +49 511 762-14534  
E-Mail: [katrin.radatz@uni-hannover.de](mailto:katrin.radatz@uni-hannover.de)  
Sprachkurse: Di, 13.00h - 14.00h und Do, 8.00h - 9.30h

Coaching Service für Studierende  
Es gibt einen neuen Coaching-Service für Studierende, der von der Fakultät für Mathematik und Physik angeboten wird.  
• [Lad... wenn möglich per Hannover.de/2016.html](#)

Seminar Nanotechnologie  
Das Seminar Nanotechnologie startet am 02.10.2016, 13:15-15:00 Uhr im LUGG-Seminarraum. Hier werden die Vertragskennlinien möglich.  
• [Anmeldung](#)  
• [Info](#)

Abkürzungen für Bachelorstudierende der Nanotechnologie:  
• [Klausuren](#) für  
• [Bachelorarbeiten](#) der

16.12.2016 Die Klausurenplan 16/17 ist da, siehe Blau rechts.  
16.12.2016 Die Studiengangskoordination Nanotechnologie ist in der SZ-KV nicht besetzt.  
07.02.2016 Die Sprechzeit von Dr. Radatz am 02.12. muss leider entfallen.

Website zum Studiengang:  
[www.lnqe.uni-hannover.de/study\\_nano.html](http://www.lnqe.uni-hannover.de/study_nano.html)  
*Website of the study course:*  
[www.lnqe.uni-hannover.de/study\\_nano.html](http://www.lnqe.uni-hannover.de/study_nano.html)

Kompetenzfeld: Allgemein (4 LP)/ <i>Area of Expertise: General (4 CP)</i>
Einführung in die Nanotechnologie/ <i>Introduction to nanotechnology</i>
Kompetenzfeld: Chemie (16 LP)/ <i>Area of Expertise: Chemistry (16 CP)</i>
Einführung in die Allgemeine und Anorganische Chemie / <i>Introduction to general and inorganic chemistry</i>
Physikalische Chemie I/ <i>Physical chemistry I</i>
Kompetenzfeld: Elektrotechnik und Informatik (21 LP) <i>Area of Expertise: Electrical Engineering and Computer Science(21 CP)</i>
Grundlagen der Elektrotechnik I/ <i>Fundamentals of electrical engineering I</i>
Grundlagen der Elektrotechnik II/ <i>Fundamentals of electrical engineering II</i>
Grundpraktikum Elektrotechnik/ <i>Basic lab course electrical engineering</i>
Informationstechnisches Praktikum/ <i>Information technology practical</i>
Kompetenzfeld: Maschinenbau (16 LP) <i>Area of Expertise: Mechanical Engineering (16 CP)</i>
Mikro- und Nanotechnologie/ <i>Micro and nanotechnology</i>
Technische Mechanik I für Maschinenbau/ <i>Applied mechanics I for mechanical engineering</i>
Technische Mechanik II für Maschinenbau/ <i>Applied mechanics II for mechanical engineering</i>
Kompetenzfeld: Mathematik (26 LP) <i>Area of Expertise: Mathematics (26 CP)</i>
Mathematik für Ingenieure I/ <i>Mathematics for engineers I</i>
Mathematik für Ingenieure II/ <i>Mathematics for engineers II</i>
Mathematik für Ingenieure III/ <i>Mathematics for engineers III</i>
Mathematik für Ingenieure IV/ <i>Mathematics for engineers IV</i>
Kompetenzfeld: Physik (26 LP)/ <i>Competence Area: Physics (26 CP)</i>
Physik I – Mechanik und Relativität / <i>Physics I - Mechanics and relativity</i>
Physik II - Elektrizität/ <i>Physics II - Electricity</i>
Physik III - Optik, Atomphysik, Quantenphänomene/ <i>Physics III - Optics, atom physics, quantum phenomena</i>
Grundpraktikum Physik/ <i>Basic lab Course physics</i>

#### Kurse im Grundlagenstudium/*Courses of the basic study*

#### Fachpraktikum

Ein berufsbezogenes Fachpraktikum bildet einen wesentlichen Bestandteil des Studiums. Das 12 wöchige Fachpraktikum dient dem Erwerb von Erfahrungen in typischen Aufgabefeldern und Tätigkeitsbereichen von Absolventen und Absolventinnen in der beruflichen Praxis. Die Studierenden sollen Erfahrungen in der Anwendung ihrer im Studium erworbenen Kenntnisse und Fertigkeiten sammeln. Das Fachpraktikum ist daher durch die Eingliederung der Praktikanten und Praktikantinnen in ein Arbeitsumfeld von Ingenieuren oder entsprechend qualifizierten Personen mit überwiegend entwickelndem, planendem oder lenkendem Tätigkeitscharakter gekennzeichnet. Detaillierte Informationen zum Praktikum liefert die Praktikantenordnung.

#### Internship

*An occupational internship is an essential part of the course. The 12 week co-op program serves the acquisition of experience in typical job fields and fields of activity of graduates in professional practice. The students will get experience in the application of their studies in the acquired knowledge and skills. The practical training is therefore characterized by the integration of the trainees in a work environment for engineers or suitably qualified persons with predominantly evolving, planning or leadership character. Detailed information about the internship is given in the intership regulations.*

Kompetenzfeld: Chemie (16 LP) / <i>Area of Expertise: Chemistry (16 CP)</i>
Instrumentelle Methoden I / <i>Instrumental methods I</i>
Anorganische Chemie I / <i>Inorganic chemistry I</i>
Technische Chemie I / <i>Technical chemistry I</i>
Kompetenzfeld: Elektrotechnik und Informatik (16LP) <i>Area of Expertise: Electrical Engineering and Computer Science (16 CP)</i>
Grundlagen der Materialwissenschaften / <i>Basics of materials science</i>
Regelungstechnik I / <i>Automatic control technique I</i>
Grundlagen der Halbleiterbauelemente / <i>Basics of semiconductor devices</i>
Sensorik und Nanosensoren / <i>Sensor technology and nanosensors</i>
Kompetenzfeld: Maschinenbau (16 LP) <i>Area of Expertise: Mechanical Engineering (16 CP)</i>
Regelungstechnik I / <i>Automatic control technique I</i>
Mikro- und Nanosysteme / <i>Micro and nano systems</i>
Werkstoffkunde / <i>Material science</i>
Kompetenzfeld: Physik (16 LP) / <i>Area of Expertise: Physics (16 CP)</i>
Einführung in die Festkörperphysik / <i>Introduction to solid state physics</i>
Elektronik und Messtechnik / <i>Electronics and measurement technology</i>
Schlüsselkompetenzen (11 LP) <i>Key Competences (11 CP)</i>
Nanotechnologie-Seminar + weitere, wählbare Kurse zu Schlüsselkompetenzen / <i>Nanotechnology seminar + more selectable courses in key competences</i>

Kurse im Vertiefungsstudium / *Courses of the deepening study*

## Bachelorarbeit

Den Abschluss des Studiums bildet die Bachelorarbeit mit einer Gesamtdauer von drei Monaten. Die Bachelorarbeit soll zeigen, dass der Prüfling in der Lage ist, innerhalb einer vorgegebenen Frist ein Problem selbstständig nach wissenschaftlichen Methoden zu bearbeiten. Die Art der Aufgabe und die Aufgabenstellung müssen mit der Ausgabe des Themas festliegen. Die Bachelorarbeit muss von zwei Prüfern bewertet werden. Sie kann in der Form einer Gruppenarbeit angefertigt werden. Der als Prüfungsleistung zu bewertende Beitrag des einzelnen Prüflings muss aufgrund der Angabe von Abschnitten, Seitenzahlen oder anderer objektiver Kriterien deutlich abgrenzbar und für sich zu bewerten sein. Nähere Informationen zur Bachelorarbeit sind der Prüfungsordnung zum Studiengang „Nanotechnologie“ zu entnehmen.

## Bachelor Thesis

*The completion of the course is the bachelor thesis, with a total duration of three months. The bachelor thesis is to show that the student is in a position to solve a problem alone within a specified time according to scientific methods. The type of the task and the task must be determined with the issue of the topic. The bachelor thesis must be evaluated by two reviewers. It may be made in the form of a working group. The performance audit assessed contribution of each candidate must be a result of the indication of the sections, page numbers or other objective criteria clearly identifiable and are to be valued. Further information on the bachelor thesis can be taken from the examination rules of the study course „nanotechnology“.*

## Masterstudiengang Master's degree



Der Studiengang Nanotechnologie hat eine sehr engagierte Studierendenschaft. Es finden regelmäßig treffen des Fachrates im LNQE-Forschungsbau statt.

*The degree program nanotechnology has a very dedicated student body. It holds regular meeting of student council in LNQE research building.*

Der akkreditierte Masterstudiengang Nanotechnologie ist als Weiterführung des Bachelorstudiengangs Nanotechnologie konzipiert. Neben den Bachelorabsolventinnen und -absolventen der Nanotechnologie steht er aber auch den Studienrichtungen Maschinenbau, Elektrotechnik, Chemie und Physik offen. Die Regelstudiendauer beträgt vier Semester, wovon ein Semester auf die Masterarbeit entfällt. Insgesamt sind 120 Leistungspunkte (LP) zu erreichen.

### Grundlagenkurse

Die Grundlagenkurse des Pflicht-Kompetenzfeldes sind von allen Studierenden zu besuchen und vermitteln wichtige Kenntnisse aus den Methoden der Nanotechnologie.

### Wahlkompetenzfelder

Neben den Grundlagenkursen sind von den Studierenden drei der angebotenen Wahlkompetenzfelder als Vertiefungsfächer zu wählen:

- Chemie
- Chemie der Nanowerkstoffe
- Lasertechnik/Photonik
- Materialphysik
- Mikro- und Nanoelektronik
- Mikroproduktionstechnik
- Biomedizintechnik

### Wahlbereich

Im Wahlbereich können Veranstaltungen aus einer Liste von Fachkursen gewählt werden.

*The accredited master study course nanotechnology is designed as continuation of the bachelor course nanotechnology. In addition to the bachelor's graduates in nanotechnology, he is also open to the study of mechanical engineering, electrical engineering, chemistry and physics. The standard course duration is four semesters with one semester for the Master's thesis. A total of 120 credit points (CP) must be reached.*

### Basic Courses

*The basic courses of the mandatory area of expertise have to be attended by all students and provide important skills on the methods of nanotechnology.*

### Selectable Areas of Expertise

*Besides the foundation courses three of the competence areas of choice are to be chosen as majors by the students:*

- Chemistry
- Chemistry of nanomaterials
- Laser technology / photonics
- Materials physics
- Micro and nanoelectronics
- Micro production technology
- Biomedical engineering

### Courses of Choice

*In elective courses from a list of professional courses can be selected.*

Pflicht-Kompetenzfeld „Methoden der Nanotechnologie“/Mandatory Area of Expertise “Methods of Nanotechnology”	13 LP/CP
3 Wahlkompetenzfelder/3 Selectable Areas of Expertise	35-39 LP/CP
Wahlbereich/Courses of Choice	20-24 LP/CP
3 Labore 360 Stunden/ 3 Lab Courses 360 hours	12 LP/CP
Studium Generale/General Studies	6 LP/CP
Masterarbeit 6 Monate/Master Thesis 6 month	30 LP/CP
<b>Summe/Sum:</b>	<b>120 LP/CP</b>

Übersicht über zu erbringende Leistungen im Masterstudium.  
*Overview of achievements to be proved in the master's degree*



## Labore

Im Rahmen des Studiums müssen die Studierenden drei verschiedene Labore absolvieren. Als Labore sind ein Halbleitertechnologie-Labor, ein Laborpraktikum Festkörperphysik sowie ein Mikrotechnik-Labor vorgesehen.

## Studium Generale

Für das Studium Generale besteht die Wahlfreiheit aus dem gesamten Angebot der Universität.

## Masterarbeit

Den Abschluss des Studiums bildet die Masterarbeit mit einer Gesamtdauer von sechs Monaten.

## Lab courses

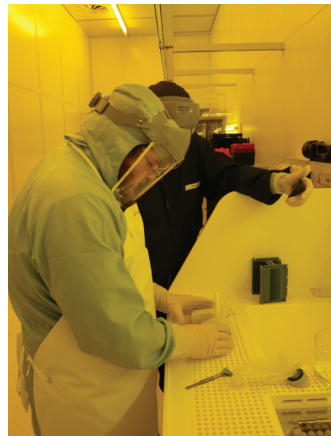
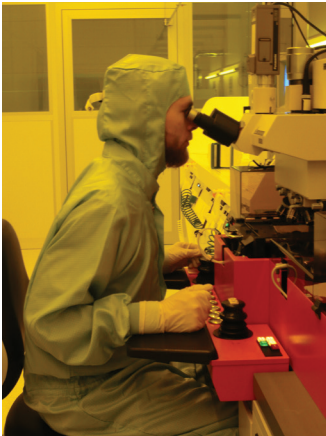
*As part of the study course, students must complete three different lab courses. A semiconductor technology lab course, a solid-state physics lab course and a microtechnology lab course are provided.*

## General Studies

*For General Studies there is freedom of choice from the full range of the university.*

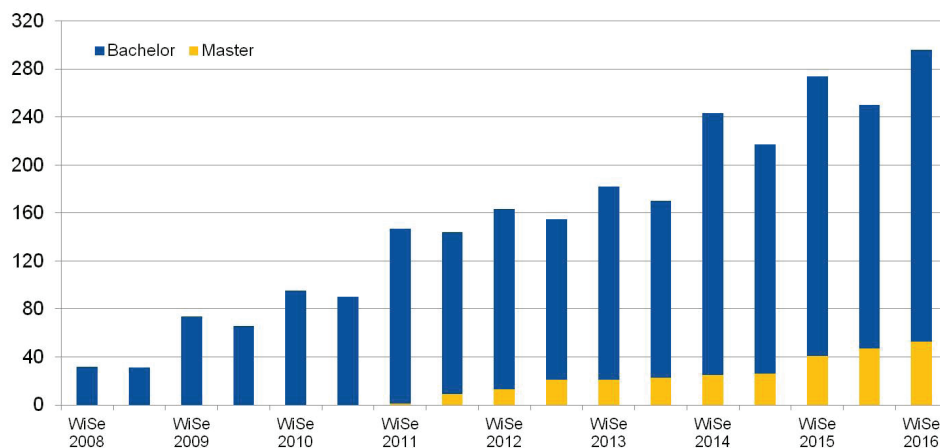
## Master Thesis

*The completion of the study course is the Master's thesis with a total duration of six months.*



Halbleiter-Labor im Nanotechnologie-Studium. Im Reinraum werden in Kleingruppen von 3-4 Personen MOS-Strukturen und pn-Dioden hergestellt und später charakterisiert.

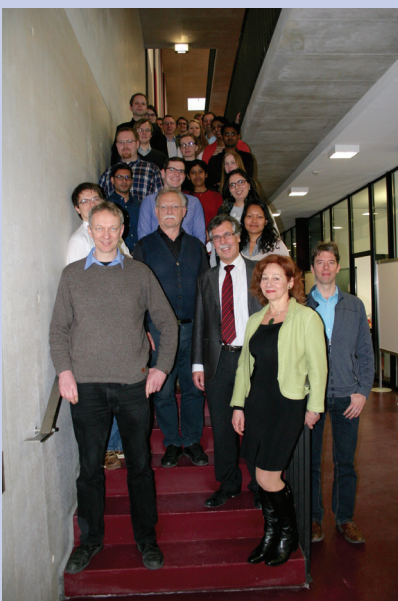
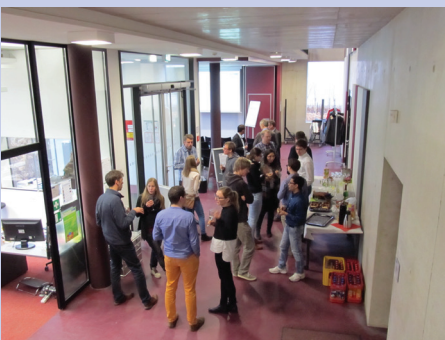
*Semiconductor lab courses in the nanotechnology study course. In the clean room MOS structures and p-n diodes are fabricated and characterized later in small groups of 3-4 people.*



Gesamtzahl der Studierenden der Nanotechnologie an der Leibniz Universität Hannover im Bachelor (Blau) und Master (Orange).

*Total number of students in nanotechnology at the Leibniz Universität Hannover in the Bachelor (Blue) and Master (Orange).*

## Promotionsprogramm/PhD-Program “Hannover School for Nanotechnology”



Die Hannover School for Nanotechnology (hsn) ist ein koordiniertes Doktorandenprogramm des Laboratoriums für Nano- und Quantenengineering der Leibniz Universität Hannover gemeinsam mit der Hochschule Hannover, gefördert als niedersächsisches Promotionsprogramm durch das Niedersächsische Ministerium für Wissenschaft und Kultur. In das Programm eingebunden sind die Disziplinen Physik, Chemie, Elektrotechnik und Maschinenbau. Koordinator des Programms ist das LNQE-Vorstandsmitglied Professor Dr. Rolf Haug. Das Ziel des Promotionsprogramms ist die interdisziplinäre Ausbildung des wissenschaftlichen Nachwuchses auf dem hochaktuellen Gebiet der Nanotechnologie. Die hsn hat es sich zum Ziel gesetzt, hervorragende Ausbildung in exzellenten Forschungsprojekten zu bieten und in möglichst kurzer Zeit ohne Qualitätsverlust zur Promotion zu führen.

Die Nanotechnologie ist eine sehr interdisziplinäre Wissenschaft, sie verlangt Kenntnisse in Chemie, Physik, Elektrotechnik und Maschinenbau. Die Hannover School for Nanotechnology führt die interdisziplinäre Ausbildung der Bachelor- und Masterstudiengänge „Nanotechnologie“ der Leibniz Universität Hannover konsequent auf die Doktorandenebene fort. Neben dem eigentlichen Promotionsthema wird den Stipendiatinnen und Stipendiaten ein maßgeschneidertes Lehrangebot geboten. Dies beinhaltet Nanotechnologie-Kurse, Seminare, Kolloquien, Kurse zur Förderung von persönlichen Fähigkeiten, und insbesondere spezielle Veranstaltungen, die einen verantwortungsvollen Umgang mit Nanotechnologie lehren. Ein besonderer Schwerpunkt von hsn ist darüber hinaus die Förderung von jungen Wissenschaftlerinnen. Für die besten Stipendiatinnen und Stipendiaten bietet die hsn nach einer Evaluation eine Fast-Track Option an, mit der die Förderung mit einem Stipendium bereits während der Masterzeit beginnt. Es wird dann der Masterabschluss erworben und nach zwei Jahren dann mit Promotion abgeschlossen.

*The Hannover School for Nanotechnology (hsn), is a coordinated PhD-programme of the Laboratory of Nano and Quantum Engineering from Leibniz Universität Hannover together with Hochschule Hannover funded within the Lower Saxony PhD-programme. Involved in the programme are the disciplines of physics, chemistry, electrical engineering, and mechanical engineering. Coordinator of the program is the LNQE board member Professor Dr. Rolf Haug. The aim of the doctoral program is the interdisciplinary training of young scientists on the highly topical field of nanotechnology. The hsn has set itself the goal of providing outstanding education in excellent research projects with the shortest possible time to doctorate without quality loss.*

*Nanotechnology is a very interdisciplinary science; it requires knowledge of chemistry, physics, electrical engineering and mechanical engineering. The Hannover School for Nanotechnology leads the interdisciplinary training of bachelor and master programs “Nanotechnology” at the Leibniz Universität Hannover consistently to doctorate level. Apart from the actual thesis topic the scholarship holders a customized curriculum is offered. This includes nanotechnology courses, seminars, colloquia, courses to promote personal skills, and in particular, special events that teach the responsible use of nanotechnology. A particular focus of hsn is beyond the promotion of young female scientists. For the best scholars offers the hsn after an evaluation a fast-track option, with the promotion starts with a scholarship during the master time. It is then acquired the master’s degree and then completed after two years with a PhD.*

*The hsn brings together partners from the LNQE and the University of Applied Sciences and Arts in Hannover (HsH). This makes it possible to enable excellent graduates of HsH the access to doctoral studies. The supervision of doctoral students is taken jointly by partners from the Leibniz Universität Hannover and the HsH. The in the LNQE won basic*

Die hsn vereint Partner aus dem LNQE und der Hochschule Hannover (HsH). Hierdurch wird es möglich, auch exzellenten Absolventen der HsH den Zugang zur Promotion zu ermöglichen. Die Betreuung der Doktorandinnen und Doktoranden wird gemeinschaftlich durch Partner aus der Leibniz Universität Hannover und der Hochschule Hannover übernommen. Die im LNQE gewonnenen Grundlagenkenntnisse werden durch die Partner in der HsH in Anwendungen überführt. Darüber hinaus kann die hsn auf ein exzellentes Netzwerk sowohl regionaler als auch internationaler Kooperationspartner zugreifen.

Zuerst wurde die hsn für den Zeitraum 2012-2016 für das Thema "Nanotechnologie für Energie" und jetzt für den Zeitraum 2016-2020 für das Thema "kleinste Sensoren" gefördert.

#### **Sektion "Energy" (201-2016):**

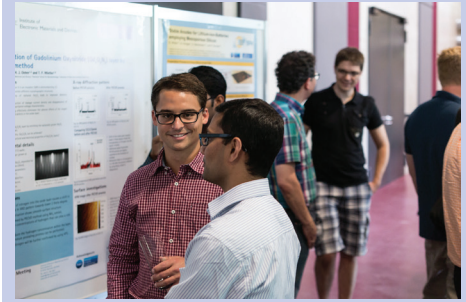
Eine der wichtigsten Fragen der heutigen Zeit ist hierbei den immer weiter steigenden Energiebedarf bei zu Ende gehenden Ressourcen zu decken und gleichzeitig die Umwelt zu schonen. Das Gebiet der Nanotechnologie kann hier wichtige Beiträge leisten, durch verbessertes Grundlagenverständnis, durch neue Anwendungen und marktfähige Produkte. Energieprozesse müssen auf der Nanoskala verstanden werden. Mit Nanomaterialien und durch Nanoengineering werden diese verbessert werden und revolutionär neue Wege zur Energiewandlung, Energiespeicherung oder Energietransport gefunden werden.

*findings are converted by the partners from HsH into applications. In addition, the hsn has access to an excellent network of both regional and international cooperation partners.*

*First, the hsn was promoted for the topic "Nanotechnology for energy" in period 2012-2016 and now for the period 2016-2020 for the topic "smallest sensors".*

#### **Section "Energy" (2012-2016):**

*One of the key questions of our time is to cover the ever-increasing demand for energy while the resources coming to an end and to protect the environment at once. The field of nanotechnology can make here important contributions through improved fundamental understanding, through new applications and through marketable products. Energy processes need to be understood at the nanoscale. With nanomaterials and nanoengineering these processes will be improved and revolutionary new ways of energy conversion, energy storage and energy transport will be found.*



Bei halbjährlichen Statustreffen (hier am 16.06.2016 in der Hochschule Hannover) stellen die Doktorandinnen und Doktoranden den Fortschritt ihrer wissenschaftlichen Arbeiten vor.

*In semi-annual status meetings (here on 16.06.2016 in the Hochschule Hannover) the doctoral students present the progress of their scientific work.*



**Sektions Sensors (2016-2020):**

Die Nanotechnologie spielt auf dem Gebiet der Sensorik eine immer größere Rolle. Sensoren mit nanoskaligen Oberflächen, Sensoren, die Informationen aus der nanoskopischen Welt in der makroskopischen Welt übertragen und Sensoren, die Nanoeffekte als Sensor-Prinzip verwenden, können zusammen als Nanosensoren definiert werden. Nanosensoren basieren oft auf unterschiedlichen Messprinzipien als herkömmliche Sensoren, die spannende Möglichkeiten für Forschung und Entwicklung eröffnen.

**Section Sensors (2016-2020):**

*Nanotechnology is playing an ever greater role in the field of sensor technology. Sensors with nanoscale surfaces, sensors that transfer information from the nanoscopic world in the macroscopic world and sensors that use nanoeffects as sensor principle, can be collectively defined as nanosensors. Nanosensors are often based on different measurement principles than conventional sensors, which open up exciting possibilities for research and development.*



Für hsn-sensors wurden zwölf Georg-Christoph-Lichtenberg-Stipendien sowie die dazu benötigten Sach- und Reisekosten bewilligt. Die gesamte Fördersumme beträgt 802.800,- Euro für den Zeitraum vom 01.10.2016 bis 30.09.2020. Es gab 300 Bewerbungen aus 50 verschiedenen Ländern auf die Stipendien von hsn-sensors, welches bereits im Oktober 2016 mit den ersten Teilnehmerinnen und Teilnehmern gestartet ist. Wie bereits beim Vorgänger hsn-energy wird in das Programm zusätzlichen Doktorandinnen und Doktoranden aus den beteiligten Arbeitsgruppen aufnehmen.

*For hsn-sensors, twelve Georg-Christoph-Lichtenberg fellowships and the necessary material and travel expenses were granted. The total funding amounts to 802.800 euros for the period from 01.10.2016 to 30.09.2020. There were 300 applications from 50 different countries on the scholarships of hsn-sensors, which was launched in October 2016 with the first participants. As with the predecessor hsn-energy, the program will include additional doctoral students from the participating research groups.*



PhD Program "Hannover School for Nanotechnology" Semester Overview										
Master's degree program				PhD degree program						
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Master's degree in the relevant subject, i. e. nanotechnology, physics, chemistry, electrical engineering, civil engineering or mechanical engineering or				Special Lecture: Interdisciplinary Nanotechnology 2 hours/week lecture + 2 hours/week exercise course during semester						
		Master's thesis 6 months. The contents of the thesis can be used as preparation for the dissertation.		Responsible Nanotechnology (2 hours/week lecture or 1 week block each semester)			Focus on publishing	Writing of the PhD dissertation		
				Professional Skills (1 week block each semester)						
Mentoring by the future supervisor of the PhD thesis to optimize the master's program in terms of the PhD thesis				hsn seminar 2 hours/week during semester						
				Doctoral research work						
Promoting the preliminary phase				Funding with PhD Fellowship for 3 years						
Funding with PhD Fellowship in Fast-Track										

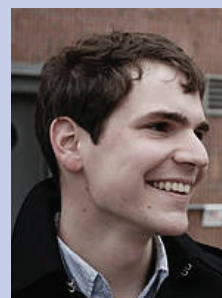
## PhD-projects of hsn-energy

### Investigation of surface functionalized nanooptical and plasmonic systems for use as bionanosensors

Supervisor: B. Chichkov

Researcher: T. Birr

In this project, multipole-particle and plasmonic systems will be designed and optimized. Metallic and dielectric films will be structured with different optical lithographic approaches to assemble plasmonic systems. The linear and nonlinear optical properties of multipole-particles embedded in plasmonic systems open new possibilities for fundamental and applied research in ultrafast nanooptics. Their response to optical and surface plasmon-polariton fields will be studied by Fourier-transform microscopy and temporally resolved interferometric leakage radiation microscopy, respectively. Ultrafast switching of optical properties of multipole-particles and particle systems will be studied, using excitation of interband transitions and adiabatic metallization effects induced by ultrashort laser pulses. In plasmonic systems embedded ordered and random hybrid nanostructures with functionalized surfaces can be applied as novel highly sensitive sensor elements. Of special interest is the study of magnetic dipole interactions, providing unique possibilities for novel low-intensity switching elements and for probing magnetic fields at optical frequencies.



Tobias Birr

### Chemisorbed single molecules as electronic switches

Supervisor: P. Pfnür, F. Renz

Researcher: A. Chatterjee

The aim of this project is the direct investigation of the electrical conduction properties of single molecules with extended electronic  $\pi$ -systems, which are chemically bound to metallic contacts. We want to investigate the structure and the adsorption geometry at the atomic scale and finally want to functionalize these molecules and induce switchability by electric fields via the substrate or by additional electrodes. As a starting point we are planning to use silver electrodes and coordination compounds, such as functionalized ferrocene and phenyl substituted molecules (the latter as reference systems). For this purpose laterally open contact structures will be used, which allow direct access to the contact together with the adsorbed molecules. By use of the combination of a 4-probe STM with an SEM all steps like generation and characterization of contacts and molecules at the atomic scale can be carried out in situ, as well as electrical transport measurements. We further plan to vary chemical end groups and temperature in order to study the influence of coupling of the molecule to its environment on transport properties.



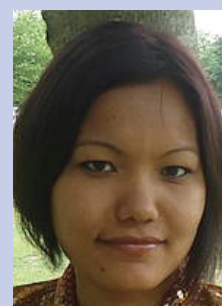
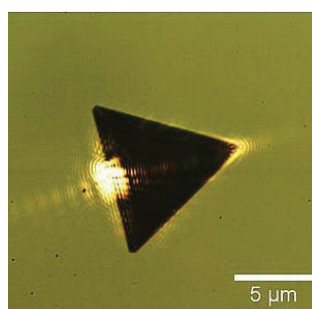
Atasi Chatterjee

### Nanoparticles for Enhanced Photovoltaics, Nanoheating and Sensors

Supervisor: B. Chichkov, C. Reinhardt

Researcher: P. Chhantyal

The main property of metal and semiconductor nanoparticles is their resonant responses as a reaction on external optical fields, concentrating energy inside and around the particles and making them very attractive for different practical applications, e.g. sensor technology, surface-enhanced Raman spectroscopy, and efficiency enhancement in photovoltaic devices. Additionally, Joule heating of plasmonic nanostructures by the induced currents leads to localized heat sources on the nanometer scale, enabling new concepts for nanoscale medicine and chemistry. These topics attract great attention from both experimental and theoretical points of view in the last two years. In this work, metal and semiconductor nanoparticles with adjustable diameters in the range of 40 – 200 nm and periodic nanoparticle structures will be generated by use of femtosecond lasers systems. The nanoparticle structures and their applications for sensing, photovoltaics, and nanoheating will be studied.



Parva Chhantyal



Andreas Grimm

### Relaxed germanium films on off-oriented silicon wafers as substrates for epitaxial III-V solar cells

Supervisor: T. Wietler, J. Osten

Researcher: A. Grimm

Off-oriented germanium wafers are the common substrates for high-efficiency multi-junction III-V photovoltaic cells for space applications and terrestrial concentrator photovoltaic systems. A miscut of  $6^\circ$  with respect to the [001]-orientation provides a Ge surface formed solely by double atomic steps which is mandatory to avoid anti-phase boundaries in subsequent III-V growth. This project is dedicated to the replacement of Ge wafers with epitaxial Ge films grown on miscut Si wafers. This solution could be cost-efficient because Si wafers are much cheaper than Ge wafers. Further cost reduction potential is at hand due to the larger wafer sizes available for Si. The growth of smooth relaxed Ge films with low defect densities on on-axis Si substrates can be accomplished by controlling the strain relaxation during epitaxy using surfactants. Thus, the application of surfactant-mediated epitaxy to  $6^\circ$  off-oriented Si(001) substrates could provide cheap Ge substrates for epitaxial III-V films.



Lars Heyer

### Molecular Switches Based on Iron(II) Coordination Compounds

Supervisor: F. Renz

Researcher: L. Heyer

The aim of this project is the design, development, and investigation of switchable nanoscopic coordination compounds for storage and transformation of energy. The compounds exhibit concerted and sequential electronic molecular switching upon thermal or electro-magnetical excitation. The investigation of the associated conversion and transport of the thermally or optically injected energy is the main focus. A milestone is the synthetical modification of the switchable multinuclear compounds. Such modification is based on electro-nical or sterical substitutions in the organic framework as well as in the metal centers. The switching of the compounds will be investigated in powder and / or crystalline states.



Dominik Hinrichs

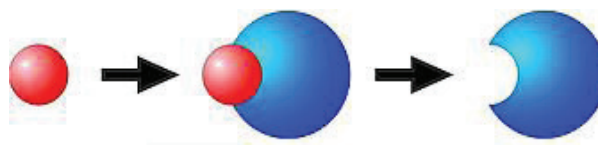
### Semiconductor nanoparticles with concave morphologies for sensory key-lock applications

Supervisor: D. Dorfs, N. Bigall

Researcher: D. Hinrichs

The properties of nanoparticles are not just influenced by their composition, size and surface functionalization but also by their shape. In general crystals grow in a convex morphology but new synthetic strategies opened access to concave structures. These concave structures show promising features for e. g. sensory key-lock applications.

We want to transfer the so called "cast mold" approach to a variety of materials. In this approach a semiconductor is grown on a nanoparticle e. g. a metal nanoparticle. Afterwards the latter is etched to receive a concave shaped semiconductor nanoparticle. The so obtained cave can interact size-sensitive with other nanoparticles, which could be exploited for sensory applications.

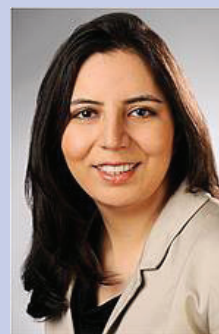


### Nanocrystalline Electrodes for (Solar) Photoelectrochemical Water Splitting

Supervisor: D. Bahnemann, J. Caro

Researcher: M. Jami

Photoelectrochemical (PEC) Tandem Cells with anodes and cathodes both of which are consisting of suitable semiconducting materials ensuring watersplitting into molecular oxygen and hydrogen, respectively, upon solar illumination are ideally suited for the conversion and storage of solar energy. Employing materials with sufficient abundance such as hematite (iron oxide) and pyrite (iron sulphide) n- and p-doped crystalline nanoparticles with suitable bandgap energies and band positions shall be synthesized employing wet chemical bottom-up methods and bandgap engineering, i.e., utilizing the quantum size effect. Sol/Gel synthesis methods will then be used to prepare the respective photoanodes and -cathodes for the PEC cells. While the overall performance of these cells will be investigated under (simulated) solar illumination, the project will focus on a detailed understanding of the involved individual reaction steps at both photoelectrodes. The latter processes will be studied combining suitable (photo)electrochemical analysis with time-resolved techniques (e.g., laser flash photolysis) and spatially resolved spectroscopic methods (e.g., ATR-FTIR spectroscopy). It is another important target of this project to develop – in close collaboration with other teams of the HSN – suitable models to describe the processes involved thus enabling the development of scale-up PEC assemblies for the anticipated industrial utilization.



Maryam Jami

### Preparation and properties of gadolinium oxynitrides

Supervisor: J. Osten, T. Wietler

Researcher: A. Joseph

For the continued scaling of metal oxide semiconductor (MOS) devices to achieve high performance and good integration, the thickness of silicon dioxide gate dielectrics must be decreased. As the thickness of gate dielectrics decreases, direct tunneling current increases exponentially, therefore, high-k gate dielectrics have recently received much attention, because tunneling current can be reduced by increasing physical film thickness. On this concept the idea mainly focusses on the preparation and detailed analysis of Gadolinium oxynitrides.



Anit Joseph

### Hybrid semiconductor/metal nanoparticles produced by colloid chemistry for photo catalytic conservation of energy

Supervisor: J. Caro, D. Dorfs

Researcher: T. Kodanek

With today's strong focus on renewable energy sources, also the conversion of e.g. solar energy into chemically bound energy comes into the focus of recent research activities. Very popular examples are e.g. fuel cells as energy conversion units which relay on chemically stored energy in form of hydrogen. This hydrogen could e.g. be produced exploiting solar energy via the photo catalytic splitting of water. In the framework of this project, novel metal semiconductor/metal hybrid nanoparticles shall be synthesized via means of colloid chemistry and their performance for various photocatalytic reactions will be evaluated. Apart from simple (quasi) spherical nanoparticles, also more elaborately shaped nanoparticles like rods and branched nanoparticles shall be synthesized and their photocatalytic performance will be compared to spherical ones. A focus will be put on structure property correlations with specific focus on size and shape of the nanocrystals, their crystal faceting and the character of the metal/semiconductor interface.



Torben Kodanek



Imme Kretschmer

### Photocatalytic watersplitting at hematite nanostructures

Supervisor: D. Bahnemann

Researcher: I. Kretschmer

Hematite ( $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) is discussed to be a promising material for the fabrication of photoanodes for the oxygen evolution from water in photoelectrochemical (PEC) cells. To overcome inherent limitations of this material nanostructuring has been proposed. Thus, the optimization of the morphology of hematite photoanodes is the ultimate goal of this project. Hematite with controlled ordered mesoporosity, large surface areas and highly crystalline walls will be synthesized by a novel sol-gel approach ("brick and mortar"), electrochemical deposition and deposition in a 3D-mesoporous conductive indium-tin oxide (ITO) network. All the obtained nanostructures will be photo-electrochemically characterized in detail and charge carrier dynamics will be studied employing laser flash photolysis and stopped-flow techniques. Since it is known that under irradiation with light of wavelengths smaller than the band gap energy of hematite photodissolution of iron(II) can occur and this might possibly alter the morphology of the photoanode and their photoelectrochemical characteristics, the dissolution-precipitation mechanism will be analyzed and methods to improve the long-term stability of the anodes will be elaborated.



Manish Kumar

### Energy transfer and -conversion by functionalized nano-bio-fibers

Supervisor: R. Sindelar, F. Renz, A. Otten, H. Widdecke

Researcher: M. Kumar

In the frame of the project functionalized nano-fibers are developed and their energy transmitting and conversional properties are investigated and applied to technical cases. Energy, e.g. photonic or electric or magnetic nature, can be transferred by nano-scaled fibers produced by electro-spinning. Especially fibers made of bio-polymers are of interest in the field of lifesciences and medical engineering. Functionalization by coordination compounds allows localized energy conversion for various applications such as signal transmittance. The project covers production, characterization and functionalization of the nano-fibers.

Brij Mohan  
Mundotiya

### Nanocrystallite electroplated softmagnetic layers

Supervisor: L. Rissing, M. Wurz

Researcher: B. M. Mundotiya

In magnetic sensors and actuators soft magnetic layers serve as flux guides. The experience shows that bulk materials have mostly better magnetic properties than thin film layers. Today materials and their alloys based on Ni, Fe and Co are in use. These materials are deposited by thin film processing using vacuum processes. An alternative procedure is to deposit layers by electroplating. The magnetic properties are depending on numerous influences. One property is the size of the crystals in the magnetic layers. The aim of this project is to adjust the size of the crystallites during the electroplating process and reduce them to nanoscale. By this approach the permeability can be increased. The necessary equipment for the electroplating process is installed at the IMPT. The project should start with collecting information from papers concerning the state of the art and develop a new approach to nanocrystallite softmagnetic layers.



### Novel materials for zinc-air batteries

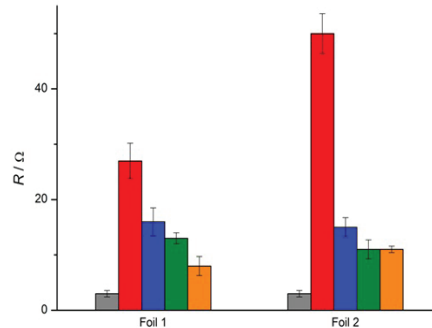
Supervisor: P. Behrens, N. Guschanski

Researcher: D. Nettelroth

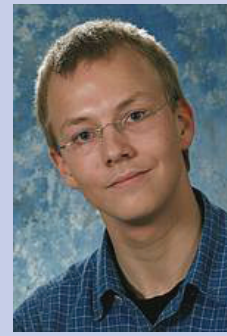
The volumetric and specific energy density of Zn-air batteries is higher than that of lithium ion batteries. The aim of this project is to develop economically viable and environmentally friendly solutions for several problems which still have to be overcome for these batteries. The cathode is an electrode

with a three-phase boundary (air-electrolyte-solid). Employing carbon nanomaterials (nanotubes, graphene, graphite oxide) the properties of this gas diffusion electrode shall be improved, possibly avoiding expensive noble-metal catalysts.

The electrolyte shall be adapted by rather using neutral solutions instead of the commonly employed aggressive alkaline solutions which also lead to the undesired formation of carbonates. In this way, laboratory models of secondary Zn-air batteries shall be developed which will be tested electrochemically and with regard to cycle stability, lifetime and for their suitability for daily use in industrial applications.



*Electrical resistance for nickel foils (grey) and the carbon coated nickel foils. Red: amorphous mesoporous carbon; blue: TG = 700 °C; green: TG = 800 °C, yellow: TG = 900 °C. TG stands for graphitization temperature*



Dennes Nettelroth

### Untersuchungen zu den Eigenschaften von weichmagnetischen Dünnschichten auf Polymersubstraten am Beispiel eines flexiblen Sensorarrays

Supervisor: L. Rissing

Researcher: J. Rittinger

Im Rahmen dieser Arbeit soll ein flexibles Sensorarray, an dessen Beispiel der Substrateinfluss auf die Eigenschaften von weichmagnetischen Dünnschichten untersucht wird, entwickelt und hergestellt werden. Die Fertigung dieses Sensorarrays erfolgt dünnfilmtechnisch.

Als flexibles Trägermaterial bzw. Substrat sollen verschiedene Polyimid-basierte Dünnschichten in die Untersuchungen einbezogen werden. Diese werden in Bezug auf vorherrschende Eigenspannungen, Oberflächenqualität und mechanischen Eigenschaften charakterisiert.

Weiterhin muss ein geeignetes Design des zu realisierenden Sensorarrays entwickelt werden. Die zur Fertigung des Sensorarrays benötigten dünnfilmtechnischen Prozesse müssen ermittelt und im Anschluss durchgeführt werden. Am realisierten, flexiblen Sensorarray werden die Eigenschaften der aufgetragenen Sensor-Dünnschichten eruiert. Die durchzuführenden Untersuchungen umfassen die morphologischen, mechanischen und magnetischen Eigenschaften dieser Schichten.



Johannes Rittinger



Johannes Rode

### Graphene for Energy Storage and Conversion

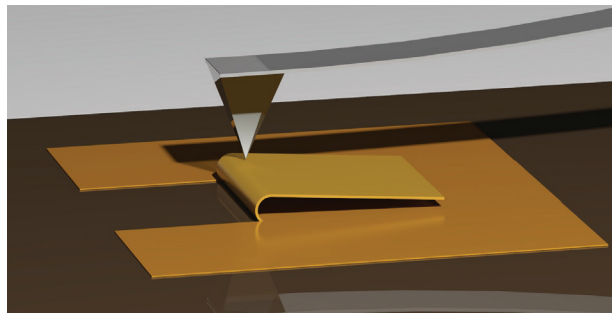
Supervisor: R. Haug, P. Behrens

Researcher: J. Rode

Only for a decade now, we know that it is possible to investigate a single layer of graphite which is called graphene. Nevertheless, it is already clear that graphene is one of the most fascinating materials ever found. Due to its unique mechanical and electronic properties it is suggested to be extremely interesting in applications concerning storage or conversion of energy.

The focus of this project lies on double-layered graphene systems of a certain rotational mismatch also called Twisted Bilayer Graphene (TBG). TBG samples are folded out of single layers by nanomachining with an Atomic Force Microscope (AFM); AFM-measured morphology in as-prepared structures is found to hold a surprising riches of information about interlayer interaction[1].

Selected TBG samples are electrically probed in magnetotransport measurements. Qualitatively different signatures like a transition in Berry phase[2] and satellite features in Landau quantization[3] are found in accordance with theory and point towards a sensitive connection between TBG morphology and electronic dispersion.



Schematic of a graphene sheet (orange); a selected area is folded out via Atomic Force Microscope, thereby creating Twisted Bilayer Graphene.

[1] J. C. Rode; C. Belke; H. Schmidt; R. J. Haug, Interlayer Configurations in Twisted Bilayers of Folded Graphene, arXiv:1608.08133 [cond-mat.mtrl-sci] (2016).

[2] J. C. Rode; D. Smirnov; H. Schmidt; R. J. Haug, Berry phase transition in twisted bilayer graphene, 2D Materials 3, 035005 (2016).

[3] H. Schmidt; J. C. Rode; D. Smirnov; R. J. Haug, Superlattice structures in twisted bilayers of folded graphene, Nature Communications 5, 5742 (2014).



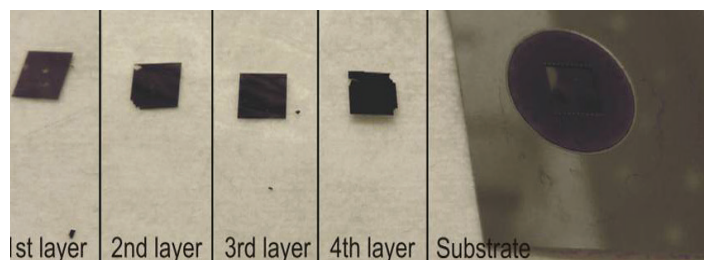
Sören Schäfer

### Fabrication and Characterization of Macroporous Silicon and its potential for solar cell application

Supervisor: R. Brendel

Researcher: S. Schäfer

First goal within this project is to develop a method to detach multiple thin macroporous layers from Czochralski grown silicon substrate on an area of  $1\text{cm}^2$ . The electrochemical process used therefore has to be optimized. Cylindrical holes are etched into the substrate's surface. In a depth of 20 to 30  $\mu\text{m}$  - the thickness of the absorber layer (see figure) - the pore diameters are widened in order to create a defined breakage point. Afterwards the pore diameter is decreased again. The process repeats several times and potentially allows an optimal material use of the Si substrate. For further electrical and optical characterization of the absorber layers, the process shall be transferred to a larger area. The long term goal is to qualify the absorber layers as active material for thin film solar cells.



**Impact of virtual substrates on the growth of rare earth oxides**

Supervisor: J. Osten

Researcher: J. Schmidt

Das MBE-Institut beschäftigt sich seit mehreren Jahren mit dem epitaktischen Wachstum von kristallinen Seltene-Erden-Oxiden auf Si-Substraten. Als Modellsysteme werden dabei die Sesquioxide Gadoliniumoxid ( $Gd_2O_3$ ) und Neodymoxid ( $Nd_2O_3$ ) untersucht. Beide Oxide treten in dergleichen kristallografischen Struktur auf, wobei  $Gd_2O_3$  einen kleineren Gitterabstand als Silizium aufweist während  $Nd_2O_3$  größer als Silizium ist. In der Vergangenheit wurden ternäre Mischschichten der Form  $(Gd_{1-x}Nd_x)_2O_3$  (mit  $x = 0 \dots 1$ ) auf Silizium gewachsen, d.h. die Gitterfehlpassung konnte durch die Wahl der Zusammensetzung durchgestimmt werden. Auf diese Weise konnten erste Informationen zum Einfluss der Gitterverspannung auf dielektrische Eigenschaften von ternären Schichten gewonnen werden [1]. Alternativ kann der Spannungszustand von binären Oxiden durch den Einsatz von virtuellen Substraten mit größerer in-plane Gitterkonstante eingestellt werden. Hierbei bieten sich insbesondere relaxierte  $Si_{1-x}Ge_x$ -Schichten auf Si an.

Im Rahmen der Promotion „Einfluss von virtuellen Substraten auf das Wachstum von Seltene Erden Oxiden“ werden zwei Themenkomplexe bearbeitet: Im ersten Teil wird eine Methode entwickelt, um glatte, relaxierte Silizium-Germaniumschichten mit unterschiedlichen Zusammensetzungen auf Siliziumsubstrate mit einer (001)- als auch einer (111)-Orientierung zu wachsen. Dafür wird der Ansatz der Kohlenstoff-unterstützten Epitaxie verwendet, der bereits für die Epitaxie von Germanium auf Si(001) Substraten vorgestellt wurde. Diese Schichten sollen für den zweiten Teil der Arbeit als virtuelle Substrate dienen. Die Schichten werden mittels Molekularstrahlepitaxie hergestellt und anschließend auf ihre strukturellen Eigenschaften untersucht. Im zweiten Abschnitt werden Seltene Erden Oxide auf die virtuellen Substrate aufgewachsen und anschließend bezüglich ihrer strukturellen und elektrischen Eigenschaften charakterisiert. Dabei sollen sowohl binäre  $Gd_2O_3$  als  $Nd_2O_3$  Schichten strukturell und elektrische untersucht werden.

Ziel der Arbeit ist ein vertieftes Verständnis des Zusammenhangs von Struktur und dielektrischen Eigenschaften der dünnen Schichten durch das Einbringen einer definierten Verspannung in das Kristallgitter des binären Oxids. Dies wird durch die Wahl des virtuellen Substrates realisiert, wobei insbesondere für  $Nd_2O_3$  sowohl eine Druck- als auch eine Zugspannung in das Gitter des Seltene Erden Oxids eingebracht werden kann.

[1] D. Schwendt: Charakterisierung von binären und ternären Seltene Erden Oxiden, Dissertation, Gottfried-Wilhelm Leibniz Universität Hannover, 2012.



Jan Schmidt



Camilla Sehring

### Near-infrared reflective coatings for cool roof applications

Supervisor: D. Bahnemann, P. Behrens

Researcher: C. Sehring

Cool roofs can mitigate the growing Urban Heat Island effect as well as the increasing energy consumption for air conditioning. By reflecting the solar radiation very efficiently the amount of energy absorbed by the building can be minimized making the interior of the building cooler.

White roofs are already able to reflect high amounts of solar energy. As many homeowners prefer nonwhite roofs, there is a need for cool colored roofs.

The purpose of this project is to develop coatings for tiles which reflect high amounts of invisible near-infrared (NIR) sunlight while keeping the same spectral response of traditional tiles or being transparent in the visible region. Taking into account that the sun emits about 58% of its energy as NIR radiation, a significant improvement in building passive cooling can be achieved, even for dark colors.

In particular, this project deals with the preparation and investigation of NIR reflecting coatings by adding appropriate "cool" nanopigments. These pigments could be new inorganic colored nanopigments, which offer improved NIR-reflecting capabilities while keeping the optical properties in the visible spectrum unchanged. Another kind of promising particles for that purpose could be highly doped transparent conductive oxides (TCOs), which are transparent to visible light but still NIR-reflective.

The desired properties are planned to be achieved by tuning the crystal size and distribution of selected nanostructured oxides, as well as by choosing suitable doping materials and ratios. The developed coatings are examined for their IR reflectance properties, surface temperature and the thermal emission to evaluate the effect of different pigments/particles, binders and coating thicknesses. The results are compared to coatings prepared with commercially available pigments.

### Superparamagnetic core-shell nanoparticles as inductive heatable tools for release of chemotherapeutics in medical hyperthermia

Supervisor: A. Kirschning, F. Renz

Researcher: K. Seidel

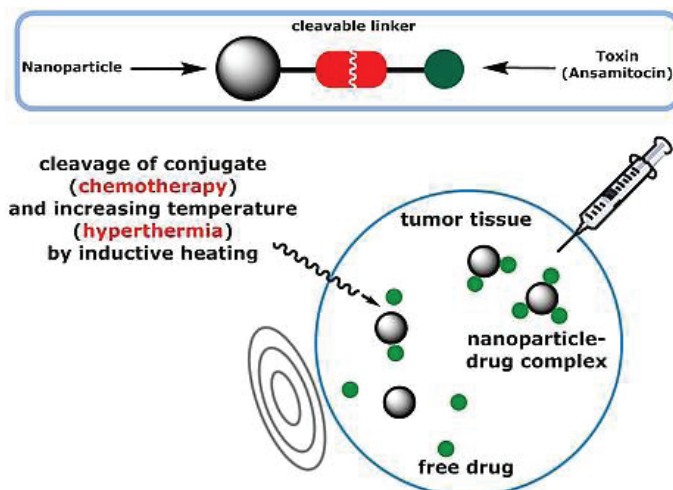
One of the largest challenges in current cancer therapy based on cytotoxic drugs is the quest for reducing the side effects on healthy tissue and organs.

This research topic pursues a new concept that is based on the chemical functionalization of superparamagnetic nanoparticles with a cytotoxic drug such as ansamitocin to achieve a temperature dependent magnetic-drug-targeting system. By combining hyperthermia with a highly cytotoxic drug it is expected to address solid tumors more specifically and with higher efficacy.

Optimization of iron oxide silica core-shell nanoparticles for functionalization with complex drugs is the principal topic of the Ph.D. thesis. The Ph.D. thesis is carried out in close collaboration on nanoparticle design and characterisation with the LNQE. The in vivo experiments of the conjugate are currently done with the collaboration of the workgroup of Prof. Dr. Ott (Twincore, Medical University of Hannover).



Katja Seidel



### Experimental and Computational Characterization of Elastomer-Fabrics Produced by Electro-Spinning

Supervisor: U. Nackenhorst, R. Sindelar

Researcher: Christian Thomas

The overall goal of the thesis is the development of a computational mechanics framework for the prediction of the mechanical behavior of fabrics produced from electro-spinning of elastomers. The computational model will be based on the Finite Element Methods within the framework of non-linear continuum mechanics, including large deformation theory and inelastic constitutive material models. In parallel, goal oriented experimental setups will be designed to produce well defined probes and related experiments for the characterization of the mechanical behavior of single fibers in dependency of their basic material composition as well as their geometrical length scale.



Christian Thomas

### Concerted and sequential switching in nanoscopic compounds

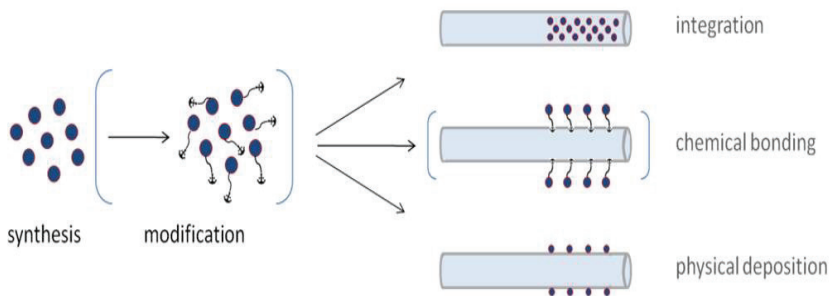
Supervisor: F. Renz, M. Oestreich, R. Sindelar

Researcher: D. Unruh

Concerted and sequential switching in nanoscopic compounds The aim of this project is the design, development, and investigation of switchable nanoscopic coordination compounds for storage and transformation of energy. The compounds exhibit concerted and sequential electronic molecular switching upon thermal or electro-magnetical excitation. The investigation of the associated conversion and transport of the thermally or optically injected energy is the main focus. A milestone is the synthetical modification of the switchable multinuclear compounds.

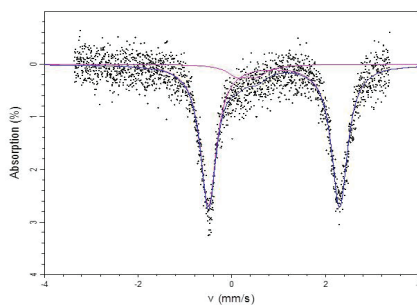


Daniel Unruh

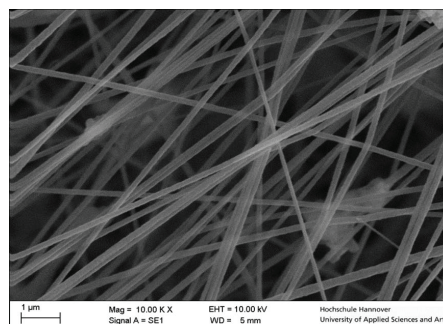


*Schematic incorporation of switching molecules in polymer fiber.*

Such modification is based on electronical or sterical substitutions in the organic framework as well as in the metal centers. The switching of the compounds will be investigated in powder, crystalline and anisotropic matrix oriented states. The dichroism in the matrix is achieved by incorporation in nanoscopic polymer fibers produced by electro-spinning. Potential applications will be investigated.



*Mössbauer-spectrum of an iron(II) spin crossover compound*



*SEM-picture of functionalized nanoscopic polymer fiber*



Julia Susan  
Wiegand

### Ultrafast optical spectroscopy of interactions and energy transfer in single molecules

Supervisor: M. Oestreich, F. Renz

Researcher: J. Wiegand

Abstract: The aim of this project is the investigation of concerted and sequential molecular switching in nanoscopic coordination compounds under optical energy injection by ultrafast optical spectroscopy. The compounds comprise multinuclear single molecules which show a distinct switching and interaction behaviour upon thermal or electro-magnetical excitation. The vast majority of all reactions occur within a sequential mechanism, whereas concerted inorganic reactions are not yet understood. The exploration of the associated conversion and transport of the optically injected energy and of the nature of this concerted reaction is the main focus. The importance of the excited states and their lifetimes and spin-flip mechanisms of the macro molecules will be addressed via ultrafast magneto-optical spectroscopy. There is a close collaboration with the project "Concerted and sequential switching in nanoscopic compounds" in which the design, synthesis and characterisation of such compounds will be performed. The two projects will feed-back on each other and allow optimizing the synthesis and exploring the nature of the switching and interaction behaviour.



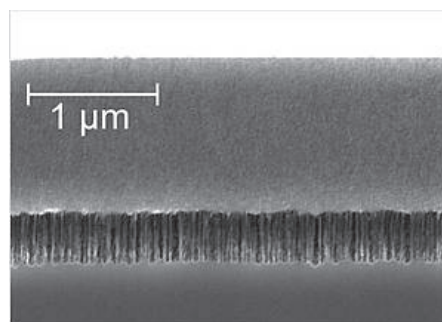
Sascha Jozsef  
Wolter

### Nano porous silicon for electricity storage

Supervisor: R. Brendel, D. Bahnemann

Researcher: S. Wolter

Low cost electricity storage is important to cope with the volatile nature of solar energy and wind energy. Crystalline Si is an attractive material not only for Si solar cells but also for storing electricity. It is known from the literature that Si nanostructures exhibit a ten-fold storage capacity for Li ions when compared with conventional graphite anodes. This project evaluates nanostructured porous Si as an anode for Li-ion batteries. The porous Si layers are prepared by an electro chemical etching procedure. The project aims at optimizing the electrochemical etching conditions for achieving a large and stable storage capacity. With the technological equipment available at ISFH ([www.isfh.de](http://www.isfh.de)) it will be possible to investigate new porous Si modifications. The candidate shall measure and model the interplay of the etching chemistry, the porous Si structure, and the storage performance. At ITC the candidate shall investigate the reaction steps for charging and discharging of porous nanostructures. The project will be co-supervised by a physicist and a chemist.



*Scanning electron micrograph of a double layer of meso-porous silicon. The porosity of the top layer is 20% and that of the bottom layer is 50%*

## Publications of hsn-energy

**Kumar M, Rahikainen R, Unruh D, Hytönen VP, Delbrück C, Sindelar R, Renz:** Mixture of PLA-PEG and Biotinylated Albumin enables Immobilization of Avidins on Electrospun Fibers, *J Biomed Mater Res A*. 105A, (2017) 2.

The paper received the Student award in the undergraduate category.

DOI: 10.1002/jbm.a.35920

**J. Schmidt, D. Tetzlaff, E. Bugiel, T. Wietler:** Surfactant-Mediated Epitaxy of Thin Germanium Films on SiGe(001) Virtual Substrates, *Journal of Crystal Growth* 457 (2017) 171–176

DOI: 10.1016/j.jcrysgro.2016.06.053

**Johannes C Rode, Dmitri Smirnov, Henrik Schmidt and Rolf J Haug:**

Berry phase transition in twisted bilayer graphene

*2D Mater.* 3 (2016) 035005

DOI: 10.1088/2053-1583/3/3/035005

**A. Joseph, D. Tetzlaff, J. Schmidt, R. Böttger, T. F. Wietler, H. J. Osten:**

Formation and properties of high-dose nitrogen implanted epitaxially grown

Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> on silicon, *Journal of Applied Physics* 120 (2016) 144103

DOI: 10.1063/1.4964431

**A. K. Katiyar, A. Grimm, R. Bar, J. Schmidt, T. F. Wietler, H. J. Osten and**

**S. K Ray:** Room temperature direct band gap emission characteristics of surfactant mediated grown compressively strained Ge films, *Nanotechnology*, Volume 27, Number 43

DOI: 10.1088/0957-4484/27/43/435204

**Andreas Grimm, Andreas Fissel, Eberhard Bugiel, Tobias F. Wietler:** In situ observation of low temperature growth of Ge on Si(1 1 1) by reflection high energy electron diffraction, *Applied Surface Science*, Volume 370, 1 May 2016, Pages 40–48

DOI: 10.1016/j.apsusc.2016.02.144

**B. M. Mundotiya, L. Rissing, and M. C. Wurz:** Effect of Annealing Temperature on the Coercivity and the Electrical resistivity of the Electroplated Ni-Fe-W alloy film, *ECS Transactions*, 75 (2) 59-65 (2016)

DOI: 10.1149/07502.0059ecs

**Brij Mundotiya, Lutz Rissing, Marc Wurz:** Effect of Substrate Temperature on Magnetic Properties of Electroplated 82Ni–15Fe–3W Alloy Films, *IEEE Transactions on Magnetics*, 52, 8, 2016

DOI: 10.1109/TMAG.2016.2549987

**D. Nettelroth, H.-C. Schwarz, N. Burblies, N. Guschanski, P. Behrens:**

Catalytic graphitization of ordered mesoporous carbon CMK-3 with iron oxide catalysts: Evaluation of different synthesis pathways, *PSS A* 213 (2016)

1395–1402

DOI: 10.1002/pssa.201532796

**D. Unruh, P. Homenya, M. Kumar, R. Sindelar, Y. Garcia, and F. Renz:**

Spin State Switching of Metal Complexes Switched by Visible Light or Hard X-Rays, *Dalton Trans.*, 2016,45, 14008-14018

DOI: 10.1039/C6DT01745B

**Dominik Hinrichs, Michael Galchenko, Torben Kodanek, Suraj Naskar, Nadja Bigall, Dirk Dorfs:** Chloride Ion Mediated Synthesis of Metal/Semiconductor Hybrid Nanocrystals, *Small* 2016, 12, No. 19, 2588–2594

DOI: 10.1002/smll.201600430

**Freytag, A., Sánchez-Paradinas, S., Naskar, S., Wendt, N., Colombo, M., Pugliese, G., Poppe, J., Demirci, C., Kretschmer, I., Bahnemann, D. W., Behrens, P. and Bigall, N. C.** : Versatile Aerogel Fabrication by Freezing and Subsequent Freeze-Drying of Colloidal Nanoparticle Solutions, *Angew. Chem. Int. Ed.* 2016, 55, 1200–1203  
DOI: 10.1002/anie.201508972

**L. Heyer, B. Dreyer, A. Preiss, M. Menze, S. Klimke, M. Jahns, R. Sindelar, G. Klingelhöfer, B. F. O. Costa, F. Renz:** Mössbauer investigation of novel pentadentate Schiff base complexes, *Hyperfine Interactions*, (2016) 237:88  
DOI: 10.1007/s10751-016-1259-8

**Liang-Liang Wang, Asha Balakrishnan, Nadja-Carola Bigall, David Candito, Jan Frederick Miethe, Katja Seidel, Yu Xie, Michael Ott, Andreas Kirschning:** A bio-chemosynthetic approach to superparamagnetic iron oxide - ansamitocin conjugates for use in magnetic drug targeting (MDT), *Chem. Eur. J.* 10.1002/chem.201604903 (2016)  
DOI: 10.1002/chem.201604903

**S. Friebe, A. Mundstock, D. Unruh, F. Renz, J. Caro:** NH<sub>2</sub>-MIL-125 as membrane for carbon dioxide sequestration: Thin supported MOF layers contra Mixed-Matrix-Membranes, *Journal of Membrane Science* (2016), 516, 185-193  
DOI: 10.1016/j.memsci.2016.06.015

**T. Meyer, M. Wolf, B. Dreyer, D. Unruh, C. Krüger, M. Menze, R. Sindelar, G. Klingelhöfer, F. Renz:** Electrospun complexes - functionalised nanofibres, *Hyperfine Interactions*, 2016, 237:89  
DOI: 10.1007/s10751-016-1256-y

**Tobias Birr, Urs Zywiets, Tim Fischer, Parva Chhantyal, Andrey B. Evlyukhin, Boris N. Chichkov, Carsten Reinhardt:** Ultrafast surface plasmon-polariton interference and switching in multiple crossing dielectric waveguides, *Appl. Phys. B* (2016) 122:164  
DOI: 10.1007/s00340-016-6437-5

**Wolter, S. J.; Köntges, M.; Bahnemann, D.; Brendel, R.** : Stable Anodes for Lithium Ion Batteries Made of Self-Organized Mesoporous Silicon, *Semicond. Sci. Technol.* 2016, 31, 014007. (2016)  
DOI: 10.1088/0268-1242/31/1/014007

**J. Schmidt, M. Eilert, S. Peters, T. F. Wietler:** Characterization of thin SiGe layers on Si (001) by spectroscopic ellipsometry for Ge fractions from 0 to 100% , *Applied Surface Science* (2016)  
DOI: 10.1016/j.apsusc.2016.08.091

**Mehriban Ulusoy, Johanna-Gabriela Walter, Antonina Lavrentieva, Imme Kretschmer, Lydia Sandiford, Alix Le Marois, Rebecca Bongartz, Pooyan Aliuos, Klaus Suhling, Frank Stahl, Mark Green and Thomas Scheper:** One-pot aqueous synthesis of highly strained CdTe/CdS/ZnS nanocrystals and their interactions with cells , *RSC Adv.*, 2015,5, 7485-7494  
DOI: 10.1039/c4ra13386b

**Andreas Wolf, Torben Kodanek and Dirk Dorfs:** Tuning the LSPR in copper chalcogenide nanoparticles by cation intercalation, cation exchange and metal growth, *Nanoscale*, 7, 19519-19527 (2015).  
DOI: 10.1039/C5NR05425G



**Baringhaus, J., Aprojanz, J., Wiegand, J., Laube, D., Halbauer, M., Hübner, J., Oestreich, M. & Teegenkamp, C.:** Growth and characterization of sidewall graphene nanoribbons , *Appl. Phys. Lett.* 106, 043109 (2015).  
DOI: 10.1063/1.4907041

**Brij Mohan Mundotiya, Marc Christopher Wurz, and Lutz Rissing:** A Comparative Study of Saturation Induction with Current Density of Electrodeposited Fe-Ni-W Alloys , *ECS Trans.* 2015 volume 64, issue 31, 75-83 (2015)  
DOI: 10.1149/06431.0075ecst

**M.G. Ahmed, I.E. Kretschmer, T.A. Kandiel, A.Y. Ahmed, F.A. Rashwan, D.W. Bahnemann:** A Facile Surface Passivation of Hematite Photoanodes with TiO<sub>2</sub> Overlayers for Efficient Solar Water Splitting, *ACS Appl. Mater. Interfaces* 7 (2015), 24053–24062  
DOI: 10.1021/acsami.5b07065

**Mahmoud G. Ahmed, Tarek A. Kandiel, Amira Y. Ahmed, Imme Kretschmer, Farouk Rashwan, and Detlef Bahnemann:** Enhanced Photoelectrochemical Water Oxidation on Nanostructured Hematite Photoanodes via p-CaFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>/n-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Heterojunction Formation, *J. Phys. Chem. C*, 2015, 119 (11), pp 5864–5871  
DOI: 10.1021/jp512804p

**O. Kufelt, A. El-Tamer, C. Sehring, M. Meißner, S. Schlie-Wolter, B. Chichkov:** Water-soluble photopolymerizable chitosan hydrogels for biofabrication via two-photon polymerization, *Acta Biomaterialia* 18 , 186–195 (2015)  
DOI: 10.1016/j.actbio.2015.02.025

**Patrick Homenya, Lars Heyer, Franz Renz:** Electromagnetic radiation as a spin crossover stimulus, *Pure and Applied Chemistry*. Band 87, Heft 3, Seiten 293–300, ISSN (Online) 1365-3075, ISSN (Print) 0033-4545,  
DOI: 10.1515/pac-2014-1001

**Tobias Birr, Urs Zywiets, Parva Chhantyal, Boris N. Chichkov, and Carsten Reinhardt:** Ultrafast surface plasmon-polariton logic gates and half-adder, *OPTICS EXPRESS* 31755, Vol. 23, No. 25 (2015).  
DOI: 10.1364/OE.23.031755

**Torben Kodanek, Hadeel M. Banbela, Suraj Naskar, Patrick Adel, Nadja C. Bigall and Dirk Dorfs:** Phase transfer of 1- and 2-dimensional Cd-based nanocrystals, *Nanoscale*, 7, 19300-19309 (2015).  
DOI: 10.1039/C5NR06221G

**Hennrik Schmidt, Johannes C. Rode, Dmitri Smirnov & Rolf J. Haug:** Superlattice structures in twisted bilayers of folded graphene, *Nature Communications* 5, 5742 (2014).  
DOI: 10.1038/ncomms6742

**Hübner, J., Dahbashi, R., Berski, F., Wiegand, J., Kuhn, H., Lonnemann, J. & Oestreich, M.:** Spin noise spectroscopy in semiconductors: from a billion down to single spins, *Spintronics VII*, SPIE 9167, 91672R (2014).  
DOI: 10.1117/12.2061926

**Kalies S, Birr T, Heinemann D, Schomaker M, Ripken T, Heisterkamp A, Meyer H.:** Enhancement of extracellular molecule uptake in plasmonic laser perforation , *Journal of Biophotonics* 7 (7), 474–482 (2014)  
DOI: 10.1002/jbio.201200200

**Lena Mancuso, Tobias Knobloch, Jessica Buchholz, Jan Hartwig, Lena Möller, Katja Seidel, Wera Collisi, Florenz Sasse, Andreas Kirschning:** Preparation of Thermocleavable Conjugates Based on Ansamitocin and Superparamagnetic Nanostructured Particles by a Chemobiosynthetic Approach, *Chemistry-A European Journal* Volume 20, Issue 52 pages 17541-17551 December 22, 2014 [www.Chem. Eur. J. 2014, 20, 1 – 12](http://www.Chem. Eur. J. 2014, 20, 1 – 12)  
DOI: 10.1002/chem.201404502

**M. Kumar, A. Subramania and K. Balakrishnan:** Preparation of electrospun Co<sub>3</sub>O<sub>4</sub> nanofibers as electrode material for high performance asymmetric supercapacitors, *Electrochimica Acta* 149 (2014) 152-158  
DOI: 10.1016/j.electacta.2014.10.021

**O. Kufelt, A. El-Tamer, C. Sehring, S. Schlie-Wolter, B. Chichkov:** Hyaluronic acid based materials for scaffolding via two-photon polymerization, *Biomacromolecules* 2 (15), 650–659 (2014)  
DOI: 10.1021/bm401712q

**P. Adel, A. Wolf, T. Kodanek, D. Dorfs:** Segmented CdSe@CdS/ZnS Nanorods Synthesized via a Partial Ion Exchange Sequence, *Chem. Mater.* 2014, 26 (10), 3121  
DOI: 10.1021/cm500431m

**P. Taptimthong, J. Rittinger, M. C. Wurz, L. Rissing:** Flexible Magnetic Writing / Reading System: Polyimide Film as Flexible Substrate, *Procedia Technology*, Vol. 15, 2014, pp. 230–237  
DOI: 10.1016/j.protcy.2014.09.076

**T. F. Wietler, J. Schmidt, D. Tetzlaff, E. Bugiel:** Surfactant-mediated epitaxy of silicon germanium films on silicon (001) substrates“, *Thin Solid Films* 557 (2014) 27  
DOI: 10.1016/j.tsf.2013.08.125

**U. Zywiets, C. Reinhardt, A. Evlyukhin, T. Birr, B. Chichkov:** Generation and patterning of Si nanoparticles by femtosecond laser pulses, *Applied Physics A - Materials Science & Processing* 1 (114), 45–50 (2014)  
DOI: 10.1007/s00339-013-8007-6

**Sangeeta Roy Chaudhuri, Jan Hartwig, Lukas Kupracz, Torben Kodanek, Jens Wegner and Andreas Kirschning:** Oxidations of Allylic and Benzylic Alcohols under Inductively-Heated Flow Conditions with Gold-Doped Superparamagnetic Nanostructured Particles as Catalyst and Oxygen as Oxidant , *Advanced Synthesis & Catalysis* 356, 3530-3538 (2014).  
DOI: 10.1002/adsc.201400261

**Smirnov, D., Rode, J.C. & Haug, R.J.:** Suppression of decoherence in a graphene monolayer ring, *Appl. Phys. Lett.* 105, 082112 (2014).  
DOI: 10.1063/1.4894471

**M. Wolff, C. Krüger, P. Homenya, L. Heyer, R. Saadat, B. Dreyer, D. Unruh, T. Meyer, G. Klingelhofer, L. Rissing, R. Sindelar, Y. Ichiyanagi, F. Renz:** Effect of pseudohalides in pentadentate-iron(III) complexes studied by DFT and Mössbauer spectroscopy , April 2014, Volume 226 , Issue 1-3, pp 237-241 *Proceedings of the 32nd International Conference on the Applications of the Mössbauer Effect (ICAME 2013) held in Opatija, Croatia, 1–6 September 2013,*  
DOI: 10.1007/s10751-013-0941-3

**S. Cvetkovic, R. Kruppe, J. Rittinger, L. Rissing:** Technology Development for Packaging of the GMR-Sensor via Eutectic Bonding, *Smart System Integration SSI 2013*, paper 107, Amsterdam, The Netherlands (2013)

**Schäfer S., Ernst M., Kajari-Schröder S., Brendel R.:** Multilayer etching for kerf-free solar cells from macroporous silicon, *Energy Procedia, Proceedings 3rd International Conference on Crystalline Silicon Photovoltaics (SiliconPV 2013)*  
DOI: 10.1016/j.egypro.2013.07.367

**A. Belski, M. Wurz, J. Rittinger, L. Rissing:** Development, Micro Fabrication and Test of Flexible Magnetic Write Head for Gentelligent Applications, *Micro-electronic Engineering Journal, (spec. issue), Proc. 38th Int. Conf. on Micro & Nanoengineering, Toulouse, France (2013)*  
DOI: 10.1016/j.mee.2013.02.035

**C. Reinhardt, A. Evlyukhin, W. Cheng, T. Birr, A. Markov, B. Ung, M. Skorobogatiy, B. Chichkov:** Bandgap-confined large-mode waveguides for surface plasmon-polaritons, *J. Opt. Soc. Am. B 11 (30), 2898–2905 (2013)*  
DOI: 10.1364/JOSAB.30.002898

**J. Rittinger, S. Cvetkovic, L. Rissing :** Investigations on the Removal Mechanisms of Diverse Alumina Based Polishing Slurries for Chemical Mechanical Polishing of Electro-plated NiFe 45/55, *Microelectronic Engineering Journal, (spec. issue), Proc. 38th Int. Conf. on Micro & Nanoengineering, Toulouse, France*  
DOI: 10.1016/j.mee.2013.02.041

**S. Kalies, D. Heinemann, M. Schomaker, T. Birr, T. Ripken, H. Meyer:** Gold nanoparticle mediated laser transfection for high-throughput antisense applications, *Proc. of OSA Biomedical Optics-SPIE Vol. 8803, 880309 (2013)*  
DOI: 10.1117/12.2032385

**Schmidt, H., Rode, J. C., Belke, C., Smirnov, D. & Haug, R. J.:** Mixing of edge states at a bipolar graphene junction, *Phys. Rev. B 88, 075418 (2013)*.  
DOI: 10.1103/PhysRevB.88.075418

**Schmidt, H., Smirnov, D., Rode, J. & Haug, R.J.:** Multi-terminal magnetotransport measurements over a tunable graphene p-n junction created by AFM-nanomachining, *AIP Conf. Proc. 1566, 175 (2013)*.  
DOI: 10.1063/1.4848342

**T. Creutzburg, S. Cvetkovic, J. Rittinger, L. Rissing:** Investigations on Eutectic Bonding of Polyimide Structures for MEMS Applications, *Smart System Integration (SSI 2013), paper 106, Amsterdam, The Netherlands (2013)*

**Dahbashi, R., Hübner, J., Berski, F., Wiegand, J., Marie, X., Pierz, K., Schumacher, H. W. & Oestreich, M.:** Measurement of heavy-hole spin dephasing in (InGa)As quantum dots, *Appl. Phys. Lett. 100, 031906 (2012)*.  
DOI: 10.1063/1.3678182

**J. Rittinger, S. Cvetkovic, L. Rissing:** Slurry Comparison for Chemical-mechanical Polishing (CMP) of Silicon Carbide (SiC), *Proc. 12th euspen Int. Conf. 2012, Stockholm, Sweden, pp. 145-148 (2012)*

## Wissenschaftliche Projekte/*Scientific Projects*

Eine Auswahl von Projekten aus den Arbeitsgruppen des LNQE.

*A selection of projects from the working groups of LNQE.*

### Versatile fabrication method for aerogels by freezing and subsequent freeze-drying of colloidal nanoparticle solutions

Axel Freytag<sup>a,\*</sup>, Sara Sánchez-Paradinas<sup>a,\*</sup>, Suraj Naskar<sup>a,\*</sup>, Natalja Wendt<sup>c,\*</sup>, Massimo Colombo<sup>b</sup>, Giammarino Pugliese<sup>b</sup>, Jan Poppe<sup>a,\*</sup>, Cansunur Demirci<sup>a,\*</sup>, Imme Kretschmer<sup>e,\*</sup>, Detlef W. Bahnemann<sup>e,\*</sup>, Peter Behrens<sup>c,\*</sup>, Nadja C. Bigall<sup>a,\*</sup>

*a Institut für Physikalische Chemie und Elektrochemie, Leibniz Universität Hannover, Callinstraße 3A, 30167 Hannover (Deutschland)*

*b Istituto Italiano di Tecnologia, Via Morego, 30, 16163 Genova (Italien)*

*c Institut für Anorganische Chemie, Leibniz Universität Hannover, Callinstraße 9, 30167 Hannover (Deutschland)*

*d Institut für Technische Chemie, Leibniz Universität Hannover, Callinstraße 3, 30167 Hannover (Deutschland)*

*e Laboratory for Nanocomposite Materials, Department of Photonics, Faculty of Physics, Saint-Petersburg State University, Ulianovskaia street 3, Peterhof, 198504 Saint Petersburg (Russland)*

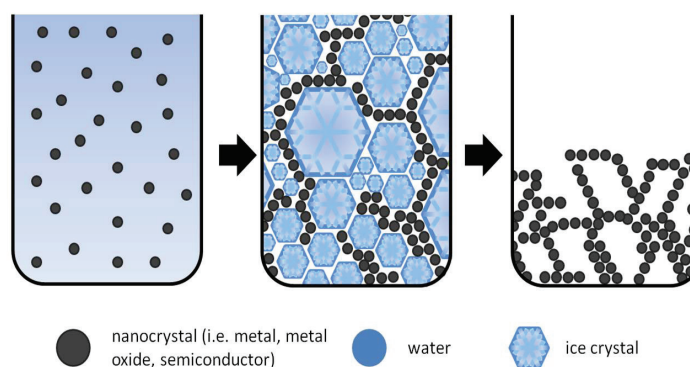
*\* Laboratorium für Nano- und Quantenengineering (LNQE), Leibniz Universität Hannover, Schneiderberg 39, 30167 Hannover (Deutschland)*

#### Abstract

We present a novel approach for synthesizing aerogels by shock-freezing colloidal nanoparticle in liquid nitrogen and subsequent freeze drying. With this simple method it is possible to assemble nanoparticle into macroscopic voluminous monoliths, while retaining most of their properties such as size, shape or optical properties. In comparison to state of the art techniques it is a lot faster and easier to handle. This procedure might bridge the gap for scaled-up production and might enable industrial applications.

#### Introduction

In 1931 Kistler et. al. reported on a new route to dry jellies of silica or alumina by supercritical drying, resulting in a complete new group of materials: the aerogels.[1] These materials were basically made out of air (>99%) but still showed mechanical stability. In 2005 the group around Brock reported on the possibility to build these Aerogels out of colloidal NP building blocks enabling to preserve the nanoparticle properties outside of their liquid medium.[2] Since then a lot of reports focused on Aerogels with interesting properties



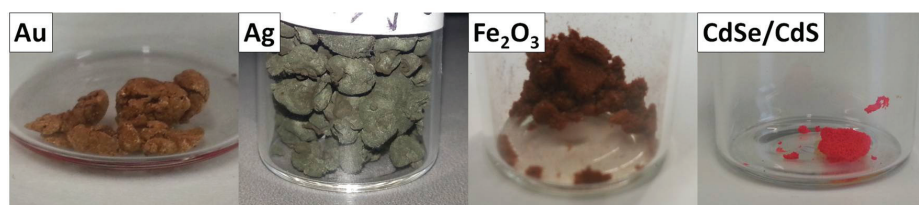
**Figure 1:** Scheme of the freezing process of colloidal nanoparticle with subsequent freeze drying

such as plasmonic or photoluminescent features or high specific surface areas.[3-5] However one major drawback is the complex, long and expensive fabrication of the gels which we overcome with the here presented method.

## Results and discussion

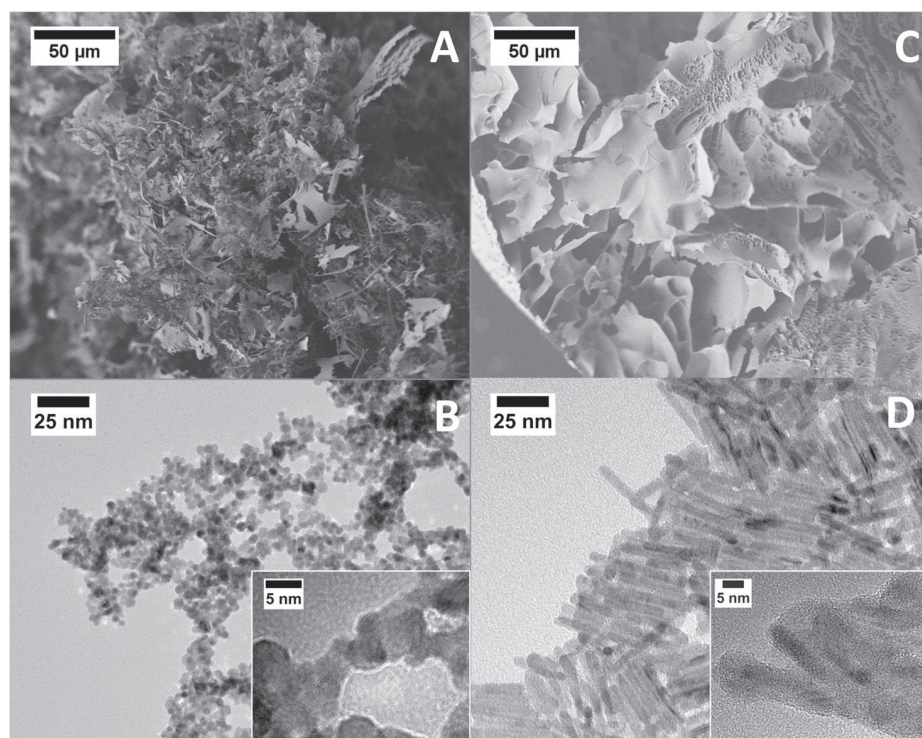
We discovered that by concentrating aqueous nanoparticle colloids up to a certain threshold (which is a volume fraction of nanoparticle higher than 0.1%), shock freezing in liquid nitrogen and subsequent freeze drying an aerogel-like superstructure can be obtained (see figure 1).

In our work we were able to show highly porous and voluminous monoliths (see figure 2) out of (noble) metals (e.g gold, silver, palladium, platinum), semiconductors (CdSe/CdS) as well as metal oxides (hematite) with densities ranging from 20 to 60 mg cm<sup>-3</sup> (corresponding to a relative density of around 0.2%).



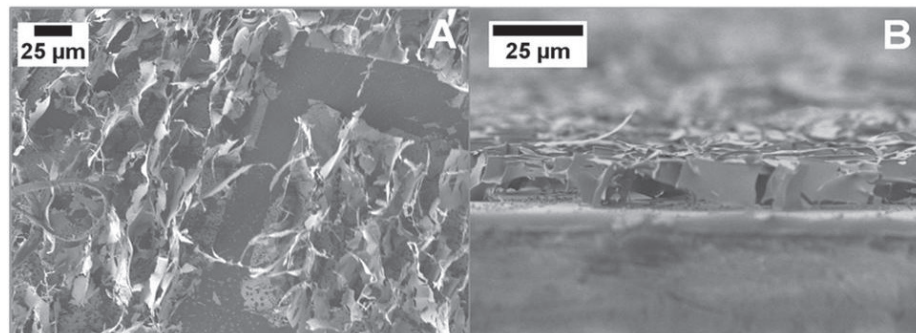
**Figure 2:** Monoliths of gold, silver, hematite and CdSe/CdS

The monoliths consist of the nanoparticle building blocks assembled in thin sheets or wires (which we assume as enrolled sheets). These sheets and wires again are crosslinked with each other, building the framework of the monoliths (see figure 3). The sheets exhibit a roughness on the nanometer scale and also high specific surface areas (which could be determined e.g. platinum monoliths with 33m<sup>2</sup>g<sup>-1</sup>) in the magnitude of comparable aerogels.



**Figure 3:** SEM/TEM characterization of palladium nanospheres (A-B) and CdSe/CdS nanorods (C-D) assembled into aerogels

Beside the mostly similar properties of the resulting aerogels to conventional ones, our method has significant advantages. Since this method is solely depended on physical properties, any material and shape can be processed into aerogels (as long as the building blocks are in an aqueous solution), and so far every tested nanomaterial could successfully be assembled to aerogels by this route. Furthermore, we can achieve sophisticated geometries by means of molding, as well as homogenous aerogel films on different substrates (see figure 4) with thicknesses of 10 – 50  $\mu\text{m}$ .



**Figure 4:** Top view (A) and cross section (B) of Pd aerogel film on glass substrate

The possibility of making various shapes and sizes of the aerogels might bridge the gap from laboratory to industry enabling for example catalyst-designing. The results of this work and further details were published in *Angewandte Chemie*. [6]

### Conclusion

In this work we fabricated monolithic aerogels out of nanoparticles of gold, silver, platinum, palladium, cadmium selenide/cadmium sulfide and hematite as various shaped monoliths including thin films and more sophisticated geometries (e.g. smoking smiley). Characterizations showed the preservation of the nanoparticle building blocks, specific surfaces areas comparable to literature and first catalytic measurements showed activity for heterogenous gas phase reaction (e.g. CO-conversion) and photocatalytic reactions.

### Acknowledgements

N.C.B., A.F., S.S.-P., S.N., and J.P. are grateful for financial support from the German Federal Ministry of Education and Research (BMBF) within the framework of NanoMatFutur, support code 03X5525. I.K. and D.W.B. gratefully acknowledge financial support from the Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG, SPP1613). We also would like to thank Dr. Dirk Dorfs and Dominik Hinrichs for scientific discussions.

### References

- [1] S. S. Kistler, *Nature* (London, U. K.) 1931, 127, 741.
- [2] S. L. Brock, I. U. Arachchige, K. K. Kalebaila, *Comments Inorg. Chem.* 2006, 27, 103-126.
- [3] N. C. Bigall, A.-K. Herrmann, M. Vogel, M. Rose, P. Simon, W. Carrillo-Cabrera, D. Dorfs, S. Kaskel, N. Gaponik, A. Eychmueller, *Angew. Chem., Int. Ed.* 2009, 48, 9731-9734, S9731/9731-S9731/9710.
- [4] A.-K. Herrmann, N. C. Bigall, L. Lu, A. Eychmueller, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2012, pp. 339-359.
- [5] S. Sánchez-Paradinas, D. Dorfs, S. Friebe, A. Freytag, A. Wolf, N. C. Bigall, *Advanced Materials* 2015, n/a-n/a.
- [6] A. Freytag, S. Sanchez-Paradinas, S. Naskar, N. Wendt, M. Colombo, G. Pugliese, J. Poppe, C. Demirci, I. Kretschmer, D. W. Bahnemann, P. Behrens, N. C. Bigall, *Angew. Chem., Int. Ed.* 2016, 55, 1200-1203.

## Self-Assembly of CdSe and CdSe/CdS Nanoplatelets to Form Highly Porous Fluorescent Aerogels

Suraj Naskar<sup>1,3</sup>, Jan. F. Miethe<sup>1,3</sup>, Sara Sánchez-Paradinas<sup>1,3</sup>, Nadeschda Schmidt<sup>2,3</sup>, Peter Behrens<sup>2,3</sup>, Nadja C. Bigall<sup>1,3</sup>

*1 Institute of Physical Chemistry and Electrochemistry, Leibniz Universität Hannover Callinstraße 3A, 30167 Hannover, Germany.*

*2 Institute for Inorganic Chemistry, Leibniz Universität Hannover, Callinstraße 9, 30167 Hannover, Germany.*

*3 Laboratory for Nano and Quantum Engineering, Schneiderberg 39, 30167 Hannover, Germany.*

### Abstract

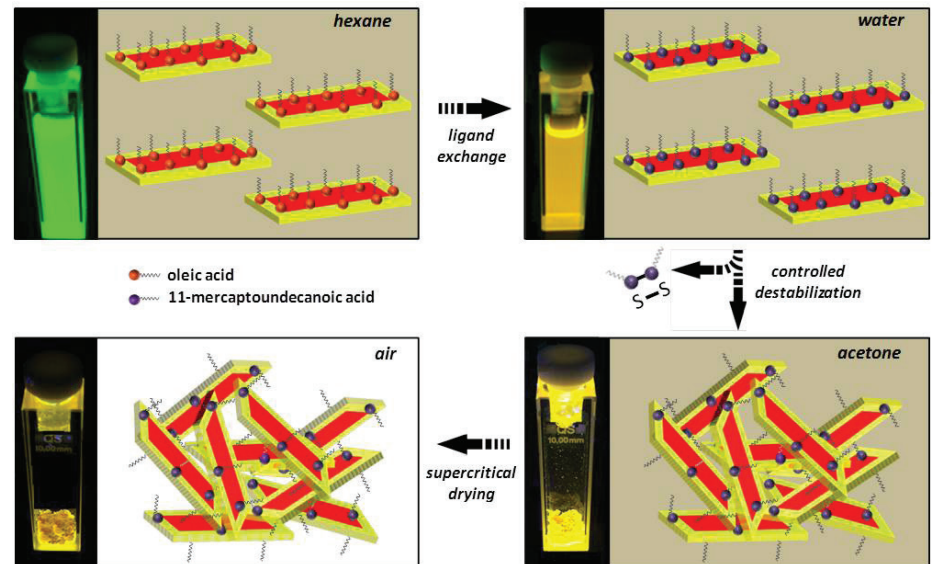
We report on the synthesis of highly porous, self-supported inter cross-linked, 3D aerogel superstructures from 5 monolayer (ML) thick CdSe/CdS core/crown and CdSe core nanoplatelets (NPLs). Controlled partial oxidative removal of the thiol ligands from the surface of the NPLs is achieved with variable amounts of  $H_2O_2$ . The wet gels of CdSe and CdSe/CdS are converted to aerogels by exchanging the solvent with liquid  $CO_2$  followed by supercritical drying. A comparative study of the optical properties of the aqueous NPLs solution to those of the hydrogels and the aerogels is carried out using UV-vis absorption, photoluminescence (PL) emission and PL decay measurements. The aerogels exhibit inherent quantum confined properties comparable to those of the aqueous solution of the NPLs. Compared to a densely packed NPLs film, aerogels exhibit higher (absolute) quantum yield and longer PL decay time. The interconnected porous network type morphology of the aerogels is characterized by transmission electron microscopy (TEM) and also by scanning electron microscopy (SEM). The monolithic aerogels are extremely lightweight (density  $< 0.038 \text{ g cm}^{-3}$ ) with a very high BET specific surface area of  $219 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$  and consist of only (111) as the exposed crystal facet.

### Introduction

In recent years, aerogels from metal chalcogenide nanoparticles, such as CdSe,[1] CdTe,[2] CdSe/ZnS dots [3] and CdSe/CdS rods [4] even mixed metal-semiconductor, e.g., Au-CdTe [5] has attracted attention of the scientists due to their high porosities, large specific surface areas and quantum confinement properties. Regarding possible applications, metal chalcogenide aerogels for capturing radioactive elements and enzyme encapsulated quantum dot hydrogels for the development of biosensors have already been demonstrated. More recently, quasi 2D CdSe [6] or CdSe/CdS core/crown [7] or core/shell NPLs [8] of only few monolayer (ML) thicknesses have been reported with unique optoelectronic properties such as high PL quantum yield, extremely narrow emission band width, ultrafast radiative lifetime and reduced Stokes shift. Various possible applications of these NPLs, such as room temperature lasing, polarized light emission, reverse oxygen sensing are discussed in literature.[9, 10] The self-assembly of the NPLs to achieve porous 3D aerogels, while maintaining the quantum confinement properties, which would be of high interest, has not been reported so far.

Therefore, in this work, we have synthesized aerogels from colloidal solution of 5 ML thick CdSe and CdSe/CdS core/crown NPLs with varying amounts of  $H_2O_2$  as destabilizing agent.[11] The consecutive reaction pathways such as, ligand exchange, controlled destabilization and supercritical drying, to obtain porous aerogels are shown in Scheme 1. After synthesis of the NPLs in colloidal organic medium, the surface ligands are exchanged with 11-mercaptopundecanoic acid, and the NPLs are transferred to aqueous medium.[12] Controlled destabilization of the aqueous NPLs solution is experimented with variable molar ratios of  $[H_2O_2]/[Cd^{2+}]$  ranging from 1.2:1 to 23.2:1, and it is found that the optimum gelation conditions (retention of PL emission proper-

ties) are between the molar ratios 3.0:1 to 5.5:1. [11] The resulting hydrogels (voluminous monolithic aggregation of the NPLs) are kept in dark for 4 days for aging and the solvent is gradually exchanged with dry acetone. The wet gels are then transferred to a supercritical drying boat under dry acetone environment. After inserting the boat inside the supercritical dryer chamber, acetone is replaced with liquid CO<sub>2</sub>. Finally, after supercritical drying, monoliths of aerogels are obtained, which show bright emission upon UV light irradiation (see photographs in Scheme 1).[11]



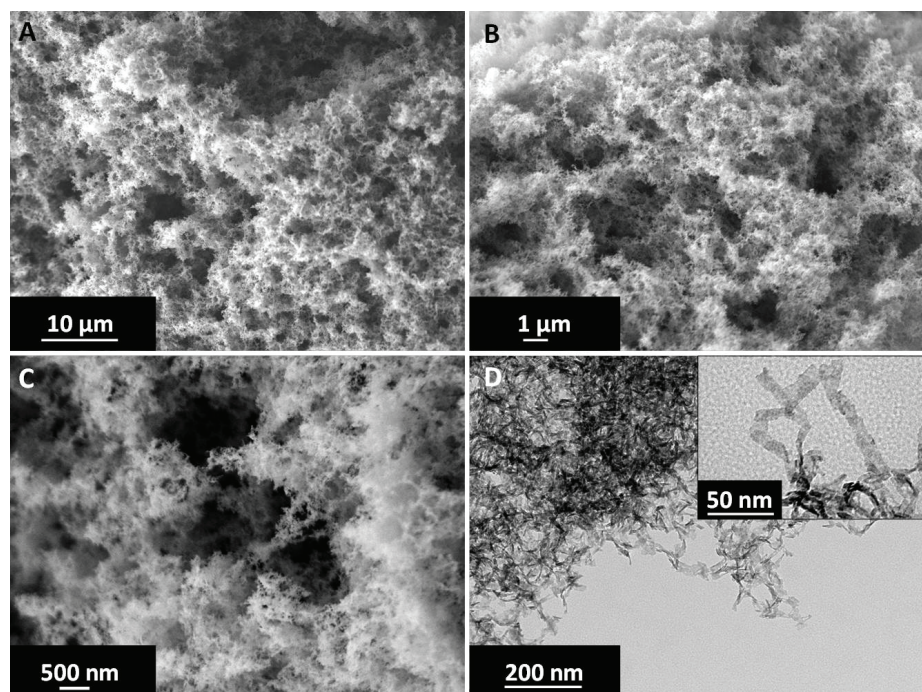
**Scheme 1:** Schematic diagram of the aerogel formation from CdSe/CdS core/crown NPLs. First, ligand exchange is performed in order to transfer the quantum wells to aqueous solution. Controlled destabilization by means of hydrogen peroxide addition results in the formation of hydrogels, which are subsequently transferred to aerogels by supercritical drying. The photographs on the left of the schemes display the quantum wells in the respective solutions and in the gels under UV illumination. (Reprinted with permission from [11])

The structural morphologies of the aerogels are investigated with SEM and TEM microscopy and the results (for CdSe/CdS NPLs) are shown in Figure 1. The SEM micrographs reveal that the aerogels are enormously voluminous with high porosity and consist of fractal-type network. The diameter of the pores ranges from the mesoporous (2-50 nm) to the macroporous (> 50 nm) regime. The TEM micrographs also prove that the self-supported porous network is formed by the coalescence of the NPLs edges (see inset of Figure 1D).

The hydrogels and the aerogels obtained with variable molar ratios of [H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>]/[Cd<sup>2+</sup>] = 3.0:1 to 5.5:1 are also characterized with optical spectroscopic techniques. A comparison between a densely packed thin film of CdSe/CdS NPLs and the aerogel (both having similar optical density of 1.1 at 440 nm) reveals that the aerogel exhibits higher absolute quantum yield (10.3% vs 5.5%) and longer PL decay time (9.5 ns vs 3.6 ns) than the film. This can be attributed to the porous morphologies of the aerogels, which cause less interaction between the neighboring NPLs in the aerogels. The hydrogel and the corresponding aerogel with molar ratio of [H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>]/[Cd<sup>2+</sup>] = 3.0:1 exhibit the highest absolute quantum yield of 12.1% and 10.3%, respectively. The quantum yield as well as the PL decay time of the hydrogels and the corresponding aerogels are found to decrease regularly with increasing amount of H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, and we suggest a homogeneous quenching mechanism to explain this effect.[11] Further increase in the H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> concentration, e.g., [H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>]/[Cd<sup>2+</sup>] = 17.4:1 leads to dissolution of CdSe core in CdSe/CdS NPLs and results in morphologies of interconnected rectangular hollow CdS NPLs rings, without any CdSe domain.



The XPS analysis of the aerogels obtained with higher  $\text{H}_2\text{O}_2$  concentration shows no Se peak, which supports the findings from TEM analysis and our interpretation of the dissolution of CdSe under these conditions.[11]



**Figure 1:** (A, B and C) SEM and (D) TEM micrographs of the aerogel from CdSe/CdS core/crown NPLs in different magnifications. Inset of figure (D) shows the orientation of the NPLs network inside the aerogel. The pore distribution ranges from mesopores (2-50 nm) to macropores (> 50 nm). (Reprinted with permission from [11])

The porosity and the inner specific surface area of the aerogels are obtained from  $\text{N}_2$  physisorption experiments. The isotherms obtained are analyzed by BET (Brunauer-Emmett-Teller) method which show a combined IUPAC type II and type IV behavior. The BET surface area obtained is  $219 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$  (for CdSe/CdS aerogel) and  $189 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$  (for CdSe aerogel). These values are comparable to that of the highest specific area reported so far for metal chalcogenide nanocrystal aerogel systems and is equal to ~70% of the maximum possible surface area achievable with these NPLs. The high porosities of the here developed aerogels will allow the reactant molecules to pass through the pores with minimum hindrance, making them promising substrates for catalytic applications.

## Conclusion

A synthetic strategy to obtain highly porous aerogels from quasi 2D 5 ML thick CdSe and CdSe/CdS NPLs is presented. The aerogels partially exhibit the quantum confinement properties of their initial building blocks with a highest absolute quantum yield of 10.3%. The aerogels solely exhibit (111) as the exposed crystal facet. This type of extremely lightweight aerogels with high porosities and BET specific surface areas (as high as  $219 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$ ) are promising for future applications for e.g., facet dependent catalytic reactions or in sensing chemicals.

## Acknowledgement

N.C.B., S.N., J.F.M and S.S.P are grateful for financial support from the German Federal Ministry of Education and Research (BMBF) within the framework of the program NanoMatFutur (support code 03X5525).

**Notes**

This scientific work of Dr. Bigall and Prof. Behrens group has recently been published as a joint publication from LNQE, PCI and ACI in the journal of "Chemistry of Materials". Please see the following article for full reference "Naskar, S.; Miethe, J. F.; Sánchez-Paradinas, S.; Schmidt, N.; Kanthasamy, K.; Behrens, P.; Pfnür, H.; Bigall, N. C. Photoluminescent Aerogels from Quantum Wells. *Chem. Mater.* 2016, DOI: 10.1021/acs.chemmater.5b04872"

**References**

- [1] Arachchige, I. U.; Brock, S. L. Sol-gel assembly of CdSe nanoparticles to form porous aerogel networks. *J. Am. Chem. Soc.* 2006, 128, 7964-7971.
- [2] Yao, Q.; Brock, S. L. Porous CdTe Nanocrystal Assemblies: Ligation Effects on the Gelation Process and the Properties of Resultant Aerogels. *Inorg. Chem.* 2011, 50, 9985-9992.
- [3] Arachchige, I. U.; Brock, S. L. Highly luminescent quantum-dot monoliths. *J. Am. Chem. Soc.* 2007, 129, 1840-+.
- [4] Sánchez-Paradinas, S.; Dorfs, D.; Friebe, S.; Freytag, A.; Wolf, A.; Bigall, N. C. Aerogels from CdSe/CdS Nanorods with Ultra-long Exciton Life times and High Fluorescence Quantum Yields. *Adv. Mater.* 2015, 27, 6152-6156.
- [5] Lesnyak, V.; Wolf, A.; Dubavik, A.; Borchardt, L.; Voitekhovich, S. V.; Gaponik, N.; Kaskel, S.; Eychmüller, A. 3D Assembly of Semiconductor and Metal Nanocrystals: Hybrid CdTe/Au Structures with Controlled Content. *J. Am. Chem. Soc.* 2011, 133, 13413-13420.
- [6] Ithurria, S.; Tessier, M. D.; Mahler, B.; Lobo, R. P. S. M.; Dubertret, B.; Efrós, A. L. Colloidal nanoplatelets with two-dimensional electronic structure. *Nat. Mater.* 2011, 10, 936-941.
- [7] Tessier, M. D.; Spinicelli, P.; Dupont, D.; Patriarche, G.; Ithurria, S.; Dubertret, B. Efficient Exciton Concentrators Built from Colloidal Core/Crown CdSe/CdS Semiconductor Nanoplatelets. *Nano Lett.* 2014, 14, 207-213.
- [8] Tessier, M. D.; Mahler, B.; Nadal, B.; Heuclin, H.; Pedetti, S.; Dubertret, B. Spectroscopy of Colloidal Semiconductor Core/Shell Nanoplatelets with High Quantum Yield. *Nano Lett.* 2013, 13, 3321-3328.
- [9] Lorenzon, M.; Christodoulou, S.; Vaccaro, G.; Pedrini, J.; Meinardi, F.; Moreels, I.; Brovelli, S. Reversed oxygen sensing using colloidal quantum wells towards highly emissive photoresponsive varnishes. *Nature Comm.* 2015, 6, 6434.
- [10] Abecassis, B.; Tessier, M. D.; Davidson, P.; Dubertret, B. Self-Assembly of CdSe Nanoplatelets into Giant Micrometer-Scale Needles Emitting Polarized Light. *Nano Lett.* 2014, 14, 710-715.
- [11] Naskar, S.; Miethe, J. F.; Sánchez-Paradinas, S.; Schmidt, N.; Kanthasamy, K.; Behrens, P.; Pfnür, H.; Bigall, N. C. Photoluminescent Aerogels from Quantum Wells. *Chem. Mater.* 2016, DOI: 10.1021/acs.chemmater.5b04872.
- [12] Kodanek, T.; Banbela, H. M.; Naskar, S.; Adel, P.; Bigall, N. C.; Dorfs, D. Phase transfer of 1- and 2-dimensional Cd-based nanocrystals. *Nanoscale* 2015, 7, 19300-19309.

## Amorphous, turbostratic and crystalline carbon membranes with hydrogen selectivity

A. Wollbrink<sup>1,\*</sup>, K. Volgmann<sup>1,\*</sup>, J. Koch<sup>2,\*</sup>, K. Kanthasamy<sup>2,\*</sup>, C. Tegenkamp<sup>2,\*</sup>, Y. Li<sup>3</sup>, H. Richter<sup>4</sup>, S. Kämnitz<sup>4</sup>, F. Steinbach<sup>1,\*</sup>, A. Feldhoff<sup>1,\*</sup>, J. Caro<sup>1,\*</sup>

1 Institute of Physical Chemistry and Electrochemistry, Leibniz University Hannover, Callinstr. 3A, D-30167 Hannover, Germany

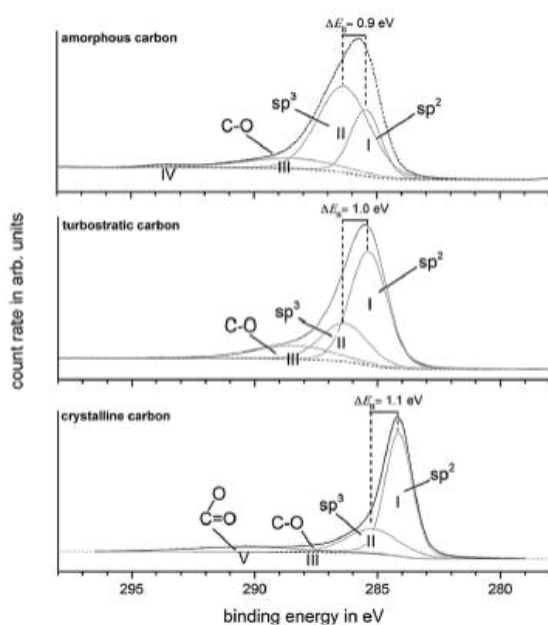
2 Institute of Solid State Physics, Leibniz University Hannover, Appelstr. 2, D-30167 Hannover, Germany

3 State Key Laboratory of Catalysis, Dalian Institute of Chemical Physics, Chinese Academy of Sciences, CN-116023 Dalian, China

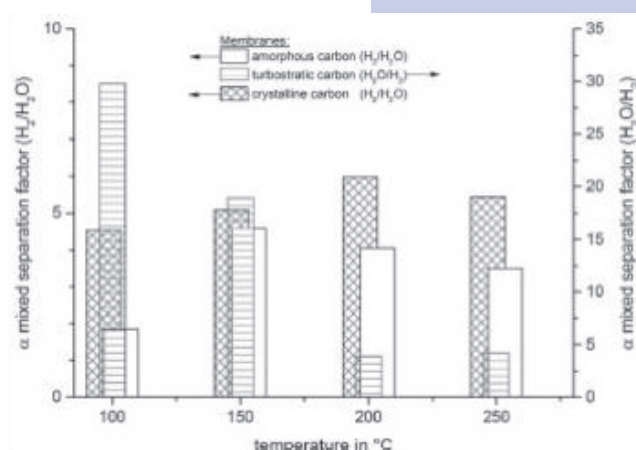
4 Fraunhofer Institute of Ceramic Technologies and Systems IKTS, Michael-Faraday-Str. 1, D-07629 Hermsdorf, Germany

\* Laboratory for Nano and Quantum Engineering, Schneiderberg 39, D-30167 Hannover, Germany.

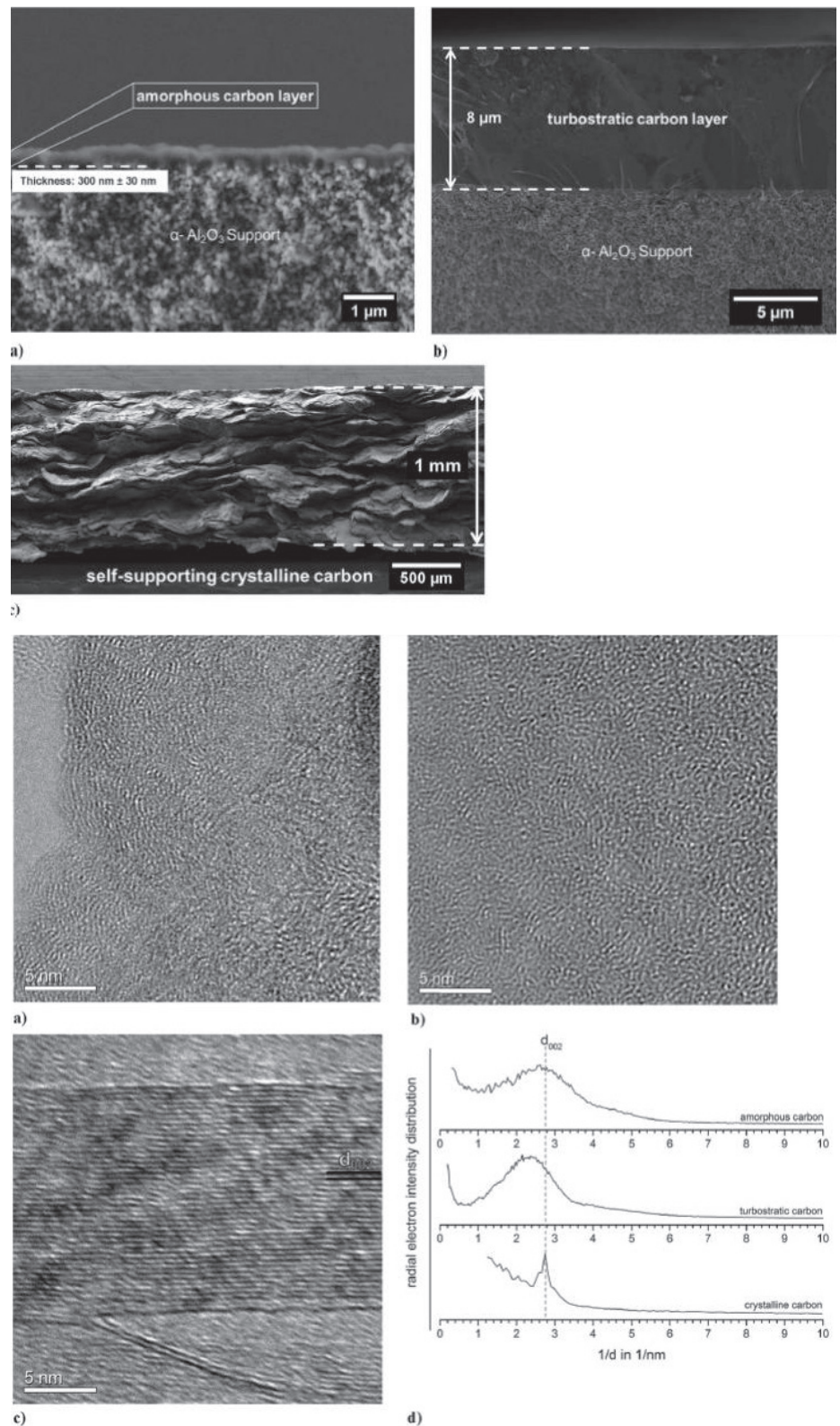
Hydrogen production by catalytic steam reforming of renewable hydrocarbons like bio-methane or bio-ethanol has become an attractive goal of sustainable chemistry. Side reactions as in ethanol steam reforming decrease the hydrogen selectivity. A low-temperature catalytic membrane reactor with a hydrogen-selective membrane is expected to solve this problem. Three different carbon membranes are investigated with respect to their performance to extract hydrogen selectively from the binary and ternary reaction mixtures ( $H_2/CO_2$ ), ( $H_2/CO_2/H_2O$ ), and ( $H_2$ /ethanol) as model systems for bio-ethanol steam reforming. The three carbon membranes under study are (i) an amorphous carbon layer prepared by physical vapour deposition (PVD) of carbon on an porous alumina support using a carbon fibre yarn, (ii) a turbostratic carbon layer obtained by pyrolysis of a supported organic polymer blend as precursor, and (iii) a crystalline carbon prepared by pressing of graphite flakes into a self-supporting disc. For the equimolar binary feed mixture ( $H_2/CO_2$ ) all carbon membranes were found to be hydrogen selective. For the ternary feed mixture (41 vol.-%  $H_2$ / 41 vol.-%  $CO_2$ / 18 vol.-%  $H_2O$ ), in the case of the amorphous and crystalline carbon membrane, the hydrogen selectivity remains also in the presence of steam. The turbostratic carbon membrane separates preferentially steam ( $H_2O$ ) from the ternary feed mixture ( $H_2/CO_2/H_2O$ ).



**Figure 1:** XPS as surface method to characterize the surface composition of the 3 carbon membranes und study.



**Figure 2:** Separation factors of the 3 membranes: Amorphous and crystalline membranes are hydrogen-selective, the turbostratic is hydrophilic.



**Figure 3 & 4:** SEM (top) and TEM (bottom) of the three carbon membranes under study: a) Amorphous carbon layer produced by evaporation and condensation, b) turbostratic carbon layer produced by pyrolysis of a polymer blend, and c) crystalline carbon layer produced by pressing of commercial graphite flakes. d) shows the radial electron density distribution of the fast Fourier transforms of the TEM micrographs.

#### Reference

Carbon 106 (2016) 93-105, DOI: 10.1016/j.carbon.2016.04.062

## Plasmonic Semiconductor Nanoparticles in a Metal-Organic Framework Structure and their In Situ Cation Exchange

Andreas Wolf<sup>1,\*</sup>, Lisa Diestel<sup>1</sup>, Franziska Lübke<sup>1,\*</sup>, Torben Kodanek<sup>1,\*</sup>, Tarek Mohamed<sup>1,\*</sup>, Jürgen Caro<sup>1,\*</sup> and Dirk Dorfs<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup> Institute of Physical Chemistry and Electrochemistry, Leibniz Universität Hannover, Callinstr. 3A, 30167 Hannover, Germany

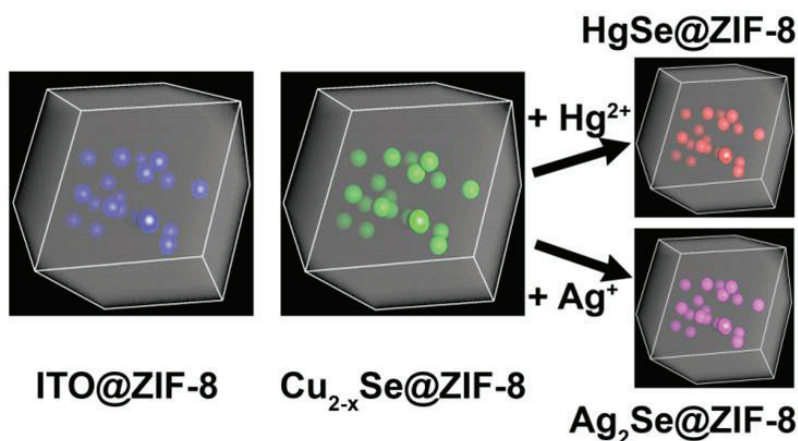
\* Laboratory of Nano and Quantum Engineering, Schneiderberg 39, 30167 Hannover, Germany

### Full Article

Reprinted and adapted with permission from reference [1]. Copyright 2016 American Chemical Society. The full article is published online (DOI: 10.1021/acs.chemmater.6b03425).

### Abstract

Composites of nanoparticles (NPs) in metal-organic frameworks (MOFs) combine the versatile properties of nanoparticles with the defined porosity of MOFs. Here, we show the encapsulation of plasmonic semiconductor NPs in ZIF-8 crystals. Both p-type and n-type doped plasmonic semiconductor NPs (consisting of  $\text{Cu}_{2-x}\text{Se}$  and indium tin oxide, respectively) are encapsulated. The plasmonic and structural properties of each system are preserved during the formation of the composites. Furthermore we demonstrate the accessibility of the in ZIF-8 integrated nanoparticles via the successful first time in situ cation exchange of MOF embedded  $\text{Cu}_{2-x}\text{Se}$  NPs to  $\text{HgSe}$  NPs and  $\text{Ag}_2\text{Se}$  NPs. This ion exchange occurs without influencing the composition or structural integrity of the metal-organic framework. This approach hence enables a fixation of plasmonic nanoparticles avoiding strong plasmon-plasmon coupling but still keeping the plasmonic nanoparticles accessible.



### Introduction

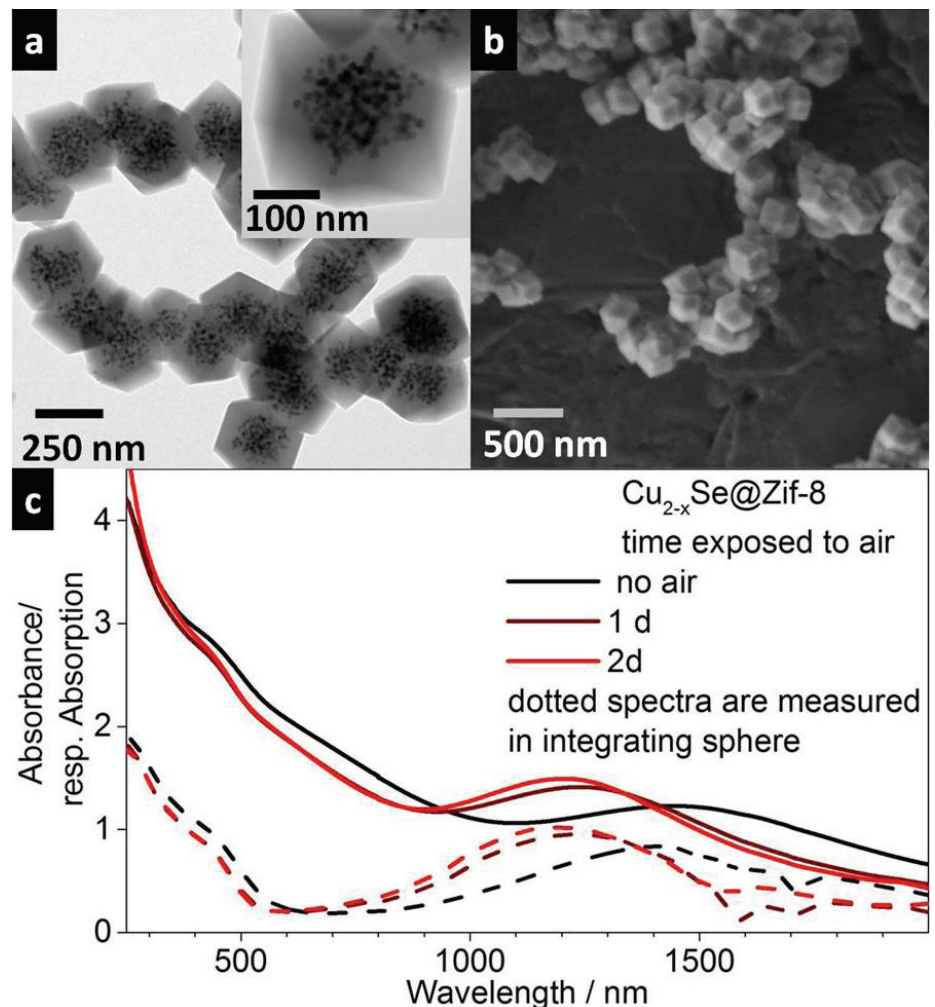
The discovery of the origin of the NIR absorption band in copper chalcogenides has sparked intensive research in degenerately self-doped semiconductor nanoparticles that exhibit localized surface plasmon resonances (LSPRs). [2-4] Compared to classical metal nanoparticles (NPs), these materials opened a further path to tune the LSPR. While the tuning for metal NPs is limited to size, shape and material choice during synthesis, the LSPR of self-doped copper chalcogenides can further be tuned by post synthetic oxidation and reduction.[3] In addition the cation exchange with different cations enables the shift of the LSPR maximum.[5] The LSPR in  $\text{Cu}_{2-x}\text{Se}$  is caused by p-type self-doped free charge carriers.[3] In contrast to that indium tin oxide (ITO) is n-type doped. These two systems are excellent examples of plasmonic semiconductors with a LSPR in the near infrared (NIR), that are

covering p-type as well as n-type doped semiconductors.

Nanoporous metal-organic framework (MOF) structures have been studied and applied in various applications during the last decade.[6] Their homogeneous structure with defined cavity and gate size fueled the research efforts in this area. Combining the properties of MOFs with the unique properties of nano sized materials was a logical consequence to achieve highly functional composite materials.[7,8]

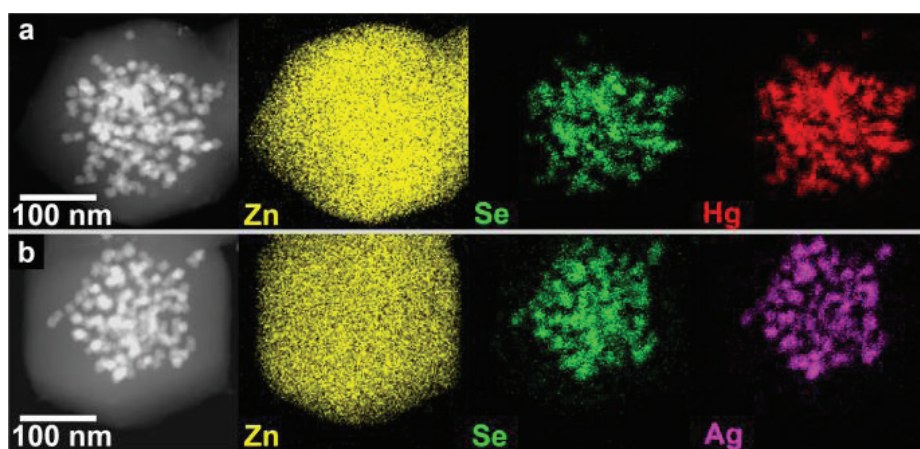
We show here, to the best of our knowledge, the first time ever incorporation of plasmonic semiconductor NPs in a MOF structure. While previous works have shown the incorporation of several plasmonic metal nanoparticles, plasmonic semi-conductor NPs have not been successfully built into MOF NPs to date. In this project the formation of composite particles consisting of multiple  $\text{Cu}_{2-x}\text{Se}$  NPs or indium tin oxide (ITO) in one ZIF-8 particle resulting in  $\text{Cu}_{2-x}\text{Se}@ZIF-8$  or  $\text{ITO}@ZIF-8$  composites, respectively, will be shown. The resulting composite particles exhibit a strong absorption band in the NIR originating from the LSPR of the incorporated NPs. Oxidation enables the tuning of the  $\text{Cu}_{2-x}\text{Se}$  LSPR inside the  $\text{Cu}_{2-x}\text{Se}@ZIF-8$ .

We here report for the first time a cation exchange of NPs inside a NP@MOF composite. Specifically we exchange the  $\text{Cu}_{2-x}\text{Se}$  NPs inside a  $\text{Cu}_{2-x}\text{Se}@ZIF-8$  composite with  $\text{Ag}^+$  and  $\text{Hg}^{2+}$  ions resulting in  $\text{HgSe}@ZIF-8$  and  $\text{Ag}_2\text{Se}@ZIF-8$  composite particles, without modifying the ZIF-8 host structure. This further demonstrates the accessibility of the plasmonic NPs, while the fixation within the MOF framework prevents an agglomeration of them.



**Figure 1:** TEM (a) and SEM (d) micrographs of typical  $\text{Cu}_{2-x}\text{Se}@ZIF-8$  particles, The inset shows the magnifications of single composite particles. Absorbance spectra (a) of  $\text{Cu}_{2-x}\text{Se}@ZIF-8$  composite particles after different time of exposure to air, measured in transmission mode (solid lines) and the absorption spectra in the integrating sphere (dotted lines).

Transmission electron microscopy reveals the formation of  $281 \text{ nm} \pm 23 \text{ nm}$  sized  $\text{Cu}_{2-x}\text{Se}@ZIF-8$  composite crystals, with multiple smaller, higher contrast  $\text{Cu}_{2-x}\text{Se}$  NPs embedded (Figure 1a). Combined with the associated scanning electron microscopy (SEM) micrograph (Figure 1b), it can be seen that the majority of the ZIF-8-based composite particles exhibit a rhombic dodecahedron shape. We observed that with the described synthesis parameters a quantitative integration of the  $\text{Cu}_{2-x}\text{Se}$  NPs into the ZIF-8 crystals can be achieved. The successful integration of the NPs was further shown by energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDX) and X-ray powder diffraction (XRD) measurements, that can be found in the full manuscript (see link below). The  $\text{Cu}_{2-x}\text{Se}@ZIF-8$  composite particles strongly scatter due to their size, but also exhibit an absorbance maximum at  $1450 \text{ nm}$  in normal transmission mode (see Figure 1c). Measuring only the absorption of the same sample results in a spectrum that corresponds to the one of typical  $\text{Cu}_{2-x}\text{Se}$  NPs. This further shows that while being fixated in the MOF framework no agglomeration of the NPs occurred, as this would have caused a strong bathochromic shift and broadening of the resonance band.



**Figure 2:** HAADF-STEM micrograph and EDX mappings of Zn, Se, Hg or Ag for the  $\text{HgSe}@ZIF-8$  (a) and the  $\text{Ag}_2\text{Se}@ZIF-8$  (b) composite particles obtained by ion exchange.

Furthermore, we analyzed the behavior of the  $\text{Cu}_{2-x}\text{Se}@ZIF-8$  composite particles when exposed to  $\text{Ag}^+$  and  $\text{Hg}^{2+}$  ions in the solvent methanol. The addition of both ions leads to the complete disappearance of the LSPR, as it was previously observed for plain non-embedded and therefore freely accessible  $\text{Cu}_{2-x}\text{Se}$  NPs.<sup>5,9</sup> Analyzing the particles with TEM, shows that the composite particles have an average size of  $257 \text{ nm} \pm 28 \text{ nm}$  ( $\text{Hg}^{2+}$ ) and  $255 \pm 22 \text{ nm}$  ( $\text{Ag}^+$ ) respectively. Despite the minimal etching at the ZIF-8 edges, the embedded NPs are still fully encapsulated after around 2 h treatment with  $\text{Ag}^+$  or  $\text{Hg}^{2+}$  ions. The elemental mapping in Figure 2 shows that the  $\text{Cu}_{2-x}\text{Se}$  NPs underwent complete ion exchange and were transformed into  $\text{Ag}_2\text{Se}$  or  $\text{HgSe}$  NPs, respectively. However, no evidence could be found that the added ions exchanged the  $\text{Zn}^{2+}$  ions in the ZIF-8 framework.

## Conclusion

In this work we present the successful integration of two plasmonic semiconductor systems into the nanoporous MOF type ZIF-8. We call them  $\text{Cu}_{2-x}\text{Se}@ZIF-8$  and  $\text{ITO}@ZIF-8$  composite particles. Both, the p-type doped  $\text{Cu}_{2-x}\text{Se}$  NPs and the n-type doped ITO NPs, preserve their LSPR while being incorporated into the respective ZIF-8 composite structure. The  $\text{Cu}_{2-x}\text{Se}@ZIF-8$  composite further showed that the LSPR can still be tuned by oxidation, comparable to the pristine  $\text{Cu}_{2-x}\text{Se}$  NPs while the LSPR of  $\text{ITO}@ZIF-8$  particles was found to be stable under ambient conditions. Therefore, both systems are potentially interesting for sensory application in which the ZIF network is size discriminating the access to the LSPR particles and can be either used

for optical sensing of redox active substances ( $\text{Cu}_{2-x}\text{Se}$ ) or for simply sensing changes in the dielectric surrounding (ITO).

Furthermore, we showed that, while being physically protected from the environment and from agglomeration, the NPs are still accessible as can be seen from ion exchange reactions. Via this straight forward strategy we successfully synthesized  $\text{HgSe@ZIF-8}$  and  $\text{Ag}_2\text{Se@ZIF-8}$  composite particles starting from the  $\text{Cu}_{2-x}\text{Se@ZIF-8}$  composites through an in situ cation exchange that is not destroying the ZIF-8 framework. Thus, ion exchange shows a possible approach for functionalized ZIF-8 composite particles that might not be accessible via direct synthesis.

### Acknowledgment

The authors are grateful to the German Research Foundation (DFG) for funding (DFG research Grant DO 1580/2-1 and DO 1580/3-1). The authors thank the Laboratory of Nano and Quantum Engineering of the Leibniz Universität Hannover and the Volkswagen foundation (lower Saxony/Israel cooperation, Grant ZN2916). T.K. is grateful to the Hannover School for Nanotechnology (HSN) for funding.

### References

- [1] Wolf, A.; Diestel, L.; Luebkemann, F.; Kodanek, T.; Mohamed, T.; Caro, J.; Dorfs, D. Plasmonic Semiconductor Nanoparticles in a Metal-Organic Framework Structure and Their in Situ Cation Exchange. *Chem. Mater.* 2016, 28, 7511-7518.
- [2] Luther, J. M.; Jain, P. K.; Ewers, T.; Alivisatos, A. P. *Nat Mater* 2011, 10, 361-366.
- [3] Dorfs, D.; Härtling, T.; Miszta, K.; Bigall, N. C.; Kim, M. R.; Genovese, A.; Falqui, A.; Povia, M.; Manna, L. *J. Am. Chem. Soc.* 2011, 133, 11175-11180.
- [4] Comin, A.; Manna, L. *Chem. Soc. Rev.* 2014, 43, 3957-3975.
- [5] Wolf, A.; Kodanek, T.; Dorfs, D. *Nanoscale* 2015, 7, 19519-19527.
- [6] Eddaoudi, M.; Sava, D. F.; Eubank, J. F.; Adil, K.; Guillerm, V. *Chem. Soc. Rev.* 2015, 44, 228-249.
- [7] Hermes, S.; Schroeter, M.; Schmid, R.; Khodeir, L.; Muhler, M.; Tissler, A.; Fischer, R. W.; Fischer, R. A. *Angew. Chem., Int. Ed.* 2005, 44, 6237-6241.
- [8] Lu, G.; Li, S.; Guo, Z.; Farha, O. K.; Hauser, B. G.; Qi, X.; Wang, Y.; Wang, X.; Han, S.; Liu, X.; DuChene, J. S.; Zhang, H.; Zhang, Q.; Chen, X.; Ma, J.; Loo, S. C. J.; Wei, W. D.; Yang, Y.; Hupp, J. T.; Huo, F. *Nat Chem* 2012, 4, 310-316.
- [9] Zhang, H.; Xia, Y. *ACS Sens.* 2016, 1, 384-391.



## Strong suppression of shot noise in a feedback controlled single-electron transistor

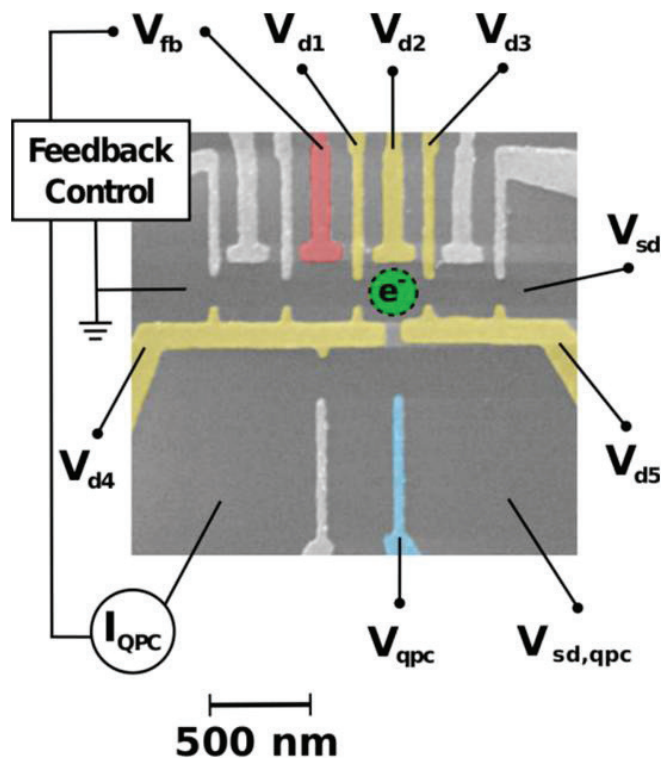
Timo Wagner<sup>1\*</sup>, Philipp Strasberg<sup>2</sup>, Johannes C. Bayer<sup>1\*</sup>, Eddy P. Rugeramigabo<sup>1\*</sup>, Tobias Brandes<sup>2</sup> and Rolf J. Haug<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> Institut für Festkörperphysik, Leibniz Universität Hannover, D-30167 Hannover, Germany

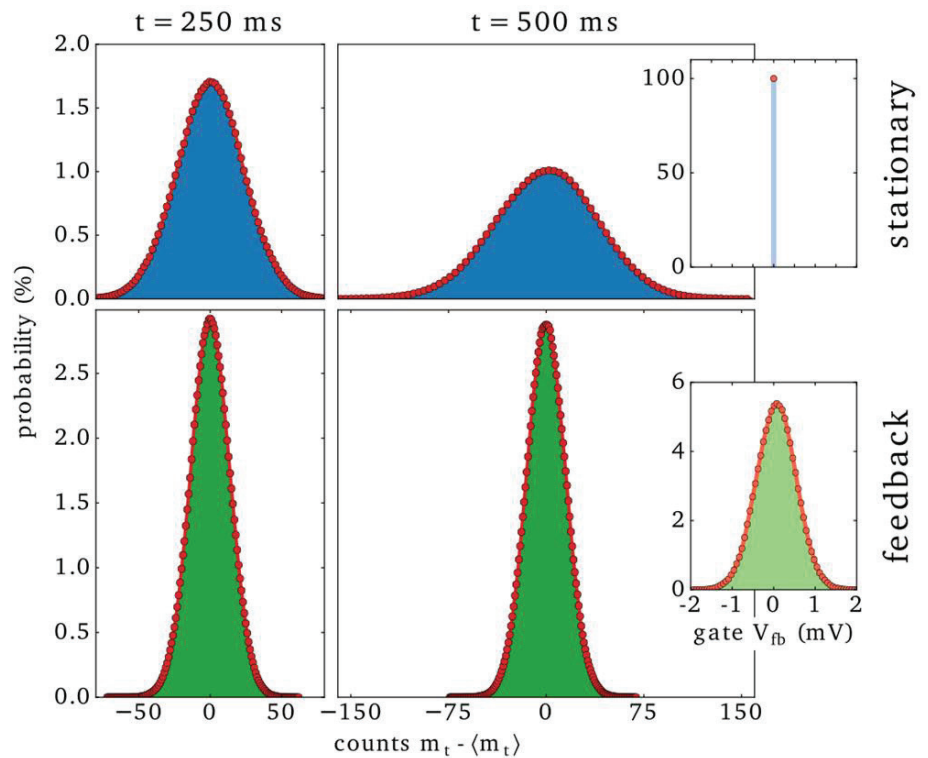
<sup>2</sup> Institut für Theoretische Physik, Hardenbergstr. 36, TU Berlin, D-10623 Berlin, Germany

\* Laboratory for Nano and Quantum Engineering, Schneiderberg 39, D-30167 Hannover, Germany

We demonstrate the strong suppression of shot noise in a single-electron transistor using an exclusively electronic closed-loop feedback [1]. The occurrence of shot-noise, due to the random emission of electrons with the quantized charge  $e^-$ , was first postulated in vacuum diodes by W. Schottky in 1918 [2] and is becoming the dominant source of noise in present-day mesoscopic conductors [3]. Our implemented feedback loop monitors and adjusts the counting statistics in a single-electron transistor [4]. With increasing feedback response we observe a stronger suppression and faster freezing of charge current fluctuations, leading to a highly accurate and stable tunneling current [1,5]. Our technique is analog to the generation of squeezed light in quantum optics, using in-loop photo detection [6, 7]. Sub-Poisson single-electron sources will pave the way for high-precision measurements in quantum transport similar to its optical equivalent [7].



**Figure 1:** SEM image of our feedback controlled single-electron transistor (SET), consisting of a gate defined quantum dot (QD) with coupled quantum point contact (QPC) charge detector. The sample is based on a two-dimension electron gas (2DEG) in GaAs/AlGaAs.



**Figure 2:** *a,b*, The counting distributions of the stationary quantum dot (blue) are shown for two different values of  $t$ . A strong temporal broadening of the charge fluctuations is visible. *c,d*, In comparison the distributions of the feedbacked quantum dot (green) are clearly suppressed and temporally frozen. *e,f*, At the same time the distribution  $V_{fb}$  transforms from a single-valued Delta-peak into a broad distribution.

## References

- [1] T. Wagner, P. Strasberg, J. C. Bayer, E. P. Rugarbigabo, T. Brandes and R. J. Haug, Nature Nanotech., advanced online publication doi:10.1038/nnano.2016.225 (2016)
- [2] W. Schottky, Über spontane Stromschwankungen in verschiedenen Elektrizitätsleitern. Ann. Phys. 362, 541–567 (1918)
- [3] Ya. Blanter and M. Büttiker, Shot noise in mesoscopic conductors. Phys. Rep. 336, 1–166 (2000)
- [4] S. Gustavson, et al., Surf. Sci. Rep. 64, 191 (2009)
- [5] T. Brandes, Phys. Rev. Lett. 105, 06060 (2010)
- [6] S. Machida, Y. Yamamoto, Opt. Commun. 57, 290 (1986)
- [7] Wiseman, H. M. Quantum Measurement and Control (Cambridge Univ. Press, 2009)

## Prozessieren von maßgeschneiderten ZrO<sub>2</sub>-Nanopartikeln

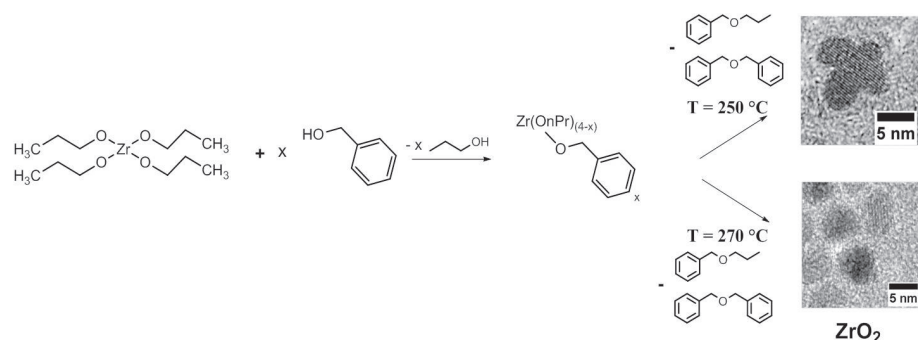
P. Stolzenburg<sup>a</sup>, A. Freytag<sup>b\*</sup>, N. C. Bigall<sup>b\*</sup>, G. Garnweitner<sup>a\*</sup>

<sup>a</sup> Institut für Partikeltechnik, Volkmaroder Str. 5, 38104 Braunschweig, Germany

<sup>b</sup> Institut für Physikalische Chemie und Elektrochemie, Callinstr. 3A, 30167 Hannover, Germany

\* Laboratorium für Nano- und Quantenengineering, Schneiderberg 39, 30167 Hannover, Germany

Nanostrukturiertes Zirconium(IV)-Oxid kann in der Verwendung als sogenanntes „Functional Material“ zu neuartigen oder verbesserten Anwendungen auf den Gebieten der technischen Keramiken, Katalysatoren oder Elektronikkomponenten führen. Jedoch ist die Performance dieser Materialien maßgeblich von den spezifischen Eigenschaften der Nanopartikel wie Kristallitgröße, Morphologie oder Phasenzusammensetzung abhängig und die Herstellung meist nur durch aufwendige Synthese im kleinen Maßstab möglich. Um den stetig steigenden Bedarf dieser Hochleistungsmaterialien zu decken, sind Prozesse wie die nichtwässrige Sol-Gel-Synthese nötig, welche die Produktion von hochkristallinen Nanomaterialien mit definierten Eigenschaften im technischen Maßstab erlauben. Ein großer Vorteil der nichtwässrigen Sol-Gel-Methode gegenüber anderen Verfahren sind die relativ milden Reaktionsbedingungen, welche durch eine geeignete Prozessführung eine gute Kontrolle der finalen Partikeleigenschaften erlaubt [1, 2]. Trotzdem ist für die Realisierung dieses Verfahrens ein tiefgründiges Verständnis über die Wechselwirkungen zwischen Prozessparametern und den zur Partikelbildung führenden Mechanismen unabdingbar. Diese Studie konzentriert sich auf die grundlegenden Mechanismen zur Bildung und zum Wachstum von ZrO<sub>2</sub>-Nanopartikeln und zeigt, wie die chemischen Reaktionskinetiken finale Nanopartikeleigenschaften wie Größe, Morphologie oder Phasenzusammensetzung beeinflussen.

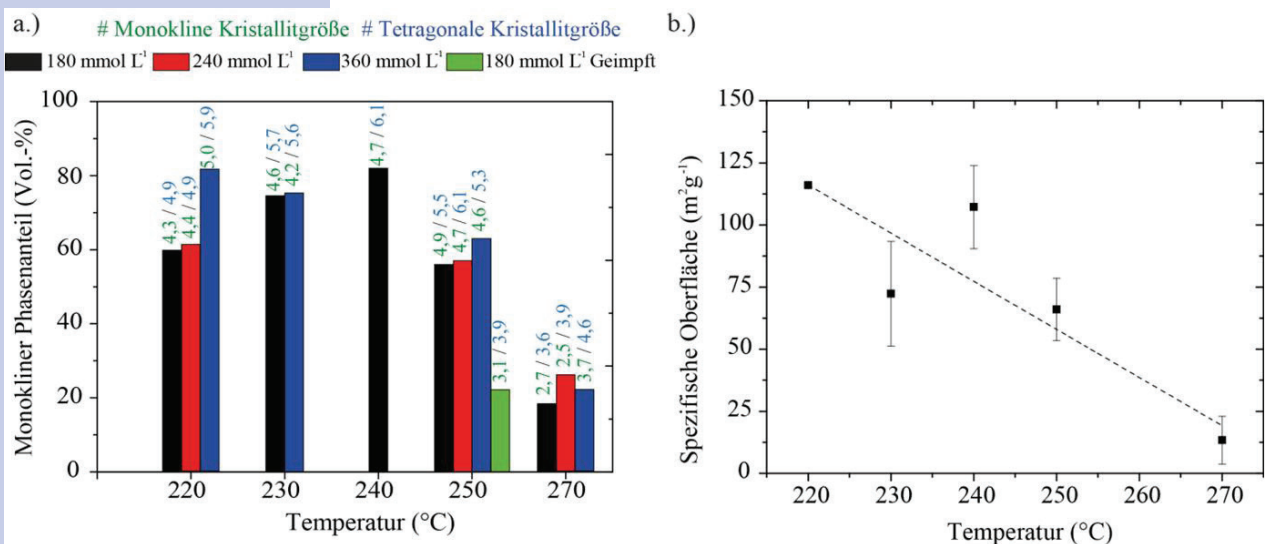


**Abbildung 1:** Reaktionsschema der nichtwässrigen Sol-Gel-Synthese von ZrO<sub>2</sub>-Nanopartikeln. Die TEM-Aufnahmen zeigen synthetisierte Nanopartikel verschiedener Größe und Morphologie, welche durch die Wahl der Synthesebedingungen gezielt hergestellt werden können.

Dafür wurde die Synthese in einem gerührten 1,5 L Batch-Reaktorsystem unter solvothormalen Bedingungen in einem Temperaturbereich von 200-270 °C durchgeführt. Hierfür wurde der Präkursor Zirconium(IV)-n-propylat in und mit dem Lösungsmittel Benzylalkohol zur Reaktion gebracht (Abbildung 1). In einem ersten Reaktionsschritt findet ein Ligandenaustausch statt, in welchem Propoxy- gegen Benzyloxy-Liganden ausgetauscht werden. Dabei wird das Intermediat Zr(OnPr)<sub>4</sub>-(OBn)<sub>x</sub> unter Freisetzung von Propanol gebildet. Im zweiten Reaktionsschritt wird das Intermediat durch eine Ethereliminierung zu ZrO<sub>2</sub>, Dibenzylether und Propylbenzylether umgesetzt. Durch eine Probenentnahme mit anschließender Phasenseparation haben wir die Feststoff- als auch die Flüssigphase über den Verlauf der Synthese analysiert. Mittels Röntgenbeugung, Elektronenmikroskopie und Thermogravimetrie wurden

die Nukleation, Wachstum sowie Phasenzusammensetzung der Nanopartikel untersucht. Die chemischen Reaktionskinetiken wurden anhand der Zirconiumionenkonzentration  $[Zr]_i$  verfolgt, wofür die in der Flüssigphase gelösten Mengen an Zirconium in konstanten Volumen (5 mL) bei 1000 °C unter Sauerstoff langsam zu  $ZrO_2$  umgesetzt und gravimetrisch bestimmt wurden.

Die kinetischen Untersuchungen haben ergeben, dass die zur Partikelbildung führende chemische Reaktion am besten durch eine Kinetik pseudo-nullter Ordnung beschrieben werden kann und der Reaktionsverlauf einem linearen Trend bis zu einem vollständigen Umsatz folgt. Zudem gelten die Gesetzmäßigkeiten nach Arrhenius, wodurch die Reaktionsgeschwindigkeit mit steigender Temperatur zunimmt. Interessanterweise haben wir festgestellt, dass die Reaktionsgeschwindigkeit proportional zur Ausgangskonzentration von Zirconium(IV)-n-propylat zunimmt, was zuerst gegen eine Kinetik nullter Ordnung spricht, da hier die Reaktionsgeschwindigkeit unabhängig von der Eduktkonzentration sein sollte. Dieses Phänomen kann aber mit Hilfe der klassischen Nukleationstheorie erklärt werden, wonach die Partikelbildungskinetik maßgeblich von der Ausgangskonzentration beeinflusst wird. Hierdurch werden die komplexen Wechselwirkungen zwischen den chemischen Mechanismen und den Mechanismen der Partikelbildung deutlich. Die Gültigkeit der klassischen Nukleationstheorie konnten wir zudem durch das Animpfen der Reaktionslösung mit  $ZrO_2$ -Partikeln zeigen, da sich auch hierbei die Gesamtreaktion aufgrund der heterogenen Keimbildung beschleunigte. Durch die Verfolgung des Partikelwachstums während der Synthese konnten wir feststellen, dass die Nanopartikel in einem Größenbereich von 2,0 - 2,5 nm gebildet werden und fast ausschließlich tetragonal sind. Über den Verlauf der Synthese wachsen die Nanopartikel bis 7 nm und durchlaufen einen Phasenwechsel bis zu monoklinen Anteilen von 90 Gew.-%. Wir konnten beobachten, dass der tetragonal-zu-monoklin-Phasenwechsel durch einen charakteristischen Wechsel der Partikelmorphologie von kleinen runden zu stark dendritischen Strukturen (Abbildung 1) begleitet wird [3]. Wird die Synthese bei höheren Temperaturen im Bereich 270 °C durchgeführt oder vorab angeimpft, wachsen die Partikel erstaunlicherweise nur minimal und durchlaufen keinen charakteristischen Phasen- und Morphologiewechsel.



**Abbildung 2:** a: Kristallitgröße und monokliner Phasenanteil bei verschiedenen Prozessbedingungen; b: Einfluss der Synthesetemperatur auf die spezifische Oberfläche der Produkte.

Die Ursache hierfür scheinen die höheren Reaktionsraten zu sein, welche einen maßgeblichen Einfluss auf die Partikeleigenschaften haben. Synthesen bei niedrigen Temperaturen und niedrigen Ausgangskonzentrationen führen durch die langsamen chemischen Reaktionskinetiken zu größeren und dendritischen Nanopartikeln mit hohen monoklinen Phasenanteilen (Abbildung 2a). Synthesen mit schnellen Reaktionskinetiken, z.B. bei hohen Temperaturen, bewirken hingegen die Bildung kleinerer runder Partikel mit tetragonalen Phasenanteilen. Besonders stark ist dieser Einfluss bei der spezifischen Oberfläche der Nanopartikel erkennbar (Abbildung 2b), da diese bei niedrigen Prozesstemperaturen durch die dendritischen Strukturen stark zunimmt, was insbesondere für katalytische Anwendung von attraktiv ist. Somit ist eine gezielte Einstellung von Kristallitgröße, Morphologie und Phasenanteil durch die Prozessparameter möglich, wodurch Nanopartikel anwendungsspezifisch maßgeschneidert werden können.

## References

- [1] M. Zimmermann, B. Temel, G. Garnweitner, Parameter studies of the synthesis of titanium dioxide nanoparticles: Effect on particle formation and size, *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification* 74 (2013) 83-89.
- [2] I.-C. Masthoff, M. Kraken, D. Menzel, F.J. Litterst, G. Garnweitner, Study of the growth of hydrophilic iron oxide nanoparticles obtained via the non-aqueous sol-gel method, *Journal of Sol-Gel Science and Technology* 77 (2016) 553-564.
- [3] P. Stolzenburg, A. Freytag, N.C. Bigall, G. Garnweitner, Fractal growth of ZrO<sub>2</sub> nanoparticles induced by synthesis conditions, *CrystEngComm* 18, 8396-8405 (2016).

## Optionen zur Realisierung von Si-Solarzellen mit Effizienzen über 26 %

J. Krügener<sup>1</sup>, F. Haase<sup>2</sup>, R. Peibst<sup>1,2</sup>, R. Brendel<sup>2,\*</sup>, H.-J. Osten<sup>1,\*</sup>

*1 Institut für Materialien und Bauelemente der Elektronik, Leibniz Universität Hannover, Schneiderberg 32, 30167 Hannover*

*2 Institut für Solarenergieforschung Hameln, Am Ohrberg 1, 31860 Emmerthal*

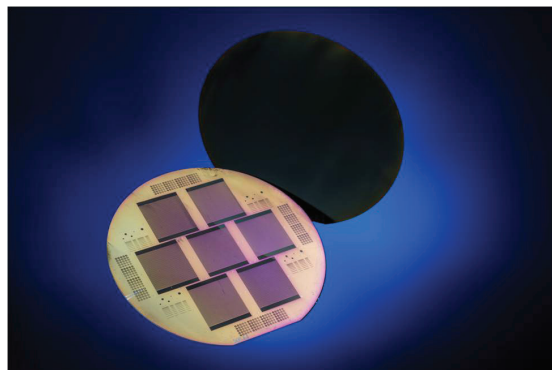
*\* Laboratorium für Nano- und Quantenengineering, Schneiderberg 39, 30167 Hannover, Germany*

### Einleitung

Der Wirkungsgrad von Solarzellen wird, angesichts des immer größer werdenden Anteils der BOS (balance of system)-Kosten an einem PV-System, zum entscheidenden Faktor für eine weitere Reduktion der PV-Stromgestehungskosten. In dem „26+“-Projekt sollen „Leuchtturmeffizienzen“ von über 26 % erreicht werden. Ein Wirkungsgrad von 26 % galt vor wenigen Jahren noch als nahezu unerreichbar. Vor kurzem ermöglichten passivierende Kontakte in Kombination mit einem Rückkontaktlayout die bis jetzt höchsten Siliziumsolarzellenwirkungsgrade von bis zu 26,6 %. Der theoretische Wert liegt noch deutlich darüber. Wir verfolgen den Ansatz, passivierende Kontakte aus polykristallinem Silizium auf Oxid (POLO) anstatt amorphes Silizium zu verwenden, da die POLO-Kontakte temperaturstabiler und somit mit einer konventionellen Siedruckmetallisierung vereinbar sind.

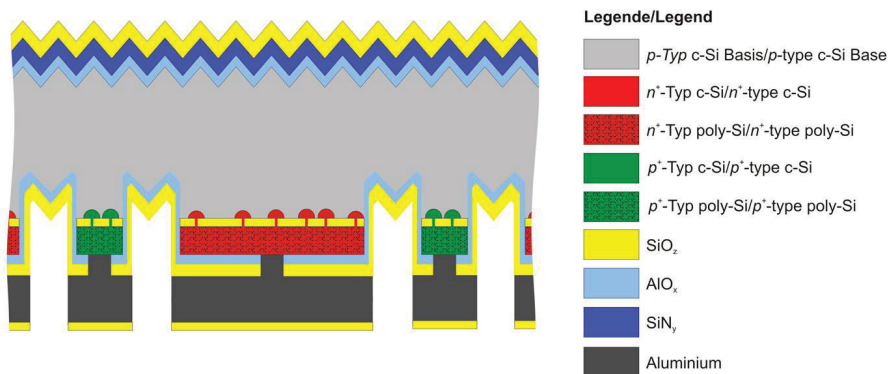
### Ergebnisse

Die 4 cm<sup>2</sup> großen Solarzellen werden auf 100 mm großen Wafern prozessiert (siehe Abbildung 1). Hierbei wird die komplette im LNQE vorhandene Si-Prozesslinie von der Oxidation, über die Schichtabscheidung und Ionenimplantation bis hin zur Fotolithografie genutzt. Insbesondere letztere eignet sich hervorragend für die Definition von besonders schmalen und dennoch gleichmäßigen Kontaktstrukturen, wie sie für das angestrebte Zellkonzept vorteilhaft sind. Abbildung 2 zeigt schematisch den Querschnitt dieses ausschließlich rückseitigen Zellkonzeptes. Ausgangsmaterial sind 290 µm dicke p-Typ Wafer mit einem spezifischen Widerstand von 1,3 Ωcm. Auf die Rückseite dieser Wafer werden nun die passivierenden POLO-Kontakte, bestehend aus einem 2,1 nm dünnem Siliziumdioxid auf dem sich dotiertes polykristallines Silizium befindet, hergestellt. Für die Aktivierung der exzellenten elektrischen Eigenschaften ist zusätzlich eine thermische Nachbehandlung nötig, bei der ein Teil der Dotierstoffe aus dem Polysilizium in das Substrat eingetrieben wird. Für diesen Prozessschritt ist die Dotierstoffkonzentration im Polysilizium von essentieller Bedeutung. Ionenimplantation ermöglicht die gezielte Einstellung der Dotierstoffkonzentration.



**Abbildung 1:** Foto eines prozessierten 100 mm-Wafers mit 7 rückseitig kontaktierten Solarzellen.

Nach der Ionenimplantation der  $n^+$ - und  $p^+$ -Bereiche im Polysilizium, müssen diese elektrisch voneinander getrennt werden. Der Grund hierfür sind die schlechten elektrischen Eigenschaften dieser Übergänge. Die Ätzmaske für diesen Schritt wird mit Hilfe der Fotolithografie definiert. Bei der nasschemischen Kontakttrennung wird zudem die Vorderseite der Wafer alkalisch texturiert - es entstehen die in Abbildung 2 angedeuteten Pyramidenstümpfe auf der Vorderseite. Die entstehenden Gräben zwischen den  $n^+$ - und  $p^+$ -Bereichen und die texturierte Vorderseite der Solarzellen werden mit  $\text{AlO}_x$  passiviert. Zudem wird eine  $\text{SiN}_y/\text{SiO}_z$ -Schicht auf der Vorderseite abgeschieden, um die Reflexionsverluste zu reduzieren und eine  $\text{SiO}_z$  Schicht wird auf der Rückseite aufgebracht, um die interne Reflexion zu erhöhen. Für die Kontaktierung werden die dielektrischen Schichten auf der Rückseite lokal entfernt und Aluminium aufgedampft.




**Abbildung 2:** Schematischer Querschnitt der verwendeten Zellstruktur. Die elektrischen Kontakte befinden sich ausschließlich auf der Rückseite der Zellen.

Nach der Kontaktpräparation, werden die fertigen Solarzellen elektrisch charakterisiert. Der bisherige Rekordwirkungsgrad beträgt 25,0 % bei einer offenen Klemmspannung von 723 mV. Diese hohe Spannung wird durch die Reduktion der Rekombination aufgrund der passivierenden POLO-Kontakte erreicht. Neben den elektrischen Messungen an den fertigen Solarzellen, wurden noch zusätzlich Messungen an Zellvorläufern durchgeführt. Aus diesen ort aufgelösten Lebensdauer messungen lässt sich sogar ein implizierter Wirkungsgrad von bis zu 26,2 % vor der Kontaktöffnung ermitteln. Die Reduktion auf 25,0 % nach Kontaktöffnung und Metallisierung wird unter anderem durch eine Degradation der Ladungsträgerlebensdauer unterhalb der  $\text{AlO}_x$  passivierten Bereiche verursacht. Letztere scheinen durch den Öffnungs- und Metallisierungsprozess geschädigt zu werden. Die Mechanismen dieser Reduktion werden gerade untersucht. Des Weiteren weichen die implizierten Kenndaten von den gemessenen Kenndaten der fertigen Zelle voneinander ab. Bei der Messung der Kenndaten wird im Gegensatz zur Messung der implizierten Kenndaten der Bereich um die Zellen herum abgedeckt wird. Damit werden in diesem Bereich keine Ladungsträger erzeugt und stellt damit eine Senke für die Ladungsträger im beleuchteten Zellbereich dar. Da dieser Bereich nach Fertigstellung der Solarzellen eine hohe Rekombination aufgrund der schlechten Oberflächen-passivierung hat, werden die Spannung und der Füllfaktor stark reduziert.

## Ausblick

Aus numerischen Simulationen der verwendeten Zellstruktur geht hervor, dass die im Rahmen des Projektes hergestellten Solarzellen ein Wirkungsgradpotential von bis zu 26,8 % besitzen. Dies zeigt zusammen mit den implizierten Kenndaten, dass nach einer weitergehenden Optimierung der Metallisierung und der Fingergeometrie Zellwirkungsgrad oberhalb von 26 % auf einer Rückkontaktsolarzelle möglich sind.



Leibniz Universität Hannover  
Laboratorium für Nano- und Quantenengineering  
Schneiderberg 39  
30167 Hannover  
Germany

[www.LNQE.uni-hannover.de](http://www.LNQE.uni-hannover.de)