



Laboratorium für
Nano- und Quantenengineering

11
102
1004

Leibniz
Universität
Hannover



Jahresbericht 2017

Laboratorium für Nano- und Quantenengineering

Annual Report 2017

Laboratory of Nano and Quantum Engineering

Seite Inhalt

Page Content

- 2 | Grußworte
Greetings
- 4 | Ziel des Laboratoriums
Goals of the Laboratory
- 6 | Forschung
Research
- 12 | Mitglieder
Members
- 22 | Aktuell in 2017
News in 2017
- 33 | Aktivitäten in 2017
Activities in 2017
- 34 | NanoDay 2017
NanoDay 2017
- 38 | Forschungsbau
Research building
- 46 | Studiengang Nanotechnologie
Study Course Nanotechnology
- 52 | Promotionsprogramm "Hannover School for Nanotechnology"
PhD Program "Hannover School for Nanotechnology"
- 66 | 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

Verantwortlich / *Responsible:*
Fritz Schulze-Wischeler

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

Titelbild / *Cover picture:*
Phd-program hsn-sensors
(Foto: O. Kerker)

Grußworte / Greetings

Liebe Leserin, lieber Leser,

auch im Jahr 2017 hat das Laboratorium für Nano- und Quantenengineering (LNQE) wieder zahlreiche Aktivitäten gezeigt. Ein Highlight war sicherlich im Februar 2017 die feierliche Eröffnung der neuen Sektion „hsn-sensors“ unseres Niedersächsischen Promotionsprogramms „Hannover School for Nanotechnology“. Die Doktorandinnen und Doktoranden der hsn-sensors befassen sich mit kleinsten Sensoren im Nanometerbereich. Auf die zwölf Stipendien

Dear Reader,

In 2017, the Laboratory of Nano and Quantum Engineering (LNQE) again showed numerous activities. A highlight in February 2017 was certainly the ceremonial opening of the new section "hsn-sensors" of our Lower Saxony doctoral program "Hannover School for Nanotechnology". The doctoral students of hsn-sensors deal with smallest sensors in the nanometer range. There were a total of 300 applications for the twelve scholarships. The funding amount

gab es ganze 300 Bewerbungen. Die Fördersumme beträgt 800.000 Euro für den Zeitraum von Oktober 2016 bis September 2020. Zusätzlich unterstützen uns die beteiligten Fakultäten finanziell. Hierfür vielen Dank!

Aufgrund des großen Anklangs des „Workshop on Nanosafety and Nanotoxicology“, den das LNQE im Rahmen der ersten Förderperiode der hsn veranstaltet hatte, entstand im März 2017 ein Fokusheft des Journals „Chemie Ingenieur Technik“ des Wiley-VCH-Verlags über die Umwelt- und Sicherheitsaspekte der Nanotechnologie. Hier führte das LNQE Ägide und unser Vorstandsmitglied Prof. Rolf Haug übernahm die Gastherausgeberschaft.

Viele unserer Mitglieder waren 2017 bei der Antragstellung von Exzellenz-Clustern im Rahmen der Exzellenzstrategie beteiligt. Die erste Runde der Voranträge überstanden haben die beiden unter Federführung der Leibniz Universität Hannover entstandenen Projekte QuantumFrontiers und PhoenixD wie auch die Cluster REBIRTH4S und Hearing4all-2, an denen die LUH beteiligt ist. LNQE-Mitglieder sind als federführende Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler eingebunden. Parallel dazu werden aus dem LNQE heraus derzeit weitere Förderinitiativen entwickelt und vorangebracht.

Im Laufe des Jahres 2017 konnten wir gleich drei neue Mitglieder begrüßen: Prof. Fei Ding (Festkörperphysik), Prof. Ulrich Giese (Kautschuktechnologie) und Prof. Bernhard Wicht (Mikroelektronische Systeme).

Einen besonderen Erfolg konnte unser LNQE-Mitglied Nadja Bigall, die im Frühjahr einen ERC Starting Grant von der EU erhielt und im Oktober auf eine Professur für „Funktionale Nanostrukturen“ berufen wurde.

Viele Spaß beim Lesen!

Dr. Fritz Schulze-Wischeler

Prof. Dr. Peter Behrens

is 800,000 Euros for the period from October 2016 to September 2020. In addition, the participating faculties support us financially. Many Thanks!

Due to the great response of the “Workshop on Nanosafety and Nanotoxicology”, which we organized in the first section of the hsn, a focus issue of the journal “Chemie Ingenieur Technik” of the Wiley-VCH publishers was released in March 2017 on the environmental and safety aspects of nanotechnology. Here the LNQE led the aegis and our board member Prof. Rolf Haug took over the guest editorship.

Many of our members participated in the application for excellence clusters in the Excellence Strategy in 2017. The first round of preliminary applications was completed by QuantumFrontiers and PhoenixD projects, which were created under the auspices of Leibniz Universität Hannover, as well as the REBIRTH4S and Hearing4all-2 clusters in which LUH is involved. LNQE members are involved as leading scientists. At the same time, further, large funding initiatives were continuously developed and promoted from the LNQE.

During 2017, we welcomed three new members: Fei Ding (solid state physics), Ulrich Giese (rubber technology) and Bernhard Wicht (micro-electronic systems).

A particular success, which makes us extremely happy, was for LNQE member Nadja Bigall, who first received an ERC Starting Grant from the EU in the spring and then has been appointed to a professorship for “Functional Nanostructures” at our Leibniz University since October.

Enjoy the reading!

Dr. Fritz Schulze-Wischeler

Prof. Dr. Peter Behrens



Fritz Schulze-Wischeler
- Geschäftsführer -
- Chief operating officer -



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

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 zehn 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.



Eröffnungsveranstaltung der section hsn-sensors des niedersächsischen Promotionsprogramms „Hannover School for Nanotechnology“ des LNQE am 8. Februar 2017.

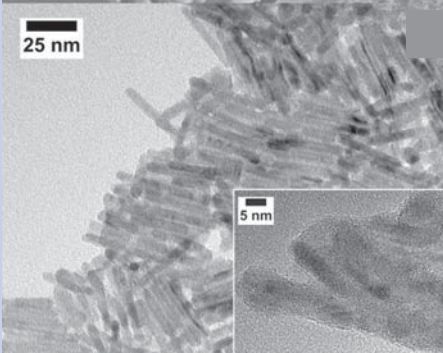
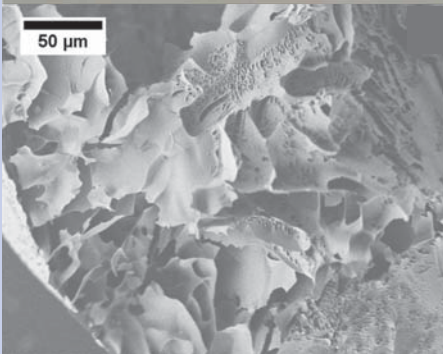
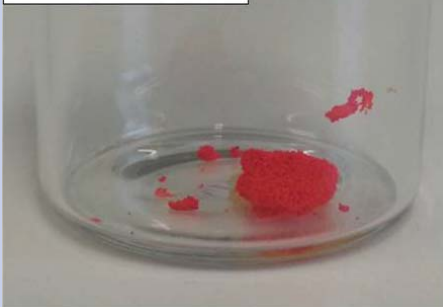
Opening event of the section hsn-sensors of the Lower Saxony doctoral program “Hannover School for Nanotechnology” of the LNQE on 8 February 2017.

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 ten facilities currently ranked as a Leibniz Research Center.

Forschung Research

CdSe/CdS



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

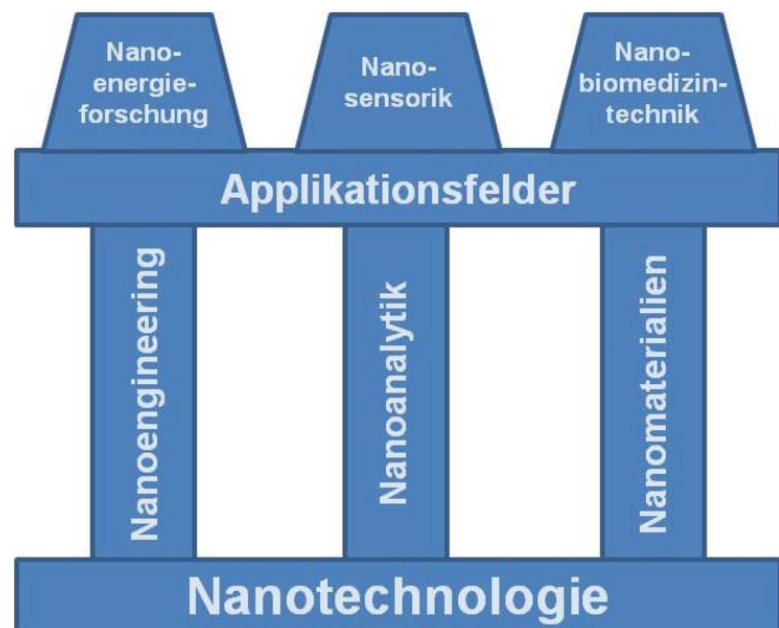
Die Nanotechnologie beschreibt die Erforschung und Manipulation von Dingen auf kleinsten Dimensionen. Generell beschäftigt sich die Nanotechnologie mit Strukturen im Größenbereich von 1-100 Nanometer in mindestens einer Raumrichtung. 100 Nanometer sind in etwa ein Tausendstel des Durchmessers eines normalen 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.

Nanotechnologie

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.

CdSe/CdS-Nanostäbchen werden zu makroskopischen voluminösen Monolithen, sogenannten Aerogelen, durch Gefrieren und anschließendes Gefriertrocknen zusammengefügt. Sie behalten immer noch die meisten ihrer Nanoeigenschaften
CdSe/CdS nanorods assembled into macroscopic voluminous monoliths, so called aerogels, by freezing and subsequent freeze-drying. They still retaining most of their nano-properties
 (A. Freytag, N. Bigall / PCI)

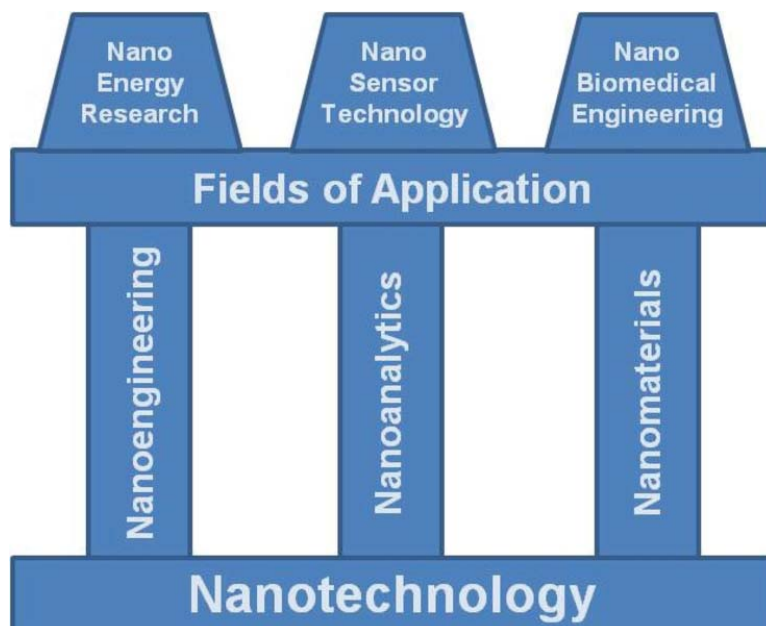


Forschungsstruktur des Laboratoriums für Nano- und Quantenengineering.

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 Dünnschichtsolarellen, Herstellung und Charakterisierung von Photonischen Kristallen, Nanostrukturen und Bausteinen für die Plasmonik, Kohärenzeffekte bei der Elektron-Loch-Spin-Kopplung und die Anwendung von spinpolarisierten Ladungsträgern in Halbleiterlasern.

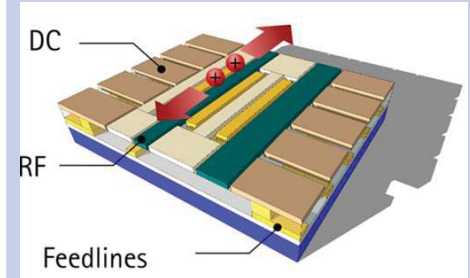
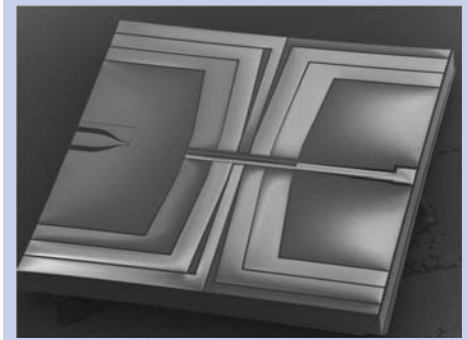


Research structure of the Laboratory of Nano and Quantum Engineering.

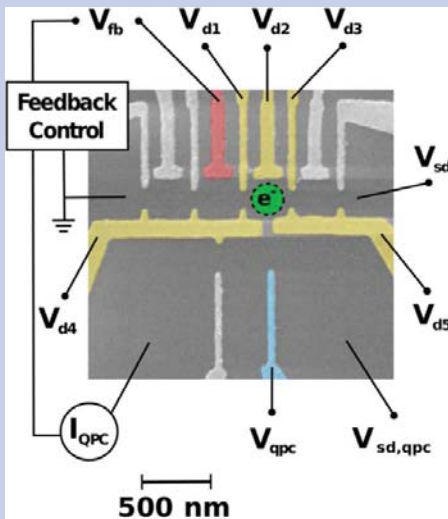
Nanoengineering

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.



Mehrschicht-Oberflächenelektroden-Ionenfallen. Oben: Ein gewürfelter (5 mm x 5 mm) Mehrschicht-Ionenfallen-Chip, der auf Chipfabrik-Technologie mit hohem spezifischen Widerstand basiert. Unten: Die physikalische Trennung von Mikrowellen- und Gleichstromkomponenten führt zu einem reduzierten Magnetfeld und einem erhöhten Magnetfeldgradienten an der Position des Ions.
Multi-layer surface electrode ion traps. Top: A diced (5mm x 5mm) multi-layer ion trap chip based on high-resistivity fab technology. Bottom: The physical separation of microwave and dc components leads to a reduced magnetic field and an increase magnetic field gradient at the position of the ion.
 (A. Salvador, C. Ospelkaus / IQO)



REM-Aufnahme eines rückgekoppelten Einzelelektron-Transistors, bestehend aus einem Gate-definierten Quantenpunkt (QD) mit gekoppeltem Quantenpunkt-kontakt (QPC) -Ladungsdetektor. Die Probe basiert auf einem zweidimensionalen Elektronengas in GaAs/AlGaAs.

SEM image of feedback controlled single-electron transistor, 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 in GaAs/AlGaAs.

(T. Wagner, R. Haug / FKP)

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.

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.

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.

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.

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.

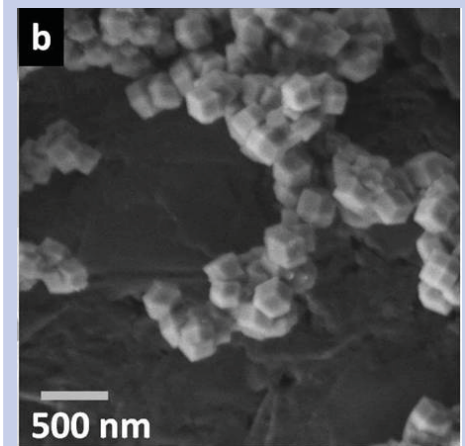
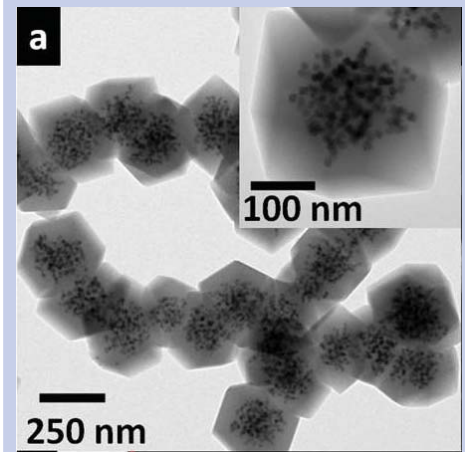
Aktuelle Forschungsvorhaben sind unter anderem Untersuchungen von Nanopartikeln für Farbstoff-Solarzellen, Beschichtungen mit Nanopartikeln für selbstreinigende Oberflächen, Nanopartikel mit photokatalytischen Eigenschaften zur Reinigung von Luft und Wasser, Überstrukturen von Nanopartikeln, erweiterte 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.



TEM- und REM-Aufnahmen von Nanopartikeln in einer metallorganischen Gerüststruktur ($\text{Cu}_{2-x}\text{Se} @ \text{ZIF-8}$ -Partikel), der Ausschnitt zeigt die Vergrößerung einzelner Kompositpartikel.

TEM and SEM micrographs of nanoparticles in a metal-organic framework structure ($\text{Cu}_{2-x}\text{Se} @ \text{ZIF-8}$ particles), the inset shows the magnification of single composite particles.

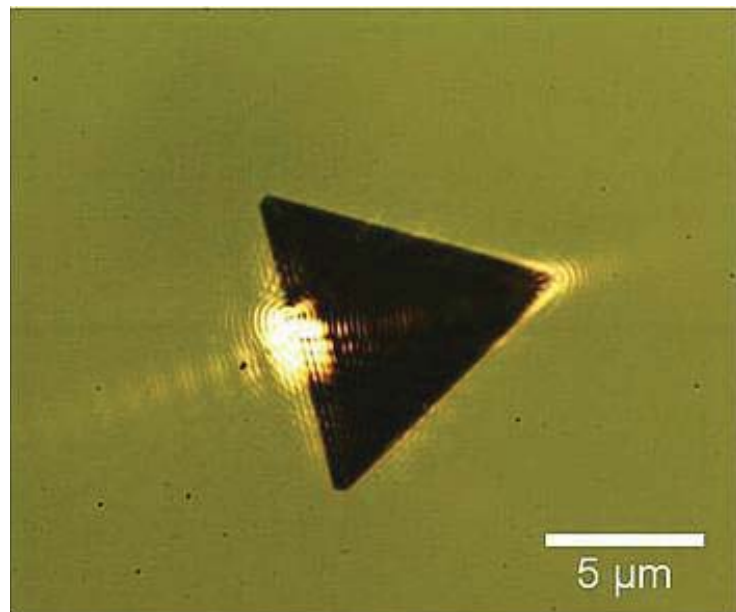
(A. Wolf, J. Caro, D. Dorfs / PCI)

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.



Oberflächenplasmonpolaritonen Untersuchung an atomar flachem kristallinem Gold.

Surface plasmon polaritons study on atomically flat crystalline gold.

(P. Chhantyal, C. Reinhardt / LZH & hsn-energy)

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

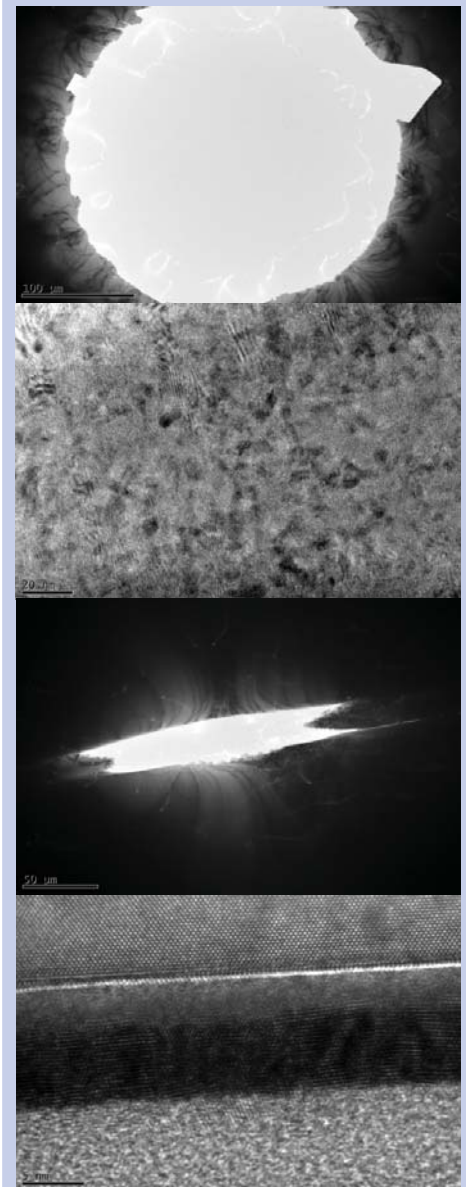
Im Bereich Medizin kommt Nanotechnologie immer häufiger zum Einsatz. Zum Beispiel werden im LNQE Nanopartikel und Nanomaterialien für ein kontrolliertes Drug Delivery hergestellt und charakterisiert, z.B. durch Ausnutzung der magnetischen Hyperthermie; bei Implantaten wird die Wechselwirkung mit dem 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 neuartiger 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.



Transmissionselektronenmikroskopie an epitaktisch gewachsenem Gadoliniumoxid auf Silizium (Gd_2O_3 auf Si(100)). Die beiden oberen Bilder zeigen Draufsicht-Aufnahmen, die beiden unteren Bilder Querschnittsaufnahmen (jeweils eine Übersicht und in Hochauflösung). In Hochauflösung sind die Atome des Kristallgitters als weiße Punkte sichtbar.

Transmission electron microscopy on epitaxially grown gadolinium oxide on silicon (Gd_2O_3 on Si(100)). The two upper images show plan-view images, the two lower images cross-section images (one overview and one in high resolution). In high resolution, the atoms of the crystal lattice are visible as white dots.

(P. Gribisch / MBE, F. Schulze-Wischeler / LNQE)

Mitglieder Members



Prof. Dr. Detlef W. Bahnemann
Institut für Technische Chemie
Leibniz Universität Hannover
Callinstraße 3
D-30167 Hannover
Phone: +49 511 762 5560
Fax: +49 511 762 3004
bahnemann@iftc.uni-hannover.de
www.tci.uni-hannover.de/ak_bahnemann.html

Kernkompetenzen / *Core competencies:*

- Photokatalytische Luft- und Wasserreinigung / *Photocatalytic air and water purification*
- Photokatalytische Wasserspaltung / *Photocatalytic water splitting*
- Kinetik schneller photokatalytischer Prozesse / *Kinetics of fast photocatalytic processes*
- Farbstoffsolarzellen / *Dye solar cells*



Prof. Dr. Peter Behrens
- Sprecher des Vorstandes LNQE -
- *Speaker of the Executive Board LNQE-*
Institut für Anorganische Chemie
Leibniz Universität Hannover
Callinstraße 9
D-30167 Hannover
Phone: +49 511 762 3660
Fax: +49 511 762 3006
peter.behrens@acb.uni-hannover.de
www.acb.uni-hannover.de

Kernkompetenzen / *Core competencies:*

- Synthese und Präparation von Materialien und Nanomaterialien / *Synthesis of materials, and nanomaterials*
- Nanoporöse Materialien / *Nanoporous materials*
- Biomaterialien / *Biomaterials*
- Elektrische und optische Materialien / *Electrical and optical materials*
- Nanosensorik / *Nanosensorics*
- Modellierung von Materialien / *Modeling of materials*



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

Kernkompetenzen / *Core competencies:*

- Nanostrukturierte Funktionsmaterialien / *Nanostructured functional materials*
- Kolloidale Nanokristalle / *Colloidal nanocrystals*
- Physikalische und chemische Effekte auf der Nanometerskala / *Physical and chemical effects on the nanometer scale*

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

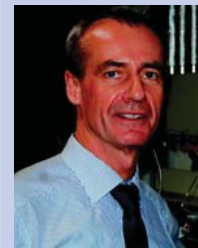
Institut für Festkörperphysik
Abteilung Solarenergie
Leibniz Universität Hannover
Appelstraße 2
D-30167 Hannover
Phone: +49 5151 999 100
Fax: +49 511 762 2904
rolf.brendel@isfh.de
www.fkp.uni-hannover.de/solar.html
www.isfh.de

Kernkompetenzen / *Core competencies:*

- Poröse Materialien / *Porous Materials*
- Adsorption / *Adsorption*
- Katalyse / *Catalysis*
- Massenseparation / *Mass Separation*
- Membranen / *Membranes*
- Perowskite / *Perovskites*
- Brennstoffzellen / *Fuel Cells*
- Foto-Solarzellen / *Photo-Solar Cells*

Prof. Dr. Jürgen Caro

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

Kernkompetenzen / *Core competencies:*

- Anwendung von Lasern in der Mikro- und Nanotechnologie für Photonik, Plasmonik und Biomedizin / *Applications of lasers in micro- and nanotechnology for photonics, plasmonics and biomedicine*
- Multiphotonen-Polymerisation und Entwicklung neuartiger photosensitiver, bioaktiver und biodegradierbarer funktioneller Materialien sowie Nanokomposite / *Multiphoton polymerization and development of novel photosensitive, bioactive and biodegradable functional materials as well as nano composites*
- Neue Lasertechnologien für die Herstellung von Implantaten, Tissue Engineering und regenerative Medizin / *Latest laser technologies for the production of implants, tissue engineering and regenerative medicine*

Prof. Dr. Boris Chichkov

Laser Zentrum Hannover e. V.
Nanotechnology Division
Hollerithallee 8
D-30419 Hannover
Phone: +49 511 2788 316
Fax: +49 511 2788 100
b.chichkov@lzh.de
www.lzh.de





Prof. Dr. Fei Ding

Institut für Festkörperphysik
Abteilung Atomare und molekulare Strukturen
Leibniz Universität Hannover
Appelstraße 2
D-30167 Hannover
Fax: +49 511 762 4877
f.ding@fkp.uni-hannover.de
www.fkp.uni-hannover.de/atmos.html

Kernkompetenzen / *Core competencies:*

- Dehnungsbezogene Physik in Nanostrukturen und nanophotonischen Geräten / *Strain related physics in nanostructures and nanophotonic devices*
- On-Chip-Integration von Quantenlichtquellen / *On-Chip integration of Quantum light sources*
- Frequenz verriegelte Quantenlichtquellen / *Frequency locked Quantum light sources*



Dr. Dirk Dorfs

Institut für Physikalische Chemie und Elektrochemie
Leibniz Universität Hannover
Callinstraße 3A
D-30167 Hannover
Phone: +49 511 762 14440
Fax: +49 511 762 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: +49 511 762 2231
Fax: +49 511 762 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: +49 531 391 9615
Fax: +49 531 391 9633
g.garnweitner@tu-bs.de
www.ipat.tu-bs.de

Kernkompetenzen / *Core competencies*:

Elastomerchemie mit den Schwerpunkten/*Elastomeric chemistry with the main focuses*:

- Charakterisierung von mehrphasigen Systemen (Morphologie) / *Characterization of multiphase systems (morphology)*
- Polymere Füllstoffe / *Polymeric fillers*
- Kautschuk-Füllstoff Wechselwirkung / *Rubber/ filler interaction*
- Vernetzung / *Crosslinking*
- Alterungsmechanismen / *Aging mechanisms*
- Modifizierung von Füllstoffen und Polymeren / *Modification of fillers and polymers*
- Nanomaterialien (synthetisch und bio-basierend) / *Nanomaterials (synthetic and bio-based)*
- „Leachables“ und „Extractables“ aus Polymerwerkstoffen / *Leachables and extractables out of polymer materials*
- Emissionen und Umweltexposition von Elastomeren / *Elastomer emissions and environmental exposure*
- Transportvorgänge von Gasen und Flüssigkeiten in Elastomeren / *Transport processes in polymers for gases and fluids in elastomers*

Prof. Dr. Ulrich Giese

Deutsches Institut für Kautschuktechnologie e. V.
Eupener Straße 33
D-30519 Hannover
Phone: +49 511 84201-10
Ulrich.Giese@DIKautschuk.de
www.dikautschuk.de

Kernkompetenzen / *Core competencies*:

- Quantenpunktsysteme / *Quantum Dot Systems*
- Elektronendynamik / *Electron Dynamics*
- Graphen / *Graphene*
- Quanten-Hall-Effekt und FQHE / *Quantum Hall Effect and FQHE*
- Nanobearbeitung / *Nanomachining*
- Nanodrähte und Cluster / *Nanowires and Clusters*

Prof. Dr. Rolf J. Haug

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





Prof. Dr. Andreas Kirschning
Institut für Organische Chemie
Leibniz Universität Hannover
Schneiderberg 1B
D-30167 Hannover
Phone: +49 511 762 4614
Fax: +49 511 762 3011
andreas.kirschning@oci.uni-hannover.de
www.akoci.uni-hannover.de/AK_Kirschning/

Kernkompetenzen / *Core competencies*:

- Enabling-Technologien in der organischen Synthese / *Enabling technologies in organic synthesis*
- Naturstoffchemie / *Natural product chemistry*
- Chemie als Werkzeug in regenerativen Therapien / *Chemistry as tool in Regenerative Therapies*



apl. Prof. Dr. Carsten Klempt
Institut für Quantenoptik
Leibniz Universität Hannover
Welfengarten 1
D-30167 Hannover
Phone: +49 511 762 2238
Fax: +49 511 762 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: +49 511 762 3493
Fax: +49 511 762 2904
oest@nano.uni-hannover.de
www.nano.uni-hannover.de/oest/

Kernkompetenzen / *Core competencies*:

- Spinelektronik in Halbleitern / *spinelectronics in semiconductors*
- Quanteneffekte in Nanostrukturen / *quantum effects in nanostructures*
- Zeit- und hochauflösende optische Spektroskopie / *time and spatially resolved optical spectroscopy*

Kernkompetenzen / *Core competencies:*

- Quantenlogik in Microfallen / *Quantum Logic in Microtraps*
- Quantenlogische Spektroskopie von (Anti-) Protonen / *Quantum Logic Spectroscopy of (Anti-)Protons*
- Oberflächenelektroden Fallen Fabrikation / *Surface-Electrode Trap Fabrication*

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

Kernkompetenzen / *Core competencies:*

- Erzeugung von ultrakalten Molekülen / *Assembly of Ultracold Molecules*
- Direkte Laserkühlung von Molekülen / *Direct Laser Cooling of Molecules*
- Molekülspektroskopie / *Molecular Spectroscopy*

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

Kernkompetenzen / *Core competencies:*

- Kristalline Oxide auf Silizium / *Crystal-line oxides on silicon*
- SiGe und Ge Epitaxie auf Si / *SiGe and Ge epitaxy on Si*
- Silizium Polytypismus / *Silicon polytypism*
- Nutzung der Halbleitertechnologie Know-Hows für hocheffiziente Solarzellen / *Use of semiconductor technology Know-how for highly efficient solar cells*

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





Prof. Dr. Herbert Pfnür
Institut für Festkörperphysik
Abteilung Atomare und molekulare Strukturen
Leibniz Universität Hannover
Appelstraße 2
D-30167 Hannover
Phone: +49 511 762 4819
Fax: +49 511 762 4877
pfnuer@fkp.uni-hannover.de
www.fkp.uni-hannover.de/atmos.html

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. Ernst Rasel
Institut für Quantenoptik
Leibniz Universität Hannover
Welfengarten 1
D-30167 Hannover
Phone: +49 511 762 19203
Fax: +49 511 762 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
D-30167 Hannover
Phone: +49 511 762 4541
Fax: +49 511 762 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*

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*

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:*

- 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: +49 511 762 2542
Fax: +49 511 762 4877
tegenkamp@fkp.uni-hannover.de
www.fkp.uni-hannover.de/atmos.html

Kernkompetenzen / *Core competencies:*

- Design von Integrierten Schaltkreisen mit Fokus auf Power-Management, Gate-Treiber, Energieeffizienz und Low-Power / *Design of integrated circuits with focus on power management, gate drivers, energy efficiency and low-power*

Prof. Dr.-Ing. Bernhard Wicht

Institut für Mikroelektronische Systeme
Fachgebiet für Mixed-Signal-Schaltungen
Appelstr. 4
D-30167 Hannover
Phone: +49 511 762 19690
Fax: +49 511 762 19694
bernhard.wicht@ims.uni-hannover.de
www.ims.uni-hannover.de





Dr.-Ing. Marc Christopher Wurz
- Vorstand LNQE -
- Executive Board LNQE-
Institut für Mikroproduktionstechnik
Leibniz Universität Hannover
An der Universität 2
D-30823 Garbsen
Phone: +49 511 762 7486
Fax: +49 511 762 2867
wurz@imt.uni-hannover.de
www.impt.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*



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: +49 511 762 4671
Fax: +49 511 762 3917
zimmermann@geml.uni-hannover.de
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 Nanoaktoren / *Micro- and nanoactuators*
- 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: +49 511 762 5103
Fax: +49 511 762 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
hofmann@mbe.uni-hannover.de
www.mbe.uni-hannover.de



Aktuell in 2017 **News in 2017**

17.01.2017



Prof. Dr.-Ing.
Stefan Zimmermann

Professor Zimmermann erhält Preis für exzellente Lehre

Auszeichnung für Mitglied des LNQE-Vorstandes

Auf dem diesjährigen Neujahrsempfang der Leibniz Universität Hannover am 13.01.2017 wurde von der Vizepräsidentin für Lehre und Studium, Professorin Dr. Elfriede Billmann-Mahecha, der Preisträger für den Preis für exzellente Lehre der Leibniz Universität Hannover bekannt gegeben. Es freut uns ganz besonders, dass das LNQE-Vorstandsmitglied Professor Dr.-Ing. Stefan Zimmermann vom Institut für Grundlagen der Elektrotechnik und Messtechnik die Auszeichnung erhalten hat.

Professor Zimmermann hält insbesondere sehr große Grundlagenvorlesungen in den ersten Semestern mit bis zu 700 Studierenden. Hier gelingt es ihm, sein Wissen mit hoher fachlicher Kompetenz bei lockerer Atmosphäre weiterzugeben.

Herzlichen Glückwunsch vom LNQE!

Professor Zimmermann Receives Prize for Excellent Teaching

Award for member of the LNQE executive board

At this year's New Year's Reception of the Leibniz Universität Hannover on 13.01.2017 the vice president for teaching and studies, Professor Dr. Elfriede Billmann-Mahecha, announced the award winner for the prize for excellent teaching at the Leibniz Universität Hannover. We are particularly pleased that the LNQE board member Professor Dr.-Ing. Stefan Zimmermann from the Institute for Electrical Engineering and Measurement Technology got the award.

Professor Zimmermann holds in particular very large basic lectures in the first semesters with up to 700 students. Here, he succeeds in passing his knowledge on with great professional competence in a relaxed atmosphere.

Congratulations from the LNQE!

27.01.2017

Eröffnungsfeier für Promoti- onsprogramm zur Nanosen- sorik

Land Niedersachsen fördert Dok- torandinnen und Doktoranden mit Stipendien

Die Leibniz Universität Hannover begrüßt zwölf neue Doktorandinnen und Doktoranden, die im niedersächsischen Promotionsprogramm „Hannover School for Nanotechnology: Interdisciplinary Approaches for Smallest Sensors“ (kurz: hsn-sensors) mit Georg-Christoph-Lichtenberg-Stipendien in Höhe von monatlich je 1.500 Euro gefördert werden. Die Hannover School for Nanotechnology läuft in Zusammenarbeit mit der Hochschule Hannover. Zur feierlichen Eröffnung sind Medienvertreterinnen und -vertreter herzlich eingeladen.

Opening Ceremony for Phd- Programme on Nanosensor Technology

Lower Saxony promotes doctoral students with scholarships

The Leibniz Universität Hannover welcomes twelve new doctoral students, who receive funding of € 1,500 per month with Georg Christoph Lichtenberg scholarships in the Hannover School of Nanotechnology: Interdisciplinary Approaches for Smallest Sensors (hsn-sensors). The Hannover School for Nanotechnology is running in cooperation with the Hannover University of Applied Sciences. At the inauguration, media representatives are cordially invited.

Wann? Mittwoch, 8. Februar 2017,
14 Uhr
Wo? Laboratorium für Nano- und
Quantenengineering, Schnei-
derberg 39, 30167 Hannover,
Foyer
Web? www.hsn.uni-hannover.de

Nach Grußworten von Professor Dr. Volker Epping, Präsident der Leibniz Universität Hannover, und Professor Dr. Josef von Helden, Präsident der Hochschule Hannover, werden der Inhalt des Programms hsn-sensors sowie die Stipendiatinnen und Stipendiaten vorgestellt. Professor Dr. Andreas Waag von der TU Braunschweig hält einen Festvortrag mit dem Titel „Sensing at the Nanoscale: from concepts to nanometrology“.

Die Doktorandinnen und Doktoranden der hsn-sensors befassen sich mit kleinsten Sensoren im Nanometerbereich. Diese Nanosensoren basieren häufig auf anderen Messprinzipien als herkömmliche Sensoren, was faszinierende Möglichkeiten für Forschung und Entwicklung eröffnet. Koordinator des interdisziplinären Programms aus Physik, Chemie und Ingenieurwesen ist Professor Dr. Rolf Haug, Vorstandsmitglied des Laboratoriums für Nano- und Quantenengineering.

Die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler forschen in interdisziplinär zusammengesetzten Arbeitsgruppen an einem übergreifenden Thema. Entsprechend der interdisziplinären Ausrichtung dieses Promotionsprogramms wird jede Doktorandin bzw. jeder Doktorand von zwei Dozenten unterschiedlicher Fachrichtungen betreut. Zwölf Promovierende werden mit einem Stipendium gefördert, weitere zwölf Doktorandinnen und Doktoranden kommen aus den beteiligten Arbeitsgruppen. Auf die Stipendien gab es 300 Bewerbungen. Die gesamte Fördersumme beträgt 800.000 Euro für den Zeitraum von Oktober 2016 bis September 2020.

When? Wednesday, 8th February
2017, 14 pm
Where? Laboratorium für Nano- und
Quantenengineering,
Schneiderberg 39, 30167
Hannover, Foyer, Germany
Web? www.hsn.uni-hannover.de

After greetings from Professor Dr. Volker Epping, President of the Leibniz Universität Hannover, and Professor Dr. Josef von Helden, President of the Hanover University of Applied Sciences, the content of the hsn-sensors program will be presented as well as the scholarship holders. Professor Dr. Andreas Waag from Braunschweig University of Technology holds the ceremonial lecture entitled “Sensing at the nanoscale: from concepts to nanometrology”.

The doctoral students of hsn-sensors are concerned with the smallest sensors in the nanometer range. These nanosensors are often based on different measuring principles than conventional sensors, which opens up fascinating possibilities for research and development. Coordinator of the interdisciplinary program in physics, chemistry and engineering is Professor Dr. Rolf Haug, Member of the Board of the Laboratory for Nano and Quantum Engineering.

The scientists are researching in interdisciplinary working groups on an overarching topic. In accordance with the interdisciplinary orientation of this doctoral program, each doctoral student is supervised by two lecturers of different disciplines. Twelve doctoral students are supported by a scholarship, another twelve doctoral students come from the working groups involved. There were 300 applications for the scholarships. The total funding is EUR 800,000 for the period from October 2016 to September 2020.

17.02.2017

ERC Starting Grant für Dr. Bigall



Dr. Bigall (Mitte) und ihre Arbeitsgruppe.
Dr. Bigall (centre) and her work-group.

Hohe EU-Förderung zur Erforschung von Nanomaterialien für LNQE-Mitglied

Dr. Nadja-Carola Bigall vom Institut für Physikalische Chemie und Elektrochemie an der Leibniz Universität Hannover hat einen der begehrten ERC Starting Grants eingeworben. Der Europäische Forschungsrat (ERC) fördert jährlich vielversprechende Nachwuchswissenschaftlerinnen und Nachwuchswissenschaftler am Beginn einer unabhängigen Karriere. Gefördert werden visionäre und exzellente Forschungsvorhaben mit bis zu jeweils 1,5 Mio. Euro. Das Gesamtvolumen der Starting Grants für 2017 beträgt 605 Mio. Euro. Es wurden 3081 Anträge eingereicht, die Förderquote beträgt typischerweise um die 10 %. Das LNQE-Mitglied Dr. Bigall leitet seit 2013 eine eigene Arbeitsgruppe mit Büro- und Laborflächen im LNQE-Forschungsbau.

Das vom ERC geförderte Projekt MAEROSTRUC widmet sich der gezielten Anordnung von Nanoteilchen (sogenannten Gelen), um so ultraleichte Materialien mit neuen physikochemischen Eigenschaften zu entwickeln. Ein so erzeugtes, beispielsweise leitfähiges Material könnte zukünftig möglicherweise in Batterien eingesetzt werden, ebenso wie in Touchscreens und Sensoren oder in der Photokatalyse.

ERC Starting Grant for Dr. Bigall

High EU funding for research on nanomaterials for LNQE members

Dr. Nadja-Carola Bigall from the Institute of Physical Chemistry and Electrochemistry at the Leibniz Universität Hannover has been granted one of the demanded ERC starting grants. The European Research Council (ERC) promotes every year promising young scientists at the beginning of an independent career. Funded are visionary and excellent research projects with up to EUR 1.5 million each. The total volume of starting grants for 2017 is EUR 605 million. 3081 applications have been submitted, the funding rate is typically around 10 %. The LNQE member Dr. Bigall leads a working group with office and laboratory space in the LNQE research building since 2013.

The MAEROSTRUC project, funded by the ERC, is devoted to the targeted arrangement of nanoparticles (so-called gels) in order to develop ultra-pure materials with new physicochemical properties. A thus produced, for example conductive material could possibly be used in batteries, as well as in touch screens and sensors or in photocatalysis.

24.03.2017

Sicherheitsaspekte der Nanotechnologie

CIT-Journal berichtet mit einem Fokusheft

Das Journal „Chemie Ingenieur Technik“ (CIT) des Wiley-VCH-Verlags berichtet in der neusten Ausgabe (3/2017) in einem Fokusheft über die Umwelt- und Sicherheitsaspekte der Nanotechnologie. Das CIT-Journal ist ein Fachorgan der DECHEMA, der Gesellschaft Deutscher Chemiker und der VDI-Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen. Mit dem Fokusheft wird ein

Safety Aspects of Nanotechnology

CIT-Journal reports with a focus issue

The journal „Chemie Ingenieur Technik“ (CIT) of the Wiley-VCH-Verlag reports in the latest edition (3/2017) about the environmental and safety aspects of nanotechnology. The CIT-Journal is a specialist body of DECHEMA, the Gesellschaft Deutscher Chemiker and the VDI-Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen. The focus issue provides a current overview of

aktueller Überblick der Stand der Nanotoxikologie-Forschung gegeben. Gastherausgeber dieser Ausgabe ist Professor Rolf Haug vom LNQE.

Die Idee zum Fokusheft entstand aufgrund des großen Anklangs des „Workshop on Nanosafety and Nanotoxicology (NanoSaTox)“ im Oktober 2015 in Hannover. Der Workshop war im Rahmen des LNQE-Promotionsprogramms „Hannover School for Nanotechnologie“ organisiert worden, um den Doktorandinnen und Doktoranden des Programms und auch interessierten externen Gästen einen differenzierten Überblick über die aktuelle Nanotoxikologie-Forschung zu geben.

Chemie Ingenieur Technik 2017, 89, No. 3, 203, DOI: 10.1002/cite.v89.3

Zwei neue Mitglieder

Professor Fei Ding (Festkörperphysik) und Professor Bernhard Wicht (Mikroelektronische Systeme) verstärken das LNQE

Das Laboratorium für Nano- und Quantenengineering begrüßt zwei neue Mitglieder:

Prof. Dr. Fei Ding ist seit September 2016 neuer Professor im Institut für Festkörperphysik. Seine wissenschaftlichen Interessen sind dehnungsbezogene Physik in Nanostrukturen und nanophotonischen Geräten, On-Chip-Integration von Quantenlichtquellen, und Frequenz verriegelte Quantenlichtquellen. Zeitgleich mit der neuen Professur wurde Professor Ding mit einem ERC Starting Grant zum Thema „Elementare Quanten-Punkt-Netzwerke, die durch On-Chip Nano-Optomechanische Systeme ermöglicht werden“ ausgezeichnet.

Prof. Dr.-Ing. Bernhard Wicht leitet seit April 2017 das Fachgebiet Mixed-Signal-Schaltungen im Institut für Mikroelektronische Systeme. Sein Forschungsinteresse umfasst das Design von Integrierten Schaltkreisen mit Fokus auf Power Management, Gate-Treiber, Energieeffizienz und Low-Power.

the state of nanotoxicology research. Guest editor of this issue is Professor Rolf Haug from the LNQE.

The idea for the focus issue was developed in October 2015 in Hanover due to the great appeal of the „Workshop on Nanosafety and Nanotoxicology (NanoSaTox)“. The workshop was organized as part of the LNQE „Hannover School for Nanotechnology“ doctoral program to give the doctoral students of the program and interested external guests a differentiated overview of current nanotoxicology research.

Chemie Ingenieur Technik 2017, 89, No. 3, 203, DOI: 10.1002/cite.v89.3

Two New Members

Professor Fei Ding (Solid State Physics) and Professor Bernhard Wicht (Microelectronic Systems) strengthen the LNQE

The Laboratory for Nano and Quantum Engineering welcomes two new members:

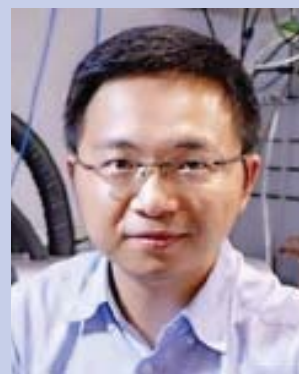
Prof. Dr. Fei Ding is a new professor at the Institute for Solid State Physics since September 2016. His scientific interests are strain related physics in nanostructures and nanophotonic devices, on-chip integration of quantum light sources, and frequency locked quantum light sources. At the same time as the new professorship, Professor Ding was awarded an ERC Starting Grant on „elementary quantum dot networks enabled by on-chip nano-optomechanical systems“.

Prof. Dr.-Ing. Bernhard Wicht is the Head of Mixed-Signal Circuits Group at the Institute of Microelectronic Systems since April 2017. His research interests include the design of integrated circuits with focus on power management, gate drivers, energy efficiency and low-power.



Titelbild CIT 3/2017
Cover CIT 3/2017

23.08.2017



Prof. Dr. Fei Ding



Prof. Dr.-Ing.
Bernhard Wicht

12.10.2017

Dr. Bigall wird Professorin



Prof. Dr. Nadja Bigall

LNQE-Mitglied auf die Professur für „Funktionale Nanostrukturen“ berufen

Zum 1. Oktober 2017 wurde Frau Dr. Nadja Bigall auf die W2-Professur „Funktionale Nanostrukturen“ am Institut für Physikalische Chemie und Elektrochemie der Leibniz Universität Hannover berufen.

Arbeitsschwerpunkt ihrer Arbeitsgruppe ist die Herstellung formkontrollierter Nanokristalle und deren Assemblierung zu Funktionsmaterialien mit maßgeschneiderten optischen, elektrischen, magnetischen und katalytischen Eigenschaften.

Herausragende Erfolge ihrer bisherigen wissenschaftlichen Karriere waren die Etablierung einer BMBF-Nachwuchsgruppe im NanMatFutur-Wettbewerb 2013 und das Einwerben eines ERC Starting Grants 2017.

Herzlichen Glückwunsch vom LNQE!

Dr. Bigall Becomes a Professor

LNQE-member appointed for the professorship of “Functional Nanostructures”

On 1 October 2017, Dr. Dr. Nadja Bigall has been appointed to the W2 professorship “Functional Nanostructures” at the Institute for Physical Chemistry and Electrochemistry at the Leibniz Universität Hannover.

The focus of her work group is the production of form-controlled nanocrystals and their assembly into functional materials with tailor-made optical, electrical, magnetic and catalytic properties.

Outstanding successes in her previous academic career has been the establishment of a BMBF junior research group in the NanMatFutur competition in 2013 and the acquisition of an ERC starting grant 2017.

Congratulations from the LNQE!

12.10.2017

Niedersachsen-Technikum 2017

Abiturientinnen informieren sich über Nanotechnologie im LNQE

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 Laborführung erhielten die Gäste Einblicke in aktuelle Nanotechnologie-Forschung an der Leibniz Universität Hannover. In drei Stationen wurde gezeigt:

- Herstellung kleinster Proben im Reinraum
- Synthese und Charakterisierung von Nanopartikeln
- Transmissionselektronen-Mikroskopie

Im Gespräch mit Unterstützung des Fachrates Nanotechnologie wurden die Gäste über den Bachelor- und Masterstudiengang Nanotechnologie aus erster Hand informiert.

Niedersachsen-Technikum 2017

Female high school graduates get informed on nanotechnology in the LNQE

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. Three stations were presented:

- production of the smallest samples in the clean room
- synthesis and characterization of nanoparticles
- Transmission electron microscopy

In the discussion with support of student representatives, the guests were informed about the Bachelor’s and Master’s degree course Nanotechnology.



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.

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.



Forscherteam der physikalischen Chemie beseitigt Kammerflimmern in nanoporöser Gastrennmembran

Energieverbrauch in der Kunststoffproduktion könnte erheblich gesenkt werden

Die Beschichtung im Saftkarton, das Armaturenbrett im Auto und der Beutel fürs Altpapier: Kunststoffe sind aus dem Alltagsleben nicht mehr wegzudenken. Allerdings sind sie vergleichsweise aufwändig herzustellen und der Energieverbrauch ist entsprechend hoch. Einem internationalen Forscherteam der Leibniz Universität Hannover, der Universität Augsburg und des Boreskov-Instituts Novosibirsk ist es erstmals gelungen, durch das Anlegen von elektrischen Feldern die Gastransporteigenschaften von Metallorganischen Netzwerkverbindungen zu verändern. Das Verfahren könnte die Herstellung von Kunststoffen wie beispielsweise Polyethylen oder Polypropylen erheblich vereinfachen und dadurch helfen, die Produktionskosten erheblich zu senken. Ihre Ergebnisse haben die Wissenschaftler jetzt im renommierten Journal Science in der Ausgabe vom 20. Oktober 2017 prominent publiziert: <https://doi.org/10.1126/science.aal2456>

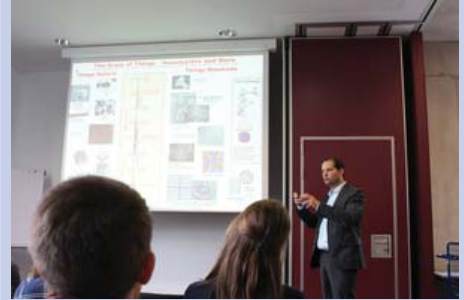
Die Herstellung von hochreinem Propylen für die Polymerisation zum Kunststoff Polypropylen (PP) ist sehr

Research Team of Physical Chemistry Eliminates Ventricular Fibrillation in a Nanoporous Gas Separation Membrane

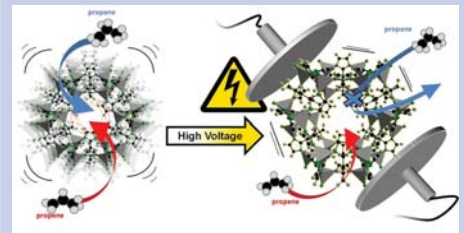
Energy consumption in plastic production could be significantly reduced

The coating in the juice box, the dashboard in the car and the pouch for waste paper: plastics are an integral part of everyday life. However, they are comparatively complex to manufacture and the energy consumption is correspondingly high. An international research team from the Leibniz Universität Hannover, the University of Augsburg and the Boreskov Institute Novosibirsk have succeeded in changing the gas transport properties of metal-organic network compounds by applying electric fields. The process could substantially simplify the production of plastics such as, for example, polyethylene or polypropylene, thereby helping to significantly reduce the production costs. The scientists have now published their results prominently in the renowned journal Science in the issue of 20th October 2017: <https://doi.org/10.1126/science.aal2456>

The production of high-purity propylene for polymerisation to plastic polypropylene (PP) is very energy-intensive. This is usually done by



25.10.2017



energieintensiv. Dies geschieht in der Regel durch das Verfahren der kryogenen (tiefkalten) Destillation, bei der hohe Temperaturspannen notwendig sind, da Temperaturen von bis zu -40 Grad Celsius erzeugt werden müssen. Ein neu entwickeltes Verfahren, das mit einer nanoporösen Gastrennmembran arbeitet, könnte diese aufwändige Destillation ablösen und bis zu 80 Prozent Energie einsparen. Dadurch sinkt außerdem der CO₂-Ausstoß. Die Gastrennmembranen bestehen aus Metallorganischen Netzwerkverbindungen (engl. Metal-Organic Frameworks, kurz MOFs), d.h. aus einer dichten Schicht nanoporöser Kristalle.

„MOFs haben durch ihre einstellbaren Porengrößen eigentlich optimale Eigenschaften, um Molekülgrößen zu sieben und z.B. auf Erdgasfeldern Propylen von Propan zu trennen. Es sind allerdings weiche Kristalle und bei Raumtemperatur ist immer eine Vielzahl von Gerüstschwingungen aktiv. Der MOF atmet sozusagen“, sagt Prof. Jürgen Caro, vom Institut für Physikalische Chemie und Elektrochemie der Leibniz Universität Hannover. „Dies führt dazu, dass diese Kristalle unter ihrem eigentlichen Potential als Molekularsieb liegen und auch um ein Vielfaches größere Moleküle durch die Porenöffnungen treten.“

Um dieses Problem zu lösen, haben die Forscher MOFs als dünne Membranschichten abgeschieden, durch die dann das zu trennende Gasgemisch geleitet wurde. Gleichzeitig wurde ein elektrisches Feld über eine Plattenkondensatoranordnung angelegt. Dazu musste die im Labor bestehende Technik neu designt und in der eigenen Werkstatt komplett aus Teflon gefertigt werden. „In unserem Messaufbau konnten wir dann den Effekt messen, den ein elektrisches Feld auf dieses Material hat“, sagte Alexander Knebel, HSN-Mitglied, und ergänzt: „Wir konnten die Gerüstschwingungen der Membran mit einem elektrischen Feld tatsächlich defibrillieren: Die Propylen/Propan-Trennung verbesserte sich um 33 Prozent durch das elektrische Feld.“ Der Größenunterschied zwischen Propan und Propylen liegt bei nur 0,03 Nanometern. Eine Trennung

the cryogenic distillation process, which requires high temperature ranges since temperatures of up to -40 degrees Celsius must be generated. A newly developed process using a nanoporous gas separation membrane could remove this complex distillation and save up to 80 percent energy. This also reduces CO₂ emissions. The gas separation membranes consist of metal-organic frameworks (MOFs), i.e. from a dense layer of nanoporous crystals.

„MOFs have, by their adjustable pore sizes, actually optimal properties for the purpose of sieving molecule sizes and e.g. on natural gas fields to separate propylene from propane. However, there are soft crystals and, at room temperature, a large number of framework vibrations are always active. The MOF breathes so to speak,“ says Prof. Jürgen Caro, from the Institute for Physical Chemistry and Electrochemistry at the Leibniz University of Hanover. „This leads to the fact that these crystals lie under their actual potential as a molecular sieve and also a large number of larger molecules pass through the pore openings.“

In order to solve this problem, the researchers deposited MOFs as thin membrane layers, through which the gas mixture to be separated was then passed. At the same time, an electric field was applied across a plate capacitor assembly. For this purpose, the existing laboratory technology had to be redesigned and made entirely of Teflon in its own workshop. „In our measurement setup, we were able to measure the effect that an electric field has on this material,“ said Alexander Knebel, HSN member, adding: „We were able to actually defibrillate the skeletal vibrations of the membrane with an electric field: the propylene / propane Separation improved by 33 percent due to the electric field. „The difference in size between propane and propylene is only 0.03 nanometers. Separation of these two molecules with the help of tailor-made membrane technology is an ecologically and economically highly interesting, demanding and from the industry strongly funded task.

dieser beiden Moleküle mit Hilfe von maßgeschneiderter Membrantechnologie ist eine ökologisch und ökonomisch hochinteressante, fordernde und von der Industrie stark geförderte Aufgabe.

An dem Erfolg hat ein internationales Team interdisziplinär zusammen gearbeitet. Für das Verständnis der Messeffekte war unter anderem die Zusammenarbeit mit dem Festkörperchemiker Prof. Dr. Dirk Volkmer in Augsburg, dem Physiker Prof. Dr. Alexander Stepanov in Novosibirsk zur magnetischen Kernresonanz und dem Physiker Prof. Dr. Paul Heitjans in Hannover zur dielektrischen Spektroskopie entscheidend. Finanziert werden die Arbeiten durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) im Rahmen des Schwerpunktprogramms COORNET: Coordination Networks: Building Blocks for Functional Systems.

- www.pci.uni-hannover.de
- www.physik.uni-augsburg.de/chemie
- www.en.catalysis.ru
- www.ids.uni-hannover.de/ids_home.html

Exzellenzstrategie des Bundes und der Länder

Starke Beteiligung der LNQE-Arbeitsgruppen in der Antragstellung von Exzellenzclustern

Im laufenden Wettbewerb um die Exzellenzcluster im Rahmen der Exzellenzstrategie des Bundes und der Länder sind 88 Projekte zur Vollantragstellung zugelassen worden – Zwei davon unter Federführung der Leibniz Universität Hannover und zwei weitere mitbeantragte Projekte. Bei allen vier Forschungsvorhaben sind Mitglieder des LNQE als federführende Wissenschaftler und Wissenschaftlerinnen vertreten:

QuantumFrontiers

Licht und Materie an der Quantengrenze: Die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler des Forschungsverbundes befassen sich mit neuen Messtechnologien auf Nanoebene. Physikalische Grundeinheiten

An international team has worked together interdisciplinarily on the success. For the understanding of the effects, the collaboration with the solid-state chemist Prof. Dr. Dirk Volkmer in Augsburg, the physicist Prof. Dr. Alexander Stepanov in Novosibirsk on nuclear magnetic resonance and the physicist Prof. Dr. Paul Heitjans in Hannover to dielectric spectroscopy is critical. The work is financed by the Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) as part of the COORNET focus program: Coordination Networks: Building Blocks for Functional Systems.

- www.pci.uni-hannover.de
- www.physik.uni-augsburg.de/chemie
- www.en.catalysis.ru
- www.ids.uni-hannover.de/ids_home.html

Excellence Strategy of the German Federal and State Governments

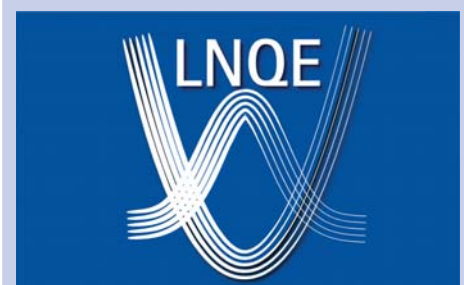
Strong involvement of LNQE research groups in the application for clusters of excellence

In the current competition for the excellence clusters within the framework of the excellence strategy of the German federal and state governments, 88 projects have been approved for full application - two of them under the lead management of the Leibniz Universität Hannover and two other applications submitted. For all four research projects, members of the LNQE are represented as leading scientists:

QuantumFrontiers

Light and matter at the quantum frontier: The scientists of the research network are working on new measuring technologies at the nano-level. Basic physical units such as mass,

17.11.2017



wie Masse, Länge und Zeit sollen in diesem äußerst kleinen Maßstab präziser werden. Dabei werden Effekte der Quantenmechanik gezielt genutzt, um Messgenauigkeiten zu verbessern.

Beteiligt vom LNQE:

- Prof. Dr. Boris Chichkov, Institut für Quantenoptik und Laserzentrum Hannover e. V.
- Prof. Dr. Wolfgang Ertmer, Institut für Quantenoptik und Laserzentrum Hannover e. V.
- Prof. Dr. Rolf Haug, Institut für Festkörperphysik
- Apl. Prof. Dr. Carsten Klempt, Institut für Quantenoptik
- Prof. Dr. Christian Ospelkaus, Institut für Quantenoptik
- Prof. Dr. Ernst Rasel, Institut für Quantenoptik

Phoenix-D

Optische Präzisionsgeräte schnell und kostengünstig aus additiver Fertigung wie 3D-Druck sind das Ziel. Ein Interdisziplinäres Forscherteam arbeitet gemeinsam an der Simulation, Fabrikation und Anwendung optischer Systeme. Bislang werden optische Linsen aus Glas und das umgebende Gehäuse in mehreren Arbeitsschritten - oftmals in Handarbeit - hergestellt. Die Fachleute der unterschiedlichen Disziplinen arbeiten in dem Forschungsverbund an einem digitalisierten Fertigungssystem, das individualisierte Produkte herstellen kann.

Beteiligt vom LNQE:

- Prof. Dr. Peter Behrens, Institut für Anorganische Chemie
- Prof. Dr. Nadja Bigall, Institut für Physikalische Chemie und Elektrochemie
- Prof. Dr. Boris Chichkov, Institut für Quantenoptik und Laserzentrum Hannover e. V.
- Prof. Dr. Detlev Ristau, Institut für Quantenoptik und Laserzentrum Hannover e. V.

length, and time should become more precise on this extremely small scale. The effects of quantum mechanics are used specifically to improve measurement accuracy.

Participants from LNQE:

- *Prof. Dr. Boris Chichkov, Institute of Quantum Optics and Laserzentrum Hannover e. V.*
- *Prof. Dr. Wolfgang Ertmer, Institute of Quantum Optics and Laserzentrum Hannover e. V.*
- *Prof. Dr. Rolf Haug, Institute for Solid State Physics*
- *Apl. Prof. Dr. Carsten Klempt, Institute of Quantum Optics*
- *Prof. Dr. Christian Ospelkaus, Institute of Quantum Optics*
- *Prof. Dr. Ernst Rasel, Institute of Quantum Optics*

Phoenix-D

Precision optical equipment quickly and cost-effectively from additive manufacturing such as 3D printing are the goal. An interdisciplinary team of researchers works together on the simulation, fabrication and application of optical systems. So far, optical lenses made of glass and the surrounding housing fabricated in several steps - often by hand. The specialists of the different disciplines work in the research network on a digitized manufacturing system that can produce individualized products.

Participants from LNQE:

- *Prof. Dr. Peter Behrens, Institute of Inorganic Chemistry*
- *Prof. Dr. Nadja Bigall, Institute of Physical Chemistry and Electrochemistry*
- *Prof. Dr. Boris Chichkov, Institute of Quantum Optics and Laserzentrum Hannover e. V.*
- *Prof. Dr. Detlev Ristau, Institute of Quantum Optics and Laserzentrum Hannover e. V.*

REBIRTH4S

Im Rahmen des Neuantrages für den Forschungsverbund für regenerative Wissenschaften, Medizin und Technologie REBIRTH4S wollen die MHH-Forscher gemeinsam mit der Leibniz Universität Hannover ein breites Spektrum an therapeutischen Konzepten und Plattformtechnologien anwenden, um die Entstehung und Entwicklung von Volkskrankheiten von Blut, Leber, Lunge und Herz zu verstehen.

Beteiligt vom LNQE:

- Prof. Dr. Boris Chichkov, Institut für Quantenoptik und Laserzentrum Hannover e. V.
- Prof. Dr. Peter Behrens, Institut für Anorganische Chemie
- Prof. Dr. Wolfgang Ertmer, Institut für Quantenoptik und Laserzentrum Hannover e. V.
- Prof. Dr. Andreas Kirschning, Institut für Organische Chemie

Hearing4all

Die Oldenburger haben basierend auf den Ergebnissen des bisherigen Exzellenzclusters den Antrag gemeinsam mit Hörforschern aus Hannover entwickelt. Geforscht wird an der individuellen Behandlung von Hörstörungen. Künftig wollen die Hörforscher einerseits die Entwicklungskette von der Grundlagenforschung zur Hörtechnologie und andererseits den Schweregrad der Schwerhörigkeit abbilden.

Beteiligt vom LNQE:

- Prof. Dr. Peter Behrens, Institut für Anorganische Chemie
- Prof. Dr. Wolfgang Ertmer, Institut für Quantenoptik und Laserzentrum Hannover e. V.

REBIRTH4S

Within the framework of the new application for the research association for regenerative sciences, medicine and technology REBIRTH4S, the MHH researchers together with the Leibniz Universität Hannover intend to apply a broad spectrum of therapeutic concepts and platform technologies to investigate the origin and development of common diseases of blood, liver, lung and heart to understand.

Participants from LNQE:

- *Prof. Dr. Boris Chichkov, Institute of Quantum Optics and Laserzentrum Hannover e. V.*
- *Prof. Dr. Peter Behrens, Institute of Inorganic Chemistry*
- *Prof. Dr. Wolfgang Ertmer, Institute of Quantum Optics and Laserzentrum Hannover e. V.*
- *Prof. Dr. Andreas Kirschning, Institute of Organic Chemistry*

Hearing4all

Based on the results of the former cluster of excellence, the Oldenburgers have developed the proposal together with hearing researchers from Hannover. Research is being done on the individual treatment of hearing disorders. In the future, the hearing researchers want to map the development chain from basic research to hearing technology on the one hand and the degree of severity of the deafness on the other hand.

Participants from LNQE:

- *Prof. Dr. Peter Behrens, Institute of Inorganic Chemistry*
- *Prof. Dr. Wolfgang Ertmer, Institute of Quantum Optics and Laserzentrum Hannover e. V.*

06.12.2017



Prof. Dr. Ulrich Giese

Neues Mitglied aus der Kautschuktechnologie

Professor Giese unterstützt das LNQE

Prof. Dr. Ulrich Giese ist Vorsitzender des Vorstandes des Deutschen Instituts für Kautschukforschung e. V. und leitet dort die Abteilung „Elastomerchemie“. Darüber hinaus ist er Professor für „Angewandte Polymerchemie“ am Institut für Anorganische Chemie der Leibniz Universität Hannover.

Sein Forschungsschwerpunkt ist Elastomerchemie mit den Schwerpunkten:

- Charakterisierung von mehrphasigen Systemen (Morphologie)
- Polymere Füllstoffe
- Kautschuk-Füllstoff Wechselwirkung
- Vernetzung
- Alterungsmechanismen
- Modifizierung von Füllstoffen und Polymeren
- Nanomaterialien (synthetisch und biobasierend)
- „Leachables“ und „Extractables“ aus Polymerwerkstoffen
- Emissionen und Umweltexposition von Elastomeren
- Transportvorgänge von Gasen und Flüssigkeiten in Elastomeren

Herzlich Willkommen im LNQE!

New Member from the Rubber Technology

Professor Giese supports the LNQE

Prof. Dr. Ulrich Giese is Managing Director of Deutsches Institut für Kautschuktechnologie, Hannover (Germany), where he heads the department „Elastomer Chemistry“. He is also a professor in „Applied Polymer Chemistry“ at the Institute of Inorganic Chemistry at Leibniz Universität Hannover.

His research interest is elastomeric chemistry with the main focuses:

- *Characterization of multiphase systems (morphology)*
- *Polymeric fillers*
- *Rubber/ filler interaction*
- *Crosslinking*
- *Aging mechanisms*
- *Modification of fillers and polymers*
- *Nanomaterials (synthetic and bio-based)*
- *Leachables and extractables out of polymer materials*
- *Elastomer emissions and environmental exposure*
- *Transport processes in polymers for gases and fluids in elastomers*

Welcome to the LNQE!

Aktivitäten in 2017

Activities in 2017

[Opening Ceremony Lower Saxony PhD-programme hsn-sensors](#) 08.02.2017
Feierliche Eröffnungsveranstaltung

[hsn-sensors Status Meeting 1](#) 08.02.2017
PhD-program „Hannover School of Nanotechnology“

[LNQE-Mitgliederversammlung](#) 13.06.2017
Jährliche Mitgliederversammlung des LNQE

[hsn-sensors Status Meeting 2](#) 15.06.2017
PhD-program „Hannover School of Nanotechnology“

[NanoDay2017](#) 28.09.2017
Vortragsveranstaltung mit acht Vorträgen und einer Postersitzung

[Niedersachsen-Technikum Nanotechnologie](#) 09.10.2017
Informationsveranstaltung und Führung

[Herbstuniversität Nanotechnologie](#) 13.10.2017
Informationsveranstaltung und Führung

[Begrüßungsveranstaltung Erstsemester Nanotechnologie](#) 16.10.2017
Feierliche Eröffnungsveranstaltung

NanoDay 2017

NanoDay 2017

Der dreizehnte NanoDay des LNQE in Hannover

Am Donnerstag, den 28. September 2017 fand der jährliche NanoDay des Laboratoriums für Nano- und Quantenengineering in Hannover statt. In acht Vorträgen und einer Poster-sitzung mit insgesamt 48 Postern wurden die neusten Forschungsergebnisse aus den interdisziplinären Arbeitsgruppen auf dem Gebiet Nanotechnologie präsentiert. Die durch die Leibniz Universitätsgesellschaft e. V. geförderten Posterpreise gingen dieses Jahr an:

Nanocellulose as reinforcing filler in rubber composites

Irina Weilert, Ulrich Giese

Deutsches Institut für Kautschuktechnologie e. V., Hannover, Germany

Atom chip development for compact and transportable quantum sensors

Hendrik Heine¹, Alexandros Papakonstantinou¹, Melanie Le Gonidec¹, Alexander Kassner², Mathias Rechel², Marc C. Wurz², Stephan T. Seidel¹, Waldemar Herr¹, Wolfgang Ertmer¹, Ernst M. Rasel¹

¹ Institut für Quantenoptik, Leibniz Universität Hannover

² Institut für Mikroproduktionstechnik, Leibniz Universität Hannover

Graphene-like conductive 2D metal-organic framework as nanosensor

Bastian Hoppe¹, Karen Hindricks¹, Dawid Peter Warwas¹, Adrian Gehl², Christopher Belke³, Stefan Zimmermann², Rolf Haug³, Peter Behrens¹

¹ Institut für Anorganische Chemie, Leibniz Universität Hannover

² Institut für Grundlagen der Elektrotechnik und Messtechnik, Leibniz Universität Hannover

³ Institut für Festkörperphysik, Leibniz Universität Hannover

Herzlichen Glückwunsch und vielen Dank an alle Vortragenden und Teilnehmer des NanoDay 2017!

The thirteenth NanoDay of LNQE in Hannover

On Thursday 28th September 2017 the annual NanoDay of the Laboratory of Nano and Quantum Engineering took place in Hannover/Germany. In eight lectures and a poster session with 48 posters in total the latest research results from the interdisciplinary working groups in the field of nanotechnology were presented. The Poster prizes funded by Leibniz Universitätsgesellschaft e. V. were awarded this year to:

Nanocellulose as reinforcing filler in rubber composites

Irina Weilert, *Ulrich Giese*

Deutsches Institut für Kautschuktechnologie e. V., Hannover, Germany

Atom chip development for compact and transportable quantum sensors

*Hendrik Heine*¹, *Alexandros Papakonstantinou*¹, *Melanie Le Gonidec*¹, *Alexander Kassner*², *Mathias Rechel*², *Marc C. Wurz*², *Stephan T. Seidel*¹, *Waldemar Herr*¹, *Wolfgang Ertmer*¹, *Ernst M. Rasel*¹

¹ Institut für Quantenoptik, Leibniz Universität Hannover

² Institut für Mikroproduktionstechnik, Leibniz Universität Hannover

Graphene-like conductive 2D metal-organic framework as nanosensor

*Bastian Hoppe*¹, *Karen Hindricks*¹, *Dawid Peter Warwas*¹, *Adrian Gehl*², *Christopher Belke*³, *Stefan Zimmermann*², *Rolf Haug*³, *Peter Behrens*¹

¹ Institut für Anorganische Chemie, Leibniz Universität Hannover

² Institut für Grundlagen der Elektrotechnik und Messtechnik, Leibniz Universität Hannover

³ Institut für Festkörperphysik, Leibniz Universität Hannover

Congratulations and thank you to all lecturers and participants of the NanoDay 2017!

Vorträge des NanoDay 2017 / Talks of the NanoDay 2017:*Self-assembling Formation of Twisted Bilayer Graphene***Johannes Rode**

Institute for Solid State Physics, Group Haug

*Deposition and Characterization of ALD Al₂O₃ and HfO₂***Liu Hao**

Laser Zentrum Hannover e. V., Laser Components Department, Group Ristau

*Carbon-MOF composites: A way to electronic applications of metal-organic frameworks***Hendrik Schulze**

Institute of Inorganic Chemistry, Group Behrens

*Ultracold Molecules***Torben Schulze**

Institute of Quantum Optics, Group S. Ospelkaus

*Ultrashort Pulse Laser Structuring - a new approach to designing electrodes?***Karsten Lange**

Institute of Physical Chemistry and Electrochemistry, Group Caro

*A simulative study on nucleation, growth and aggregation of metal oxide nanoparticles based on experimental insights of the nonaqueous sol-gel method***Pierre Stolzenburg**

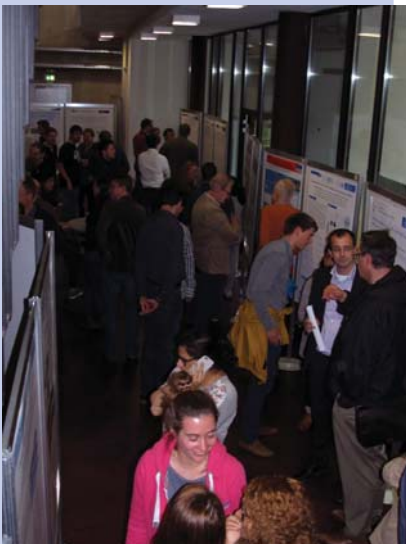
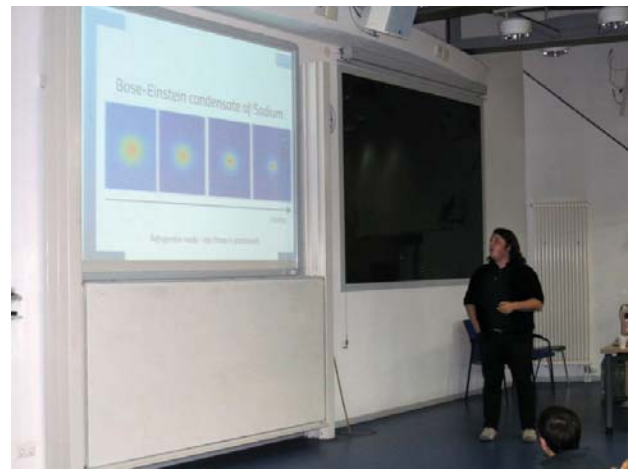
Institute for Particle Technology (TU Braunschweig), Group Garnweitner

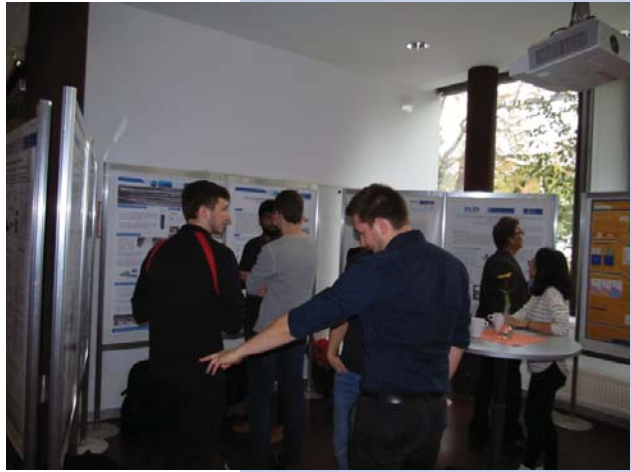
*Improvement of the SRH Bulk Lifetime upon Formation of n-Type POLO Junctions for 25% Efficient Si Solar Cells***Jan Krügener**

Institute of Electronic Materials and Devices, Group Osten

*Spin and reoccupation dynamics in single quantum dots: Noise beyond the fluctuation-dissipation theorem***Jens Hübner**

Institute for Solid State Physics, Group Oestreich

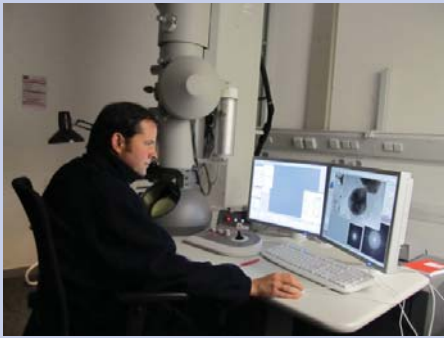




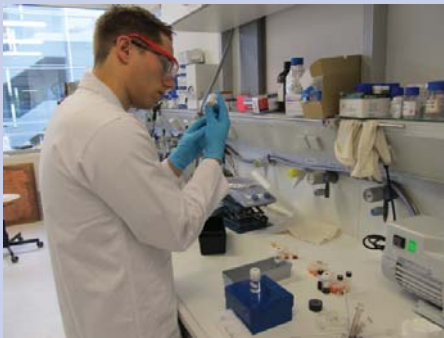
NanoDay 2017



Forschungsbau *Research Building*



Zur Verwirklichung seiner Ziele betreibt das LNQE ein eigenes Forschungsgebäude in Hannover. Die Labore (435 m²), der Forschungsreineraum (409 m²) und die Büroräume (509 m²) für ca. 50 Personen werden für interdisziplinäre Projekte, insbesondere aus erfolgreich eingeworbenen, größeren Drittmittelprojekten der Mitglieder genutzt.



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.



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

To achieve its objectives LNQE operates its own research building in Hanover. The laboratories (435 m²), research clean room (409 m²) and offices (509 m²) for about 50 persons are used for interdisciplinary projects, particularly from successfully acquired third-party funded large projects of the members.

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.

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 %

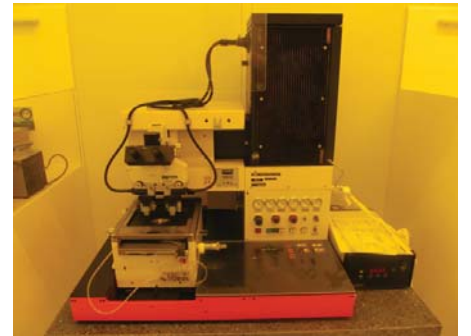
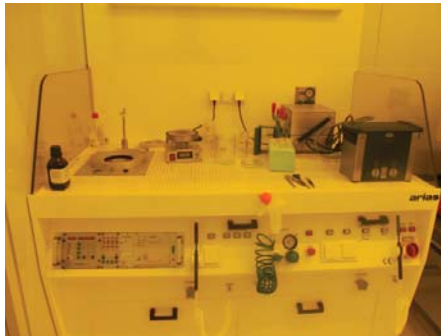
- UV Kontakt- und Proximity-Belichter für runde Wafer (Silizium und Germanium) bis 100 mm Durchmesser. Maskengröße 150*150 mm² quadratisch, minimale Linienbreite 900 nm (SÜSS MA 150)
- UV Handbelichter für Bruchstücke und kleine Wafer
- Lackschleuder mit Heizplatte für runde Wafer bis 200 mm Durchmesser. 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 O₂-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 mm² 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, O₂, N₂ oder N₂H₂. (AST SHS 2000 und Eigenbau)



Polyimid-Ofen

Bis 100 mm Durchmesser, Tempern unter Ar, N₂ oder im Feinvakuum, bis 950°C, rezeptgesteuert.



Reaktives Ionenätzen (RIE)

Reaktives Ionenätzen für runde Wafer bis 100 mm Durchmesser, ätzen unter Ar, O₂, SF₆ und CHF₃ (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 Institut für Festkörperphysik, Abteilung Atomare und Molekulare Strukturen

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°



Ionendünnung zur TEM-Probenpräparation

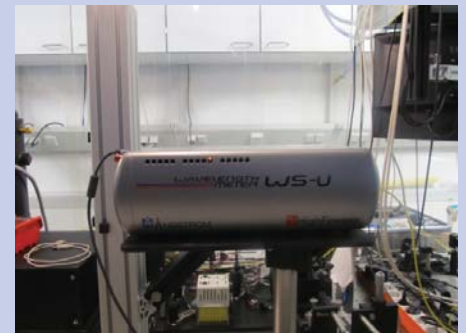
Präzisions-Ionen-Polier-System PIPS von Fa. Gatan für kleine Beschusswinkel variabel zwischen 0° und ±10° zur einseitigen und doppelseitigen Ionenstrahldünnung mit:

- 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



Erstsemesterbegrüßung der Nanotechnologen.
Welcome of the first semester nanotechnology students.

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.

Bachelorstudiengang

Bachelor's degree

Struktur des Studienganges

Die Regelstudienzeit des Bachelorstudiengangs Nanotechnologie beträgt sechs Semester. Die Ausbildung setzt sich zum einem 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.

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.

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 particulaly.

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-deph knowledge from different major fields od 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.

Grundlagenkurse / <i>Basic Courses</i>	104 LP/CP
Vorlesungen und Labore des Vertiefungsstudiums <i>Lectures and Lab Courses of the Deepening Study</i>	40 LP/CP
Schlüsselkompetenzen / <i>Key Competencies</i>	6 LP/CP
Fachpraktikum (12 Wochen) / <i>Internship (12 weeks)</i>	15 LP/CP
Bachelorarbeit (300 Stunden) / <i>Bachelor Thesis (300 hours)</i>	15 LP/CP
Summe / Sum:	180 LP/CP

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.).

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.).

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

Website zum Studiengang:
www.lnqe.uni-hannover.de/study_nano.html
Website of the study course:
www.lnqe.uni-hannover.de/study_nano.html

Kompetenzfeld: Einführung in die Nanotechnologie (7 LP) <i>Area of Expertise: Introduction to Nanotechnology (7 CP)</i>
Einführung in die Nanotechnologie / <i>Introduction to Nanotechnology</i>
Seminar Nanotechnologie / <i>Seminar 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 (18 LP) <i>Area of Expertise: Electrical Engineering and Computer Science (18 CP)</i>
Grundlagen der Elektrotechnik I / <i>Fundamentals of Electrical Engineering I</i>
Grundlagen der Elektrotechnik II / <i>Fundamentals of Electrical Engineering II</i>
Grundlagenlabor Elektrotechnik / <i>Basic Lab Course Electrical Engineering</i>
Kompetenzfeld: Maschinenbau (15 LP) <i>Area of Expertise: Mechanical Engineering (15 CP)</i>
Mikro- und Nanotechnologie / <i>Micro and Nano Technology</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 (22 LP) <i>Area of Expertise: Mathematics (22 CP)</i>
Mathematik für Ingenieure I / <i>Mathematics for Engineers I</i>
Mathematik für Ingenieure II / <i>Mathematics for Engineers II</i>
Numerische Mathematik / <i>Numerical Mathematics</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 Aufgabengebieten 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 internship regulations.

Kompetenzfeld: Chemie (20 LP) <i>Area of Expertise: Chemistry (20 CP)</i>
Instrumentelle Methoden I / <i>Instrumental Methods I</i>
Anorganische Chemie I / <i>Inorganic Chemistry I</i>
Anorganische Chemie II / <i>Inorganic Chemistry II</i>
Technische Chemie I / <i>Technical Chemistry I</i>
Kompetenzfeld: Elektrotechnik und Informatik (20 LP) <i>Area of Expertise: Electrical Engineering and Computer Science (20 CP)</i>
Regelungstechnik I + Informationstechnisches Praktikum / <i>Automatic Control Technique I + Practical Course on Information Technology</i>
Grundlagen der Halbleiterbauelemente + Halbleiterschaltungstechnik / <i>Basics of Semiconductor Devices + Semiconductor Circuit Technology</i>
Sensorik und Nanosensoren / <i>Sensor Technology and Nanosensors</i>
Kompetenzfeld: Maschinenbau (20 LP) <i>Area of Expertise: Mechanical Engineering (20 CP)</i>
Regelungstechnik I / <i>Automatic Control Technique I</i>
Mikro- und Nanosysteme / <i>Micro and Nano Systems</i>
Werkstoffkunde I + II + Praktikum / <i>Material Science I + II + Practical Course</i>
Kompetenzfeld: Physik (20 LP) <i>Area of Expertise: Physics (20 CP)</i>
Einführung in die Festkörperphysik / <i>Introduction to Solid State Physics</i>
Elektronik + Praktikum Elektronik / <i>Electronics + Practical Course on Electronics</i>
Quantenmechanik für Nanotechnologen / <i>Quantum Mechanics for Nanotechnologists</i>
Schlüsselkompetenzen (6 LP) <i>Key Competences (6 CP)</i>
Wählbare Kurse zu Schlüsselkompetenzen / <i>Selectable Courses in Key Competences</i>
Kurse im Vertiefungsstudium / <i>Courses of the Deepening Study</i>

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“ / <i>Mandatory Area of Expertise "Methods of Nanotechnology"</i>	12 LP/CP
3 Wahlkompetenzfelder / <i>3 Selectable Areas of Expertise</i>	38-45 LP/CP
Wahlbereich / <i>Courses of Choice</i>	15-22 LP/CP
3 Labore 360 Stunden / <i>3 Lab Courses 360 hours</i>	12 LP/CP
Studium Generale / <i>General Studies</i>	6 LP/CP
Masterarbeit 6 Monate / <i>Master Thesis 6 month</i>	30 LP/CP
Summe / <i>Sum:</i>	120 LP/CP

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

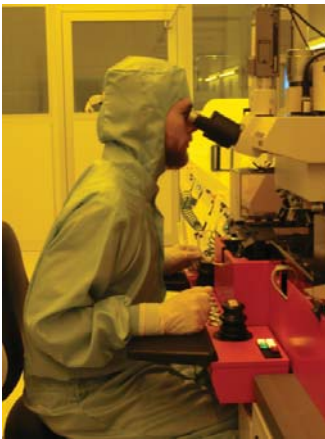
As part of the study course, students must complete three different lab courses. A semiconductor technology lab course, a solid-state physics lab course and a microtechnology lab course are provided.

General Studies

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

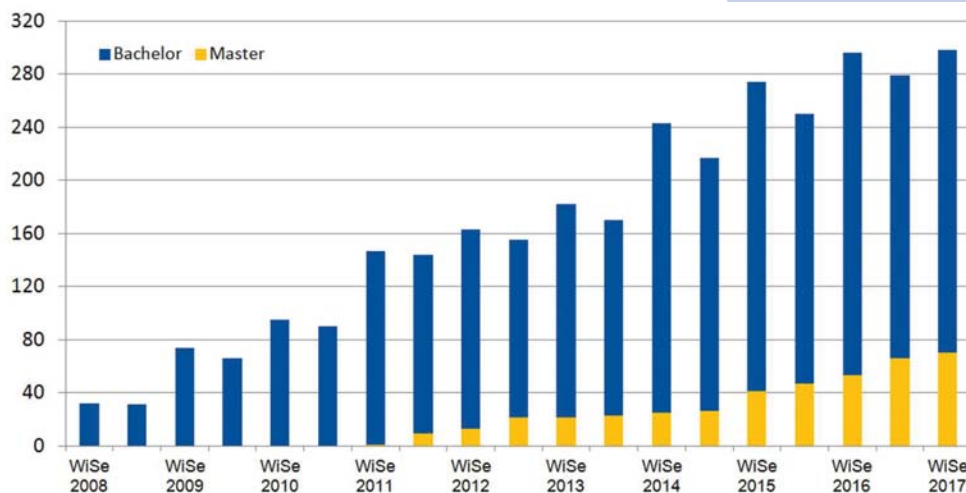
Master Thesis

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.

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.

Masterzeit	Promotion					
4. Semester	1	2	3	4	5	6
Master's thesis 6 month. The contents of the thesis can be used as preparation for the dissertation.	Promotion agreement with work plan and timetable	Lecture: Sensor Technology and Nanosensors 2 hours	Lecture: Quantum Devices 2 hours	Lecture: Nanotechnology 2 hours	Focus on publishing	Writing of the PhD dissertation and disputation
		Professionell Skills (2 x 2day workshops per semester)				
Mentoring by the future supervisor of the PhD thesis	Status meeting once per semester					
	Ph.D. students seminar 1 hours 14-day					
	LNQE-Colloquium + anual workshop „Nanoday“					
	Scientific work at the doctorate					
	Funding with a scholarship for 3 years					
	Funding with a scholarship in fast-track for 3 years					

Corriculum mit der Semesterübersicht des Promotionsprogramms hsn.
Curriculum with the semester overview of the doctoral program hsn.

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.

Sektion 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.

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. Wie bereits beim Vorgänger hsn-energy sind im Programm zusätzlichen Doktorandinnen und Doktoranden aus den beteiligten Arbeitsgruppen aufgenommen.

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.

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. As with the predecessor hsn-energy, the program has include additional doctoral students from the participating research groups.



Bei halbjährlichen Statustreffen stellen die Doktorandinnen und Doktoranden den Fortschritt ihrer wissenschaftlichen Arbeiten vor.

In semi-annual status meetings the doctoral students present the progress of their scientific work.

PhD-Projects of hsn-sensors



Annas Bin Ali

IGraphene-based sensors: towards applications with carbon nanofibers

Supervisor: R. Sindelar, R. Renz, C. Tegenkamp

Researcher: A. B. Ali

Graphene's unique properties, i.e. the extraordinary carrier mobility and capacitance, high electron transfer rate, exceptionally large surface-to-volume ratio in addition to its mechanical robustness and flexibility, makes it an attractive candidate for future sensor applications. The successful implementation of a graphene-based sensor technology requires a host material, which is low-priced in manufacture and sustainable fabricated from an almost inexhaustible source. Carbon nanofibers (CNFs), fabricated by electrospinning and subsequent processing, contain graphene as building-blocks and fulfill all of these requirements as recently demonstrated by us. This proposal is part of a joint project between solid state physics, inorganic chemistry and mechanical engineering.

This project addresses the reliable fabrication of mechanically robust, highly conductive graphene-like templates realized by carbon nanofibers and elucidates the potential for sensor applications. In detail, the process window for the fiber fabrication, i.e. temperature for pyrolysis, electrospinning parameters, solvents, etc., will be systematically explored, also in respect of technological and economic aspects. Moreover, the CNFs will be functionalized by means of surface chemistry and comprehensively characterized by UV-VIS, IR, DMS, Raman as well as electric transport measurements (from the nm to mm scale bridging 6 orders of magnitude) in order to demonstrate the reliable transfer of laboratory-scale recipes for prospective applications for gas-sensors. The basic process is patent pending and the group is open for more and more detailed patents. Further on this sub-project offers a lot of boundaries to industry, up-scaling and even economic aspects.

This project is closely entangled with the projects of Prof. Renz and Prof. Tegenkamp. The functionalization of our CNFs with various adsorbates and relevant molecules is intended by the groups from the physical and chemical departments by molecular beam epitaxy of various elements (Au, Pb) and further wet-chemical functionalization with relevant molecules, e.g. biotin. Thereby, different bonding schemes (dipole, covalent, dispersive) are implemented and the sensing properties are analyzed in our lab and together with the colleagues.

Mercury vapor sensor

Supervisor: S. Zimmermann

Researcher: M. Allers



Maria Allers

The aim of this project is to develop a miniaturized mercury sensor to monitor the mercury concentration in air. Mercury forms amalgam in connection with gold. This effect can be used to determine the presence and concentration of mercury, since the formation of amalgam influences various physical parameters.

Nanoscale magnetic field sensor beyond the Standard Quantum Limit

Supervisor: C. Klempt, W. Ertmer

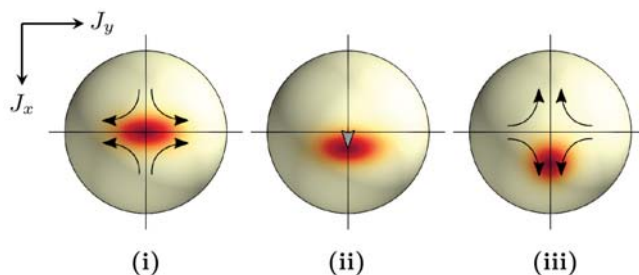
Researcher: F. Anders

Atomic sensors allow for the precise measurement of many relevant quantities, including frequency (time), acceleration, rotation, and magnetic fields. For such measurements, the atoms are usually prepared in a superposition of two different states, in our case spin states. The quantity of interest, such as the magnetic field strength, is mapped onto a population imbalance by an interferometric protocol.

For conventional interferometric protocols and classical atomic states, the precision of such a measurement is fundamentally limited by the Standard Quantum Limit (SQL). Employing entangled atoms and novel measurement protocols, the SQL can be surpassed, allowing for entanglement-enhanced precision ultimately reaching the Heisenberg Limit in the ideal case [1, 2]. The actual enhancement due to the entanglement is however restricted by technical noise, most crucially by the detection noise (that is the ability to count the final number of atoms in the two spin states). Within this project, we already developed a novel interferometric protocol that mitigates the influence of imperfections in the detection [3]. We will also implement a better detection apparatus to finally count the atoms with single-particle resolution, allowing us to detect a large variety of entangled states.

In addition to great precision, the application as a magnetic sensor calls for a fine spatial resolution. Starting with an optically trapped atom cloud with a spread of a few micrometers, the resolution can be reduced by employing different spatially distributed states [4] or novel trap shapes.

The ambition of this project is to demonstrate the resolution of magnetic field structures below a micrometer, pushing towards the nanometer scale, measured with an outstanding precision beyond the SQL.



Fabian Anders

Schematic visualization of the developed detection-noise robust interferometric scheme on the generalized Bloch sphere. (i) An entangled state is prepared, here leading to a state represented by an ellipse (prone to detection-noise). (ii) The interferometric protocol shifts the state. (iii) Inverse dynamics to (i) amplifies the shift (signal) and leaves us with a classical state to detect (robust to detection-noise). The protocol retains the signal-to-noise ratio and thereby the entanglement-enhanced precision.

[1] B. Lücke, M. Scherer, J. Kruse, L. Pezzé, F. Deuretzbacher, P. Hyllus, O. Topic, J. Peise, W. Ertmer, J. Arlt, L. Santos, A. Smerzi, C. Klempt, Twin matter waves for interferometry beyond the classical limit, *Science* 334, 773 (2011).

[2] B. Lücke, J. Peise, G. Vitagliano, J. Arlt, L. Santos, G. Tóth, C. Klempt, Detecting multiparticle entanglement of Dicke states, *Phys. Rev. Lett.* 112, 155304 (2014).

[3] F. Anders, L. Pezzè, A. Smerzi, C. Klempt, Phase magnification by two-axis counter-twisting for detection noise robust interferometry, arXiv:1711.02658.

[4] K. Lange, J. Peise, B. Lücke, I. Kruse, G. Vitagliano, I. Apellaniz, M. Kleinmann, G. Toth, C. Klempt, Entanglement between two spatially separated atomic modes, arXiv:1708.02480.



Johannes Aprojanz

Functionalisation of Graphene Nanostructures

Supervisor: C. Tegenkamp

Researcher: J. Aprojanz

Patterning of graphene into narrow stripes leads to exciting alterations of the extraordinary band structure of graphene. For instance, the electronic confinement in these so called graphene nanoribbons (GNR) gives rise to topologically protected edge states depending on the edge orientation and the crystal quality.

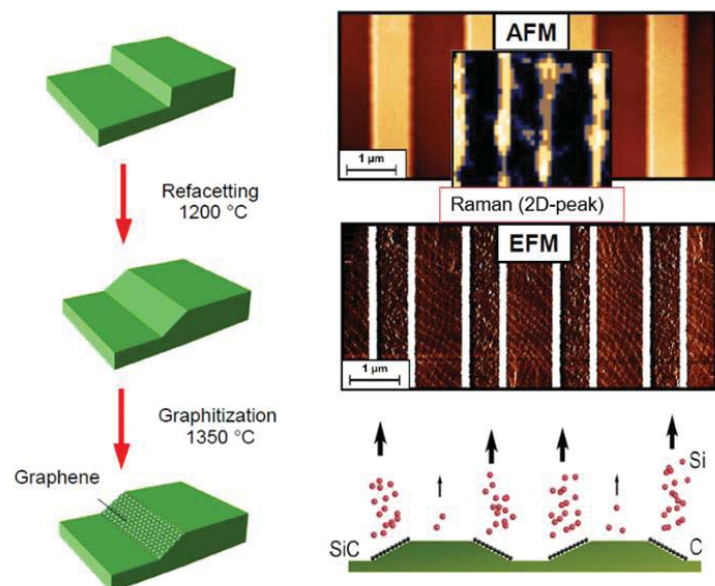
GNR are epitaxially grown on nanofacets of SiC mesa structures to avoid any damages of post-processing. The local transport properties as well as the electronic structure of as-grown GNR are studied by means of a 4-tip STM, which allows to perform transport measurements with probe spacings smaller than 100 nm.

We have shown that the nanoribbons produced with that method exhibit an extraordinary quality resulting in exceptional transport properties. Moreover, our results indicate a fully spin-polarized single channel ballistic transport behavior. Finally, the major objective of my studies is to explore the origin of this unique transport channel as well as the functionalization of GNR by adsorption of magnetic and non-magnetic impurities.

[1] Jens Baringhaus, Mikkel Settnes, Johannes Aprojanz, Stephen R. Power, Antti-Pekka Jauho, and Christoph Tegenkamp: Electron Interference in Ballistic Graphene Nanoconstrictions, *Phys. Rev. Lett.* 116, 186602 (2016)

[2] J. Baringhaus, J. Aprojanz, J. Wiegand, D. Laube, M. Halbauer, J. Hübner, M. Oestreich and C. Tegenkamp: Growth and characterization of sidewall graphene nanoribbons, *Appl. Phys. Lett.* 106, 043109 (2015)

[3] Jens Baringhaus, Ming Ruan, Frederik Edler, Antonio Tejada, Muriel Sicot, Amina Taleb-Ibrahimi, An-Ping Li, Zhigang Jiang, Edward H. Conrad, Claire Berger, Christoph Tegenkamp, Walt A. de Heer: Exceptional ballistic transport in epitaxial graphene nanoribbons, *Nature*, 506, 349 (2014)



Schematic of the processing steps and a overview of different methods used to characterize epitaxially grown sidewall GNR.

Transport through quantum dot systems

Supervisor: R. Haug
 Researcher: J. Bayer

Quantum dots are artificial systems in which charge carriers are spatially confined to the order of their Fermi wavelength. Due to this confinement quantum dots exhibit a discrete energetic spectrum. Coulomb repulsion and Pauli exclusion hereby prevent the energetic states to be occupied by more than one charge carrier at a time.

The focus of this project lies on the investigation of quantum dot arrays based on two-dimensional electron gases (2DEGs) which are formed in GaAs/Al-GaAs heterostructures. Metallic Schottky gates are fabricated on the surface of the heterostructure via electron beam lithography and by applying negative potentials to these gates, the 2DEG below can be depleted to define the quantum dots. In the same way a quantum point contact (QPC) is defined in the vicinity of the quantum dots and acts as a highly sensitive charge detector.

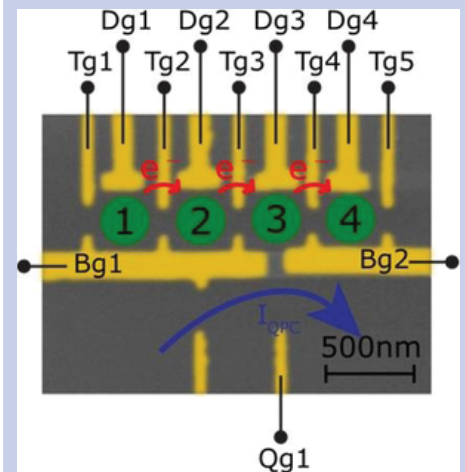
This QPC charge sensor allows the real-time tracking of electrons moving through or inside a quantum dot system and opens up opportunities like implementing a feedback protocol to suppress the shot noise in a single electron transistor device [1].

[1] T. Wagner; P. Strasberg; J. C. Bayer; E. P. Rugeramigabo; T. Brandes; R. J. Haug, Strong suppression of shot noise in a feedback-controlled single-electron transistor, Nature Nanotechnology DOI:10.1038/nnano.2016.225 (2016).

False color SEM image of a quadruple quantum dot device. The quantum dots are depicted as green circles. Red arrows indicate the possibility to move electrons through the array. This movement can be tracked by the QPC charge sensor, depicted by the blue arrow.



Johannes Bayer



Ultrasensitive Current Sensor with Quantum Dots

Supervisor: R. Haug, N. Bigall
 Researcher: B. Brechtken

Quantum dots, quasi zero dimensional systems, can be produced via lithographic procedures or via chemical processes. If quantum dots are connected to electrical leads by tunnelling barriers single electron tunnelling can be observed. Such devices are called single-electron transistors. Since few years it is possible to detect the tunnelling of the individual electrons at low temperatures in a time-resolved fashion with a nearby quantum point contact. In this way the electrons can be counted and the electrical current flowing through the quantum dot is measured. This technique allows for detection of smallest currents. Measurements of few attoamperes are routinely achieved. In decreasing the size of the quantum dots room temperature operation of these ultrasensitive current sensors is possible.

Within this project such sensors will be produced and studied in detail. A decrease of the size of the quantum dots can be achieved via lithographic procedures but also in using chemical methods. In this way the sensors will be developed further to allow for room temperature operation. Different material systems, as e.g. graphene, but also e.g. CdSe/CdS systems will be used. The applicability of these sensors in different environments will be tested.



Benedikt Brechtken



Vui Nghi Dang

Sensoric Functionalisation of (Bio-)Polymers (BioFunc)

Supervisor: H.-J. Endres, F. Renz

Researcher: V. N. Dang

This research project BioFunc has been set up to functionalise polymers and biopolymers by taking new, nanoscale and chemical approaches in order to gain sensoric properties. The BioFunc is achieved by covalent or non-covalent linkage of stimuli-responsive sensoric compounds to the biopolymers. The aim of BioFunc is to establish a scientific basis for innovative medical or materials engineering applications.

In the medical sector, for example, the objective of BioFunc is to functionalise polymers with biosensors that are able to monitor healing processes (e.g., bandages that detect inflammatory conditions in babies or animals) or indicate diseases (e.g., cancer detection) at an early stage. Another objective is to release and/or absorb bio-effective substances in a locally controlled manner by functionalising bioresorbable or biocompatible polymers accordingly.

In other technological areas, for example, the focus of BioFunc lies on polymers with increased thermal conductivity for heat transfer (functional textiles, automobile heaters, etc.), or increased electrical conductivity for signal transmission (sports sector, sensors and control elements, adaptronics, medicine, etc.). Another functional capacity would be the detection of mechanical stress in engineering components, for example to indicate manufacturing flaws, fiber breakages, material fatigue, or delamination in fiber composite components. Additional fields of application might be to develop forgery-proof materials (product protection of plastic components, certificates and diplomas, etc.), to develop materials for selectively permeable membranes, or to develop polymers that are degradable even under marine conditions, e.g., for cosmetic uses.



Bastian Dreyer

Graphene-based sensors: Application of sensory and actorial graphene structures in medical engineering

Supervisor: R. Sindelar, F. Renz

Researcher: B. Dreyer

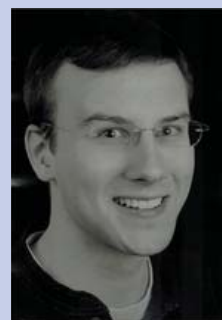
The unique properties of graphene, e.g. the high charge mobility and electron transfer rate, the exceptionally high surface-to-volume ratio and the mechanical stability make it an attractive candidate for future sensor applications. For the successful introduction of the graphene based on sensor technology, a carrier material is needed which is inexpensive and sustainable in production and which has a secure raw material basis. The nanoscale dimensions of the fibers to be investigated suggest application to the cell plane. While presently electrical stimulation devices, e.g. Cochlear implants, electrodes of at least one square millimeter, and thus stimulate entire nerve strands over a large area, can create a stimulus on cell plane and even below, e.g. at a synapse. Together with the functionalization of the fibers, e.g. through switchable metal complexes, a variety of sensory and stimulatory properties can be thought of in a single nanoscale fiber. The project is closely linked to the working groups of Professor Renz and Professor Tegenkamp. While the fibers are produced on the HsH, the functionalization is carried out in chemistry. This is to be investigated in cooperation with the physics. If promising sensors or actuators are produced, these can be tested in the neurology of the MHH.

From nanowire sensors to nanoscale mass spectrometers

Supervisor: S. Zimmermann, P. Behrens, T. Scheper

Researcher: A. Gehl

Many medical, biotechnological, safety and security applications require highly sensitive and selective sensors. One approach is to use nanostructures to amplify certain physical and/or chemical sensor effects. This research project concentrates on nanowire sensors to detect hazardous compounds and explosives in air or metabolites in exhaled breath. Sensor principles to be investigated here utilize the extremely low heat capacity and small mass of nanowires. When exposed to air different gas-phase compounds can non-specifically adsorb or chemically bind to the nanowire surface. In a calorimetric sensor approach the nanowire is heated by an electric current so that adsorbed or bound molecules desorb which leads to compound-specific heating curves. Furthermore, molecules attached to the nanowire surface significantly change its heat capacity and thermal conductivity. This allows sensitive molecule detection by simply measuring the thermal properties of the nanowire. In another approach the same nanowire is used as a mass sensitive resonator or nanoscale balance where adsorbed or bound molecules increase the resonator mass. This significantly shifts the resonance frequency of the loaded nanowire. For high selectivity the nanowire surface can be functionalized by certain receptors, such as aptamers, porous coordination polymers or metal-organic frameworks. Another approach is to reduce pressure and temperature to allow non-specific adsorption of single molecules at a time. An array of such mass sensitive nanowires can be used as a nanoscale mass spectrometer. Important aspects of this research project are the design, simulation, manufacturing and characterization of the different nanowire based sensors.



Adrian Gehl

Hollow and Concave Colloidal Plasmonic Nanoparticles as Size and Shape Selective Sensors on the Nanometerscale

Supervisor: D. Dorfs, D. Bahnemann

Researcher: R. Himstedt

In the framework of this project, colloid chemically synthesized plasmonic nanoparticles shall be investigated with respect to their potential as size and shape selective sensors on the nanometerscale in liquid phase. For this purpose a variety of different plasmonic nanoparticles will be synthesized. Already this pure synthesis part of the project will go beyond the state of the art in nanoparticle synthesis. Apart from "normal" plasmonic particles from noble metals also plasmonic particles from highly doped (degenerately doped) semiconductor or oxide materials with localized surface plasmon resonances tunable in the near infrared part of the spectrum shall be synthesized and shall be compared with the classic metallic nanoparticles with respect to their sensory properties.[1]

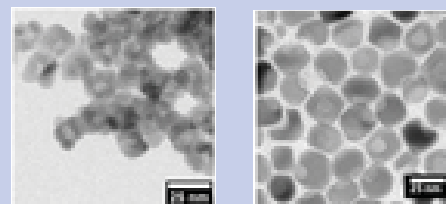
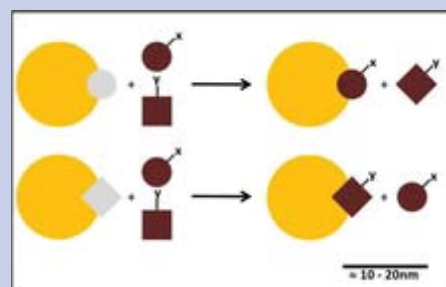
The plasmonic particles can detect an analyte either via changes of the dielectric constant of the surrounding or via other, specific interactions with the analyte. With respect to the latter point, especially plasmonic particles with concave or cylindrical voids at the particle surface shall be synthesized, which can show size and shape selective interactions with different analytes [2] (see also scheme for e.g. key lock like interactions) which finally can easily be detected by a change of the resonance frequency of the localized surface plasmon resonance of these particles.

[1] (a) Dorfs, D. et al. J. Am. Chem. Soc. 2011, 133, 11175 (b) Wolf, A.; Kodanek, T.; Dorfs, D.; Nanoscale 2015, 7, 19519.

[2] George, C.; Dorfs, D. et al. J. Am. Chem. Soc., 2011, 133, 2205.



Rasmus Himstedt



Scheme 1: left: principle of nanoparticle key lock recognition right: examples of partially concave particles already synthesized in the group of D. Dorfs



Alexander Idel

Setup of a quantum-enhanced atomic sensor for precision metrology and tests of fundamental physics

Supervisor: C. Klempt

Researcher: A. Idel

Many-particle entangled states are not only a valuable resource for quantum information tasks and entanglement-enhanced metrology, but can also be applied as probes to test fundamental properties of nature. Across the communities of optics and atomic and molecular physics, major advances have been made towards the creation of entangled states with increasing entanglement strength and fidelity. However, in the field of ultracold atoms, the created nonclassical states are up to now mostly restricted to the two classes of squeezed states and W states. Within this project, we will employ spin-changing collisions in a Rb Bose-Einstein condensate to experimentally generate new classes of highly nonclassical many-particle states, including high-fidelity multi-particle Fock states, particle-added and particle-subtracted states, and Schrödinger cat states. We will demonstrate multi-mode entanglement and non-local entanglement by devising entangled quantum states with spatial separation. We will explore possible application scenarios for using these highly sensitive states for precision metrology with atom interferometers.



Alexander Knebel

Electrical and Optical Switching of Gas Transport through Surface MOF Layers

Supervisor: J. Caro

Researcher: A. Knebel

Metal-organic frameworks (MOFs) and surface anchored MOFs (SURMOFs) are a class of crystalline materials consisting of inorganic metal nodes interconnected by organic linker molecules. These materials demonstrate exceptionally high surface areas and adsorption abilities, optimally fitted for gas separation and purification applications. They find use in membrane technology, for example as neat MOF membranes or mixed matrix membranes (MMMs) [1]. Through their standing as organic-inorganic hybrid materials, MOFs were recently found to be smart materials, when, for example, adding stimuli responsive moieties into the framework. Demonstration of tailor-made functionality in a remote-controllable membrane with light switchable azobenzene (AZB) in the backbone of MOF crystals was recently published [2]. However, MOFs stay behind their potential gas separation potential for the same reason: flexibility within these hybrid frameworks prevents molecular sieving. They are called "soft porous crystals" [3] due to thermally induced lattice flexibility, called breathing, that is particularly conducted through shear-deformations, soft-modes and linker rotations, depending on the type of MOF [4]. The primary aim of the PhD work is to exploit this framework flexibility with external stimuli in membrane layers and MMMs. The main project is the utilization of static and alternating electric fields [5] as well as the irradiation with light of specific wavelength [6]. The production of switchable smart membranes for separation and purification purpose is important to surpass today's standards in membrane technology.

[1] A. Knebel, S. Friebe, N.C. Bigall, M. Benzaqui, C. Serre, J. Caro, Comparative Study of MIL-96(Al) as Continuous Metal-Organic Frameworks Layer and Mixed-Matrix Membrane, *ACS appl. mater. interfaces* 8 (2016) 7536–7544.

[2] A. Knebel, Z. Wang, S. Grosjean, D. Wagner, S. Bräse, C. Wöll, J. Caro, L. Heinke, Tunable Molecular Separation by Nanoporous Membranes, *Nat. Commun.* (2016), 7, 13872.

[3] S. Horike, S. Shimomura, S. Kitagawa, Soft porous crystals, *Nat. Chem.* 1 (2009) 695–704.

[4] M.R. Ryder, B. Civalleri, T.D. Bennett, S. Henke, S. Rudic, G. Cinque, F. Fernandez-Alonso, J.-C. Tan, Identifying the role of terahertz vibrations in metal-organic frameworks: from gate-opening phenomenon to shear-driven structural destabilization, *Phys. Rev. Lett.* (2014), 1132, 15502.

[5] A. Knebel, B. Geppert, K. Volgmann, J. Twiefel, P. Heitjans, J. Caro, Defibrillation of soft porous metal-organic frameworks with electric fields, *Science* (2017), 358, 347-351

[6] A. Knebel, L. Sundermann, A. Mohmeyer, S. Friebe, P. Behrens, J. Caro, Azobenzene Guest Molecules as Light-Switchable CO₂ Valves in an Ultrathin UiO-67 Membrane, *Chem. Mater.* (2017), 29, 3111-3117

Acknowledgement: This work is funded by and part of the DFG priority programm "Coordination Networks: Building Blocks for Functional Systems" (COORNETs) SPP 1928.

Sensoric Functionalisation of (Bio-)Polymers (BioFunc)

Supervisor: H.-J. Endres

Researcher: J. Lecinski

This research project BioFunc has been set up to functionalise polymers and biopolymers by taking new, nanoscale and chemical approaches in order to gain sensoric properties. The BioFunc is achieved by covalent or non-covalent linkage of stimuli-responsive sensoric compounds to the biopolymers. The aim of BioFunc is to establish a scientific basis for innovative medical or materials engineering applications. The focus of BioFunc lies on polymers with increased thermal conductivity for heat transfer (functional textiles, automobile heaters, etc.), or increased electrical conductivity for signal transmission (sports sector, sensors and control elements, adaptronics, medicine, etc.). Another functional capacity would be the detection of mechanical stress in engineering components, for example to indicate manufacturing flaws, fiber breakages, material fatigue, or delamination in fiber composite components.

Electronic Devices for Gas Sensing based on Metal-Organic Frameworks (MOF)

Supervisor: J. Osten, J. Caro

Researcher: L. Montañez

MOFs represent a new class of soft porous materials. The permanent porosity after solvent removal allows the reversible adsorption of guest molecules for sensing. The adsorption of gases can be tuned via the interaction with the open metal sites or with polar, basic or acid groups of the linkers. Gas loading of these MOFs causes variations in electronically relevant properties like work functions or dielectric behavior.

This project focusses on possible applications of such effects in simple electronic devices. Suitable devices (MOS capacitors or transistors) have to be designed and fabricated. Then, selected MOFs has to be crystallized as thin layers in preformed windows on these devices. Finally, the impact of different gas adsorptions on device properties (work function change -> changes in threshold voltage; change in dielectric properties -> capacity variation) will be evaluated.

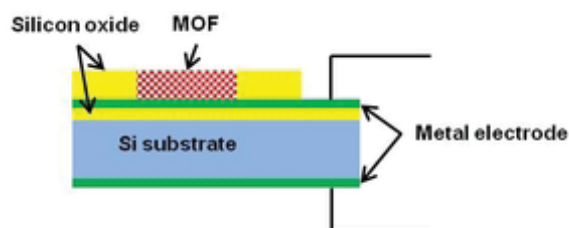


Fig: schematically drawing of a MOS capacitor with MOF above the top electrode.



Jacek Lecinski



Liz Margarita
Montañez Huamán



Dennis Müller

Synthesis and Characterization of Nanocrystal-based Gel Materials for Electrocatalysis

Supervisor: N. Bigall

Researcher: D. Müller

In this project, various nanocrystal-based gel materials are to be produced with a view to improved electrocatalytic activity. In addition to pure (noble) metal nanoparticles, metal oxides or various heteroparticles are to be used as building blocks. In contrast to the conventional wet chemical procedure, a cryogelation process is to be used here. Following the preparation, a basic, structural and electrochemical characterization of the cryogel materials is to be carried out in order to gain a knowledge about the influence of different parameters on the electrocatalytic activity of these substances. With regard to a technical application, our aim is to enhance the electrocatalytic activity and the long-term stability.



Dominik Natke

Graphene based sensors: functionalization by molecular switches

Supervisor: F. Renz, R. Sindelar, C. Tegenkamp

Researcher: D. Natke

Graphene's unique properties, i.e. the extraordinary carrier mobility and capacitance, high electron transfer rate, exceptionally large surface-to-volume ratio in addition to its mechanical robustness and flexibility, makes it an attractive candidate for future sensor applications. The successful implementation of a graphene-based sensor technology requires a host material, which is low-priced in manufacture and sustainably fabricated from an almost inexhaustible source. Carbon nanofibres (CNFs), fabricated by electrospinning and subsequent processing and containing graphene as building-blocks, fulfil all of these requirements as recently demonstrated by us. Secondly, the tunability and tailoring of the sensor's selectivity is the most crucial step. In this project the functionalization of graphene and CNFs with modulating compounds and molecular switches is intended. The interdisciplinary collaboration with partners from physics and mechanical engineering has the potential to establish a new field of nanosensor research.

In detail, the project is devoted to the exploration of functionalized graphene in order to modulate the sensoric effects. The functionalized graphene is achieved via defects (substitutional, interstitial, intercalated), coordination (of metals, clusters, complex compounds), covalent bonding (of auxiliary electron donating or withdrawing groups in order to control the inductive and mesomeric effects), such as multi-stable complexes. The multi-stable molecular switches are stimuli-responsive with changing properties, such as in size or magnetism. These results will be extended to CNFs.

This project is closely entangled with the projects of Prof. Tegenkamp and Prof. Sindelar. Atomically well-defined pre-decorated graphene structures are transferred for further wet-chemical functionalization with relevant molecules, e.g. biotin as a linker, coupled via different bonding schemes (dipole, covalent, dispersive). After the ex-situ characterization in our labs the samples are re-installed for in-situ nanoscopic transport experiments (Prof. Tegenkamp; 4-tip STM/SEM system), in order to correlate the impact of selective bonding regimes with modifications of an electrical signal. In analogy, these recipes will be applied to CNFs (Prof. Sindelar) and the sensoric behaviour will be probed via transport measurements ranging from nanoscopic to macroscopic distances, including ambient conditions.

Synthesis and Analysis of Switchable Multinuclear Iron Coordination Compounds

Supervisor: F. Renz
 Researcher: A. Preiss

The aim of this project is the design, development, and investigation of switchable nanoscopic coordination compounds for sensor applications. The compounds exhibit concerted and sequential electronic molecular switching upon thermal or electro-magnetical excitation.

A milestone is the synthetic modification of the switchable mono- and multinuclear compounds. The modification is based on electronical or sterical substitutions in the organic framework as well as in the metal centers. The synthesized complexes are to be characterized by suitable spectroscopic methods (eg IR, UV/Vis, Raman spectroscopy, ESI-MS, NMR, XRD) and their switching behavior should be investigated (eg Mössbauer spectroscopy, SQUID magnetometry, temperature-dependent IR spectroscopy).

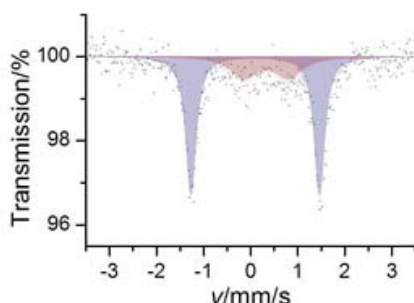
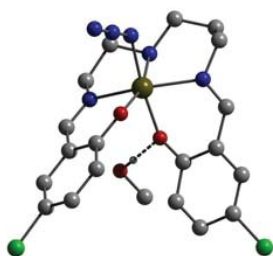


Fig 1: Crystal structure (left) and Mössbauer measurement at 77 K (right) of one of the synthesized mononuclear compounds showing a spin transition.

Selective sensors based on porous coordination polymers

Supervisor: P. Behrens, S. Zimmermann
 Researcher: M. Schäfer

Porous coordination polymers (PCPs) or metal-organic frameworks (MOFs) are a novel class of materials which are interesting for a variety of applications, including sorption and sensing. The possibility to design and synthesize special organic linkers should allow the development of highly specific sensor materials. However, the purely empirical search for sensor materials has so far not lead to applications due to the insufficient specificity of the material for a selected analyte. Therefore, within this project a combined theoretical and practical approach is employed. By computer simulations on the force field level, PCPs with a specific disposition of interacting groups on their pore walls, which serve to recognize a certain analyte (e.g. ethanolamine), are generated and evaluated with regard to the specificity of the recognition on the basis of the calculated binding energies. Then, such PCPs shall be synthesized in the laboratory and tested with regard to their actual sorption properties.



Annika Preiss



Malte Schäfer



Anja Schlosser

Novel Nanocrystal Assembly Concepts for Quantum Dot Based Photoelectrochemical Sensors

Supervisor: N. Bigall, A. Kirschning

Researcher: A. Schlosser

Colloidal nanoparticles have the advantage that with one single synthetic step a huge amount of nanoparticles can be prepared with subnanometer precision and an extremely far-developed size-, material-, and shape-control. For building photoelectrochemical sensors in order to detect a large variety of different molecules dissolved in aqueous solutions (such as pollutants or biomedical molecules), the nanoparticles must be deposited on electrodes without losing their nanoscopic properties (mainly quantum confinement). The geometry (architecture) of the nanoparticle arrangement will play an important role for the quality and sensitivity of the resulting sensor.

In this project, tailored colloidal nanocrystals will be first synthesized by wet-chemical routes. Subsequently, assembly concepts will be developed in order to build superstructures of the nanoparticle building blocks which partly still exhibit nanoscopic properties. Assemblies of porous, dense-packed, regular and non-regular arrangements will be developed. The resulting novel systems will be characterized by means of electron microscopy, optical spectroscopy and electrochemical techniques.

Photoelectrochemical sensors of these materials will be built. Here, a comparison between the different assembly architectures will yield information about the optimum arrangement. We expect that by optimizing the arrangement architecture and choosing highly advanced colloidal nanocrystals, we will be able to build sensors with high photocurrents and sensitivities as well as a huge analyte detection range and long-term stability.



Ina Strauß

Calix[4]arene-based Metal-organic Frameworks as Sensor Materials

Supervisor: P. Behrens

Researcher: M. Schulz

Metal-organic frameworks (MOFs) are class of hybrid materials with interesting properties for applications like sorption or sensing. The functionality and size of the pores can be controlled by variation of the linker molecules. In combination with calix[4]arene-based linker molecules which show intrinsic porosity, gas molecules can be adsorbed more effectively. Furthermore highly selective sensor materials can be formed due to the high adsorption affinity of calix[4]arenes to nitrogen oxides and nitro aromatic compounds (NACs) like TNT or nitrobenzene. In this project the synthesis of MOFs with various functionalised calix[4]arene derivatives is investigated to create porous frameworks for sorption and especially for sensing applications for these compounds. Another application could be a drug and release system for the nerve stimulating NO molecules.

Metal-Organic Frameworks (MOF) for gas sensing

Supervisor: J. Caro, N. Guschanski, T. Wietler

Researcher: I. Strauß

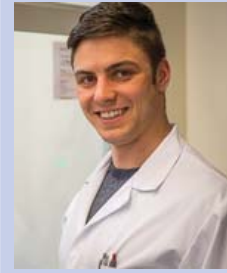
MOFs represent a new class of soft porous materials. The permanent porosity after solvent removal allows the reversible adsorption of guest molecules for sensing. The adsorption of gases can be tuned via the interaction with the open metal sites or with polar, basic or acid groups of the linkers. The selective adsorption of a guest alters the vibrational modes of the MOF as host in the IR region in a characteristic way since MOFs as “soft” materials show extended and easy to modify lattice vibrations. In this project, MOFs are used for detecting gases by IR spectroscopy. At the beginning, the interesting MOF structures are screened, the response of the MOFs upon gas adsorption will be detected by recording the IR spectra of the MOFs as powder by DRIFT. The change of the vibrational patterns upon gas adsorption will be also by Raman spectroscopy. Finally, selected MOFs will be prepared as layer on a fiber-optics using Evanescent Wave Spectroscopy. We are one of the internationally leading groups to crystallize these MOFs as thin layers on solid surfaces like on glass fiber-optics [1]. We have developed know how to hydrophobize MOFs thus making their structure stable against humid attack and to exclude water as disturbing component in sensing [2]. We have also long-year experience in IR of gases at solid surfaces [3] and on Raman spectroscopy [4].

[1] A. Huang ... J. Caro, Organosilica-functionalized zeolitic imidazolate framework ZIF-90 membrane with high gas-separation performance, *Angew. Chem. Int. Ed.* 51 (2012) 10551.

[2] X. Liu ... J. Caro, Improvement of hydrothermal stability of zeolitic imidazolate frameworks, *Chem. Commun.* 49 (2013) 9140-9142.

[3] J. Heidberg, N. Guschanskaja et al., High-resolution FT-IR spectroscopy of H₂ and D₂ adsorbed on NaCl, *Mikrochim. Acta* 14 (1997) 643-645.

[4] T. F. Wietler et al., Surfactant-mediated epitaxy of silicon germanium films on silicon (001) substrates, *Thin Solid Films* 557 (2014) 27.



Marcel Schulz

Wissenschaftliche Projekte / Scientific Projects

Eine Auswahl von Projekten aus den Arbeitsgruppen des LNQE.

A selection of projects from the research groups of LNQE.

Azobenzene Guest Molecules as Light-Switchable CO₂ Valves in an Ultrathin UiO-67 Membrane

A. Knebel¹, L. Sundermann¹, A. Mohmeyer², I. Strauß^{1,3}, S. Friebe¹, P. Behrens^{2,3}, J. Caro^{1,3}

¹ Institute for Physical Chemistry and Electrochemistry, Leibniz University Hannover, Callinstraße 3A, 30167 Hannover, Germany

² Institute for Inorganic Chemistry, Leibniz University Hannover, Callinstraße 9, 30167 Hannover, Germany

³ Laboratory of Nano and Quantum Engineering (LNQE), Leibniz University Hannover, Schneiderberg 39, 30167 Hannover, Germany

Metal-Organic Frameworks, consisting of inorganic metal- or metaloxide nodes interconnected by organic linker molecules, are an emerging class of porous materials. Thus, interesting potential applications are for example solvent purification, water desalination, catalysis, and in our case gas separation and purification. [1] We further focus on gas separation membranes with intelligent properties, towards an universal membrane which can be switched for different purification purposes. To achieve this, the metal-organic framework (MOF) UiO-67 with pore apertures of around 8 Å [2] was prepared as a 200 nm supported thin layer by solvothermal growth. This is the first report of UiO-67 as a membrane layer, and we further functionalized the membrane with switchable guests.

First of all, the pore aperture is rather big and does not show molecular-sieving for small molecules, but the MOFs separation properties rely on competitive adsorption mechanisms. The membrane was characterized in terms of its gas permeation properties and showed in experimental testing excellent selectivity for H₂ purification (Figure 1).

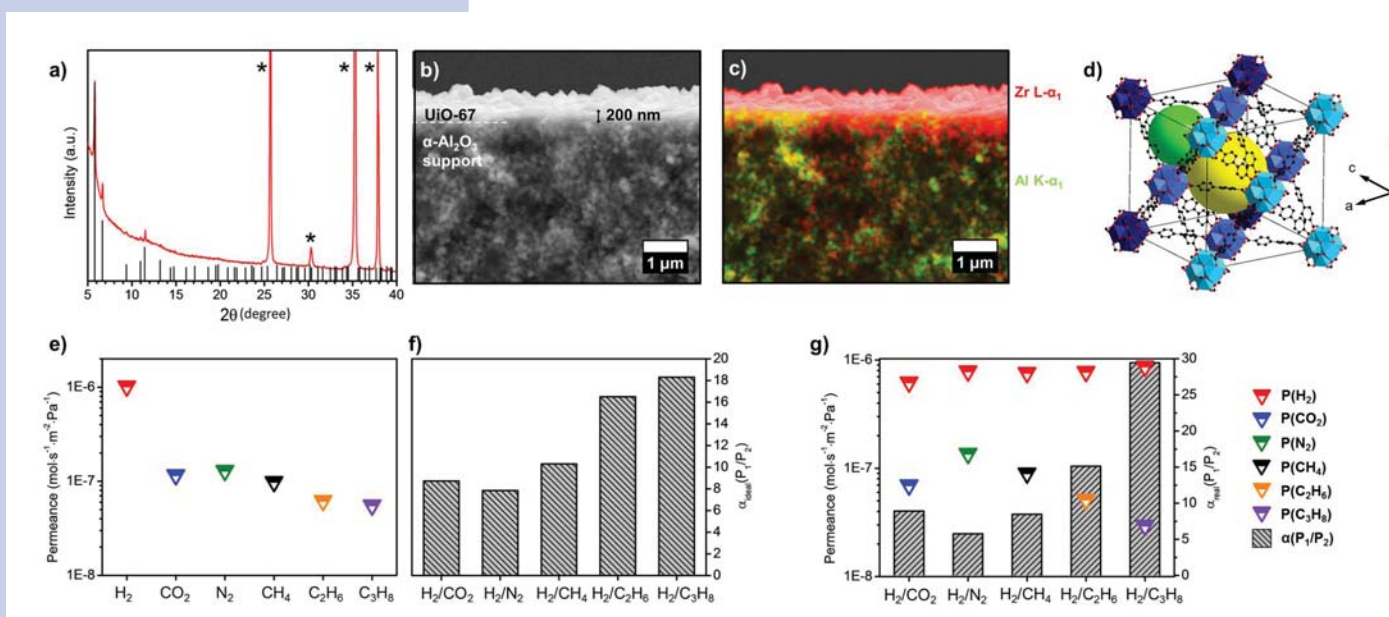


Figure 1 a) The XRD of the 200 nm layer on α -Al₂O₃ support, b) SEM image and c) corresponding EDX mapping of the layer. The crystal structure is given in d). Gas permeation data for single gases and the ideal separation factor in e) and f), mixed gas permeation and real separation factor in g). Reprinted with permission from *Chemistry of Materials* 2017, 29, 3111–3117. Copyright 2017 American Chemical Society.

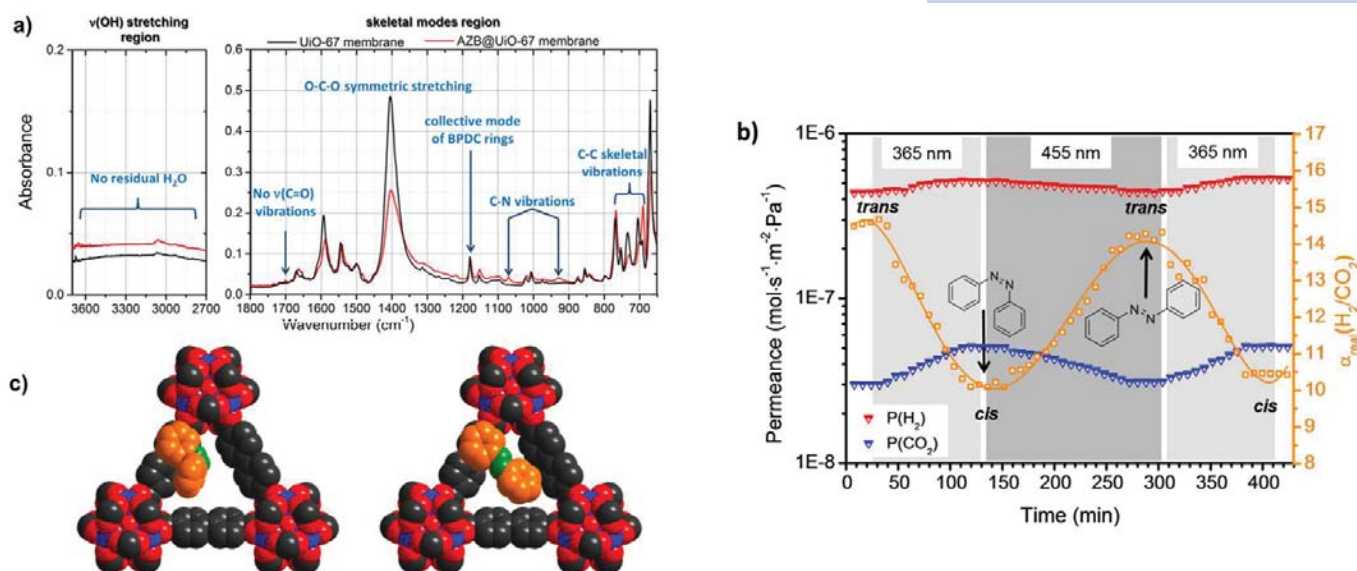


Figure 2 a) Attenuated total reflection IR-spectroscopic data of a UiO-67 membrane with and without AZB inside the pore system. The π -stacking of AZB was observed through changes in the skeletal modes region. b) Gives the gas permeation switching under constant irradiation of the AZB containing UiO-67 membrane. c) A schematic representation of the proposed mechanism for switching of the gas transport through the membrane.

Afterwards the UiO-67 was loaded with azobenzene (AZB) as guest molecule, which introduces light-switchability to the membrane. The first light switchable membrane was also reported by us, being a specialized tailored MOF with switchable side-chains containing AZB moieties [3]. In the pore system, the AZB forms π -stacking complexes with the benzene rings of the MOF linker and stands in some cases into the pore aperture, thus enables switching of the channel diameter for the gases to pass through (Figure 2). AZB changes from *cis* to its *trans* isomer and by that the size from 9 Å (*trans*) to 4.5 Å (*cis*), thus open and close the entrance as shown in Figure 2c. The switching occurs from *trans* to *cis* at 365 nm, from *trans* to *cis* at 455 nm using an fibre coupled high power LED. This makes the in-situ switching of the CO_2 permeance by irradiation with light possible, given in Figure 2 b). The H_2 permeance is not influenced this much. The separation factor of H_2/CO_2 is switched from 14.5 in *trans* to 10 in *cis*.

The advantage of a conventional MOF (UiO-67 in this case) compared to a tailored MOF is especially the commercial availability. The linker molecules can be purchased in high quantities and the synthesis is a lot easier. Also the loading with guest molecules is quite easy to achieve by simply soaking the MOF into the AZB containing solution and temperature treatment afterwards. The ability to switch is also quite good. 12.5 % of the AZB is switchable, by a 50 % loading of the MOF, corresponding to 9 AZB molecules per unit cell. The tailored MOF had (normalized to unit cell volume of UiO-67) 20 moieties that switched.[3]

To conclude the work, an UiO-67 membrane was prepared and characterized for the first time in terms of its H_2 purification properties. Further, a light switchable guest molecule was introduced into the MOF network, which could be used to switch the gas transport of CO_2 by light over the permeance of H_2 , resulting in selectivity changes. Thereby, an easy and cheap way of making a switchable membrane was achieved and functionally tested. The complete paper can be found under the following source.[4]

References

- [1] Zhou, H. C.; Long, J. R.; Yaghi, O. M. Introduction to Metal–Organic Frameworks. *Chem. Rev.*, 2012, 112 (2), pp 673–674.
- [2] Katz, M. J.; Brown, Z. J.; Colon, Y. J.; Siu, P. W.; Scheid, K. A.; Snurr, R. Q.; Hupp, J. T.; Farha, O. K. A facile synthesis of UiO-66, UiO-67 and their derivatives. *Chem. Commun.*, 2013, 49, pp 9449–9451.
- [3] Wang, Z.; Knebel, A.; Grosjean, S.; Wagner, D.; Bräse, S.; Wöll, C.; Caro, J.; Heinke, L. Tunable Molecular Separation by Nanoporous Membranes. *Nat. Commun.*, 2016, 7, 13872.
- [4] Knebel, A.; Sundermann, L.; Mohmeyer, A.; Strauß, I.; Friebe, S.; Behrens, P.; Caro, J. Azobenzene Guest Molecules as Light-Switchable CO₂ Valves in an Ultrathin Metal–Organic Framework Membrane. *Chem. Mater.*, 2017, 29 (7), pp 3111–3117.

Gold-Aerogele zur Detektion von elementarem Quecksilber in der Gasphase

A. Gehl^{a*}, A. Schlosser^{b*}, M. Allers^{a*}, A. Freytag^{b*}, N. Bigall^{b*}, S. Zimmermann^{a*}

a Institut für Grundlagen der Elektrotechnik und Messtechnik, Appelstraße 9A, 30167 Hannover, Germany

b Institut für Physikalische Chemie und Elektrochemie, Callinstraße 3A, 30167 Hannover, Germany

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

Einleitung

Quecksilber wird in großen Mengen durch industrielle Prozesse freigesetzt. Da Quecksilber sehr toxisch ist, werden zum Schutz des Menschen Sensoren benötigt, welche in der Lage sind, geringe Quecksilberkonzentrationen zu detektieren. Die Anforderungen an solch einen Sensor sind vielseitig. Zum einen sollte der Sensor klein und leicht zu transportieren sein, zum anderen sind eine hohe Sensitivität und eine schnelle Regeneration notwendig. Weiterhin muss der Sensor eine niedrige Querempfindlichkeit gegenüber anderen Gasen in der Luft aufweisen.

In der Literatur lassen sich verschiedene Verfahren zur Quecksilberdetektion in Luft finden. Kommerziell erhältliche Geräte basieren auf der direkten Messung von Quecksilber anhand von Atomabsorptionsspektroskopie [1]. Mit diesen Geräten können sehr geringe Quecksilbermengen nachgewiesen werden, allerdings sind sie durch ihre Komplexität und Größe nicht für einen Einsatz im Feld geeignet. Ein weiterer Nachteil ist die Querempfindlichkeit beispielsweise gegenüber Ozon, SO₂ und Kohlenwasserstoffen.

Andere Sensoren nutzen die Bildung eines Amalgams beim Kontakt von Quecksilber mit Gold als Messeffekt aus und detektieren eine Masse- bzw. Widerstandsänderung. Beispiele hierfür stellen Quarzkristall-Mikrowaagen [2], Akustische-Oberflächenwellen-Sensoren [3], Cantilever [4] oder resistive Sensoren [5] dar. Das Messprinzip der resistiven Sensoren basiert auf der Änderung der elektrischen Leitfähigkeit des Sensors bei Quecksilberexposition. Durch den größeren spezifischen Widerstand des bei Quecksilberexposition auf der Sensoroberfläche gebildeten Amalgams wird erwartet, dass die elektrische Leitfähigkeit sinkt.

Untersuchungen zur Amalgambildung zeigen allerdings, dass die Eindringtiefe von Quecksilberatomen bei einer Einwirkdauer von 30 Minuten und Queck-

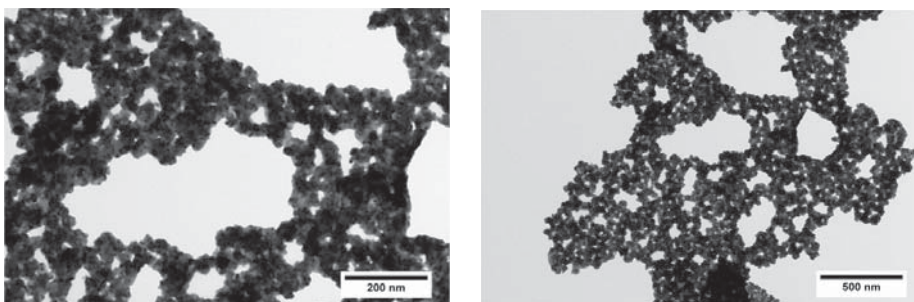


Abbildung 1: TEM-Aufnahmen der Struktur eines Gold-Aerogels in niedrigerer (links) und höherer (rechts) Vergrößerung. Das Gold-Aerogel wurde aus Goldpartikeln mit einem mittleren Durchmesser von 4 nm hergestellt. Da die Nanopartikel im Aerogel in direktem Kontakt zueinander stehen, zeichnen sich die entstehenden Strukturen durch eine gute elektrische Leitfähigkeit aus.

silberkonzentrationen im $\mu\text{g}/\text{m}^3$ Bereich lediglich 5-6 nm beträgt [6]. Um eine möglichst hohe Sensitivität, d.h. eine möglichst große Widerstandsänderung, zu erreichen, ist daher ein hohes Oberflächen-zu-Volumen-Verhältnis erstrebenswert. Hierfür werden in der Literatur mehrere Ansätze verfolgt. Beispielsweise nutzen [7] und [8] mikrosystemtechnisch hergestellte Goldleiterbahnen als Quecksilbersensoren. Außerdem verwenden [9] Goldnanodrähte und [10] mit Goldpartikeln dekorierte Kohlenstoffnanoröhren.

Zur weiteren Erhöhung des Oberflächen-zu-Volumen-Verhältnis wird im Rahmen dieses Projekts der Widerstand von selbsttragenden Aerogelen aus kolloidalen Goldnanopartikeln bei Quecksilberexposition vermessen, welche eine hochporöse Struktur aufweisen.

Herstellung der Aerogele

Aerogele aus Goldnanopartikeln lassen sich einfach und schnell über das Verfahren der Kryogelierung herstellen [11]. Dabei wird eine wässrige Lösung der zu gelierenden Nanopartikel zunächst in flüssigem Stickstoff eingefroren und das gefrorene Wasser anschließend durch Gefriertrocknung entfernt. Werden ausreichend hoch konzentrierte Nanopartikellösungen (Nanopartikelanteil $>0,1 \text{ Vol}\%$) eingesetzt, kann eine Schrumpfung während des Gefrier-trocknens vermieden werden, wodurch hochporöse, monolithische Strukturen entstehen. Diese Strukturen sind in den in Abbildung 1 gezeigten Aufnahmen mit einem Transmissions-Elektronenmikroskop (TEM) gut zu erkennen.

Experimenteller Aufbau

Der Quecksilbersensor besteht aus zwei Kupferelektroden auf einer Leiterplatte, zwischen denen in einem Spalt das Aerogel aufgebracht ist (siehe Abbildung 2). Der Spaltabstand beträgt ca. 1 mm. Zur Vermessung des elektrischen Widerstands wird zwischen den Elektroden eine Spannung von 10 mV angelegt und gleichzeitig der Strom durch die Struktur gemessen. Der Widerstand der Struktur liegt in der Regel zwischen 10 Ohm und 100 Ohm. Der Sensor befindet sich in einem Gefäß mit einem Volumen von 100 mL, welches durchgängig von gereinigtem, trockenem Stickstoff durchströmt wird. Zum diesem Gasstrom lässt sich quecksilberhaltiger Stickstoff hinzumischen, so dass definierte Quecksilberkonzentrationen zwischen 0 und $1,5 \text{ mg}/\text{m}^3$ eingestellt werden können.

Erste Ergebnisse und Ausblick

Für erste Messungen wurde durch die Messkammer zunächst ein Gasstrom von 50 ml/min reinem Stickstoff geleitet. Anschließend wurde der Anteil an quecksilberhaltigem Stickstoff stufenweise auf bis zu 50 ml/min erhöht und gleichzeitig der Anteil an reinem Stickstoff entsprechend verringert, so dass der Gesamtgasstrom bei 50 ml/min konstant blieb. Abschließend wird der quecksilberhaltige Gasstrom wieder ausgeschaltet und das Regenerationsverhalten des Sensors betrachtet. Das Ergebnis dieser Messung ist in Abbildung 3 zu sehen.

Deutlich zu erkennen ist der Anstieg des ohmschen Widerstands bei Quecksilberexposition. Dieser tritt jedoch erst ab einem größeren Anteil quecksilberhaltigen Stickstoffs im Gasgemisch ein. Außerdem ist vor diesem Anstieg ein Drift des Widerstandswerts nach unten zu sehen, der sich nach Ausschalten des Quecksilbergasstroms fortsetzt. Der Widerstandsanstieg bei Quecksilberexposition lässt sich durch eine Amalgamation der Goldpartikel erklären. Im Widerspruch hierzu steht jedoch die vollständige Reversibilität des Messeffekts auch ohne Erhitzen der Probe. Neben einer Optimierung des Sensoraufbaus ist daher die genauere Untersuchung der Quecksilberadsorption an das Gold-Aerogel ein Schwerpunkt dieses Projekts.

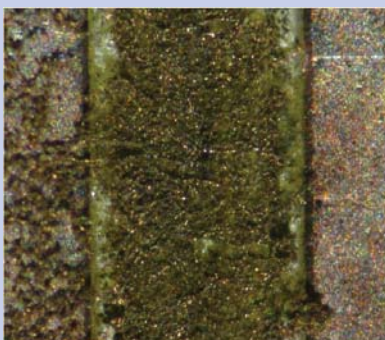
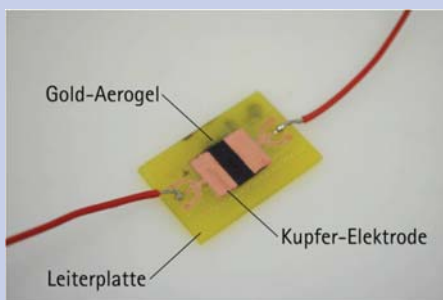


Abbildung 2: Erste Version des Quecksilbersensors (oben), Gold-Aerogel im Spalt zwischen den Kupfer-Elektroden (unten).

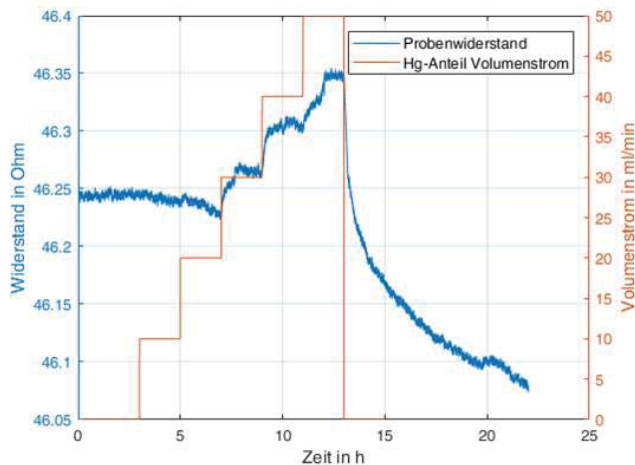


Abbildung 3: Gold-Aerogel-Sensor bei Quecksilberexposition.

References

- [1] N. B. French, S. J. Priebe, W. J. Haas, and Jr, "Product Reviews: State-of-the-Art Mercury CEMs," (eng), vol. 71, no. 13, 470A-5A, 1999.
- [2] Y. M. Sabri et al., "Investigation of Hg sorption and diffusion behavior on ultra-thin films of gold using QCM response analysis and SIMS depth profiling," J. Mater. Chem., vol. 22, no. 39, p. 20929, 2012.
- [3] Kabir, K M Mohibul et al., "Mercury Sorption and Desorption on Gold: A Comparative Analysis of Surface Acoustic Wave and Quartz Crystal Microbalance-Based Sensors," (eng), Langmuir : the ACS journal of surfaces and colloids, vol. 31, no. 30, pp. 8519–8529, 2015.
- [4] J. Drelich, C. L. White, and Z. Xu, "Laboratory Tests on Mercury Emission Monitoring with Resonating Gold-coated Silicon Cantilevers," Environ. Sci. Technol., vol. 42, no. 6, pp. 2072–2078, 2008.
- [5] K. Schambach, K. Eden, K. Schumacher, and G. Wiegler, "Micro-machined Mercury Sensor," in Solid-State Device Research Conference, 2002. Proceeding of the 32nd European: IEEE, 2002, pp. 443–446.
- [6] C. Battistoni et al., "Interaction of mercury vapour with thin films of gold," Applied Surface Science, vol. 103, no. 2, pp. 107–111, 1996.
- [7] B. Mazzolai et al., "A microfabricated physical sensor for atmospheric mercury monitoring," Sensors and Actuators A: Physical, vol. 113, no. 3, pp. 282–287, 2004.
- [8] M. J. Griffin et al., "A Nanoengineered Conductometric Device for Accurate Analysis of Elemental Mercury Vapor," (eng), Environmental science & technology, vol. 50, no. 3, pp. 1384–1392, 2016.
- [9] S. Keebaugh, A. K. Kalkan, W. J. Nam, and S. J. Fonash, "Gold Nano wires for the Detection of Elemental and Ionic Mercury," Electrochem. Solid-State Lett., vol. 9, no. 9, H88, 2006.
- [10] T. P. McNicholas et al., "Sensitive Detection of Elemental Mercury Vapor by Gold Nanoparticle Decorated Carbon Nanotube Sensors," (eng), The journal of physical chemistry. C, Nanomaterials and interfaces, vol. 115, no. 28, pp. 13927–13931, 2011.
- [11] A. Freytag et al., "Versatile Aerogel Fabrication by Freezing and Subsequent Freeze-Drying of Colloidal Nanoparticle Solutions" Angewandte Chemie International Edition, vol. 55, p. 1200-1203, 2015.

Lokalisierte Oberflächenplasmonenresonanz verschiedener Nickelsulfid Nanostrukturen

R. Himstedt^{1*}, P. Rusch^{1*}, D. Hinrichs^{1*}, T. Kodanek^{1*}, J. Lauth², S. Kinge³, L. A. Siebbeles², D. Dorfs^{1*}

1 Institut für Physikalische Chemie und Elektrochemie, Callinstraße 3A, 30167 Hannover, Germany

2 Chemical Engineering Department, Delft University of Technology, Van der Maasweg 9, NL-2629 Delft, The Netherlands

3 Materials Research & Development, Toyota Motor Europe, Hoge Wei 33, B-1930 Zaventem, Belgium

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

Einleitung

Aufgrund ihrer einzigartigen optischen Eigenschaften sind plasmonische Nanopartikel seit geraumer Zeit Gegenstand intensiver Forschung und gelten zudem als vielversprechende Materialien für den Einsatz in den Bereichen der Biosensorik, des Imaging, der optischen Antennen und Wellenleiter oder für die oberflächenverstärkte RAMAN-Spektroskopie.[1-5]

Die Bandbreite der verfügbaren Materialien reicht dabei von klassischen Edelmetallpartikeln (z. B. aus Gold oder Silber), welche eine Resonanzfrequenz im sichtbaren Bereich des elektromagnetischen Spektrums aufweisen, bis zu entartet dotierten Halbleiterpartikeln aus Kupferselenid oder ITO (mit Zinn dotiertes Indiumoxid), die aufgrund ihrer im Vergleich kleineren Anzahl an freien Ladungsträgern Licht aus dem nahinfraroten Bereich absorbieren. [6,7]

Nach wie vor werden in regelmäßigen Abständen Materialien entdeckt, welche als Nanopartikel aufgrund des Vorhandenseins einer ausreichenden Anzahl an freien Ladungsträgern eine lokalisierte Oberflächenplasmonenresonanz aufweisen.

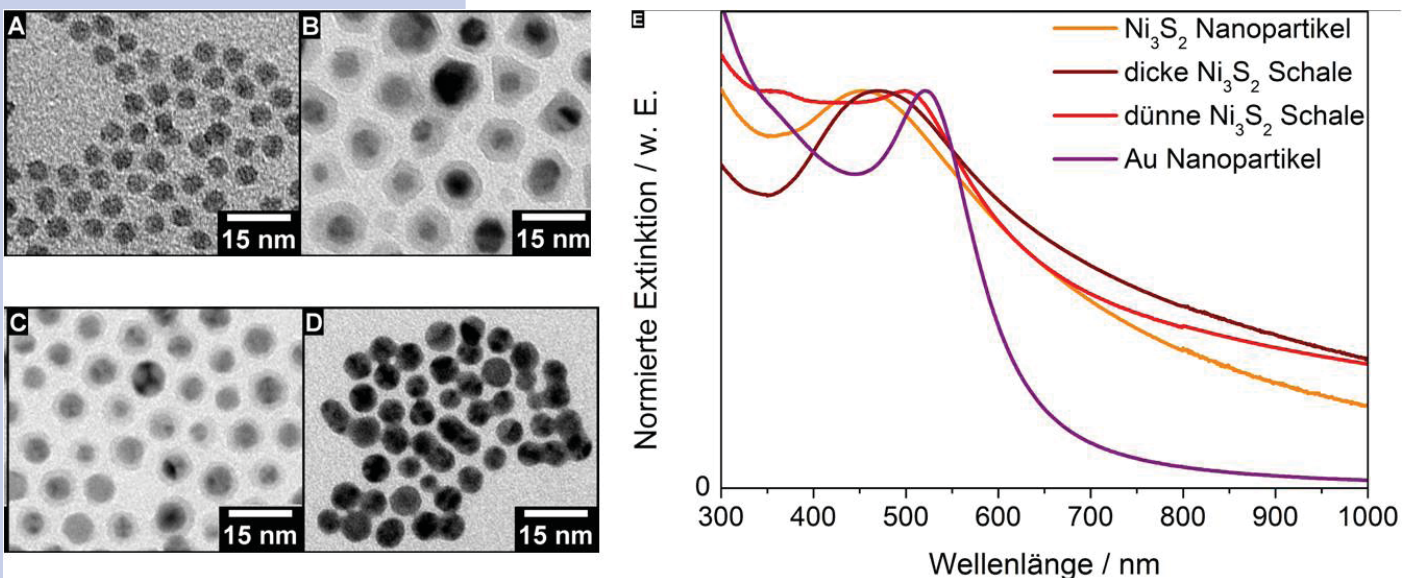


Abbildung 1: (A-D) TEM-Aufnahmen von Ni₃S₂ Nanopartikeln (A), Au-Ni₃S₂ Kern-Schale Partikeln mit einer dicken (B) beziehungsweise dünnen (C) Schale und puren Gold Keimen (D). (E) Normierte UV/vis/NIR-Extinktionsspektren der gezeigten Nanopartikel. Es ist zu erkennen, dass sich die Resonanzfrequenz der Kern-Schale Partikel mit steigender Schalendicke von der Lage der puren Gold-Keime zu dem Maximum der Ni₃S₂-Bande hin hypsochrom verschiebt.

Ein Beispiel hierfür sind Nanopartikel verschiedener metallischer Nickelsulfid-Phasen (hier vorrangig Polydymit und Heazlewoodit), welche wie die intensiv erforschten Edelmetallpartikel eine Resonanzfrequenz im sichtbaren Bereich des elektromagnetischen Spektrums zeigen und somit potentiell als deutlich kostengünstigere Alternative zu letzteren fungieren könnten.[8]

Im Rahmen dieses Projekts werden neben der Entwicklung und Verbesserung der Synthese dieser Nanopartikel ihre plasmonischen Eigenschaften erstmalig untersucht.

Ergebnisse

Es konnten erfolgreich sphärische Ni_3S_2 (Heazlewoodit) Nanopartikel mit einem bisher unerreichten Grad an Monodispersität hergestellt werden. Eine transmissionselektronenmikroskopische (TEM) Aufnahme der Partikel mit einem durchschnittlichen Durchmesser von $5,1 \pm 0,4$ nm ist in Abbildung 1A dargestellt. Sie weisen eine ausgeprägte Extinktionsbande bei etwa 453 nm auf (siehe Abbildung 1E), welche ihrer lokalisierten Oberflächenplasmonenresonanz zugeordnet werden kann.

Es wurden zudem Kern-Schale Nanopartikel (siehe Abbildung 1B+C) durch Ni_3S_2 Schalenwachstum auf Gold-Keimen (siehe Abbildung 1D) synthetisiert. Die Extinktionsbande der Partikel verschiebt sich mit zunehmender Schalendicke zu kürzeren Wellenlängen (siehe Abbildung 1E), da die Resonanzfrequenz des Schalenmaterials Ni_3S_2 größer ist, als die der Gold-Kerne.

Zusätzlich zu den plasmonischen Ni_3S_2 Nanostrukturen wurden literaturbekannte Ni_3S_4 (Polydymit) Nanostäbchen mit unterschiedlichen Aspektverhältnissen (AV) hergestellt.[9] TEM-Aufnahmen dieser Partikel sind in Abbildung 2A-C dargestellt. Es ist deutlich zu sehen, dass auch diese Nanopartikel eine ausgeprägte Resonanz im sichtbaren Bereich des Spektrums aufweisen (siehe Abbildung 2D).

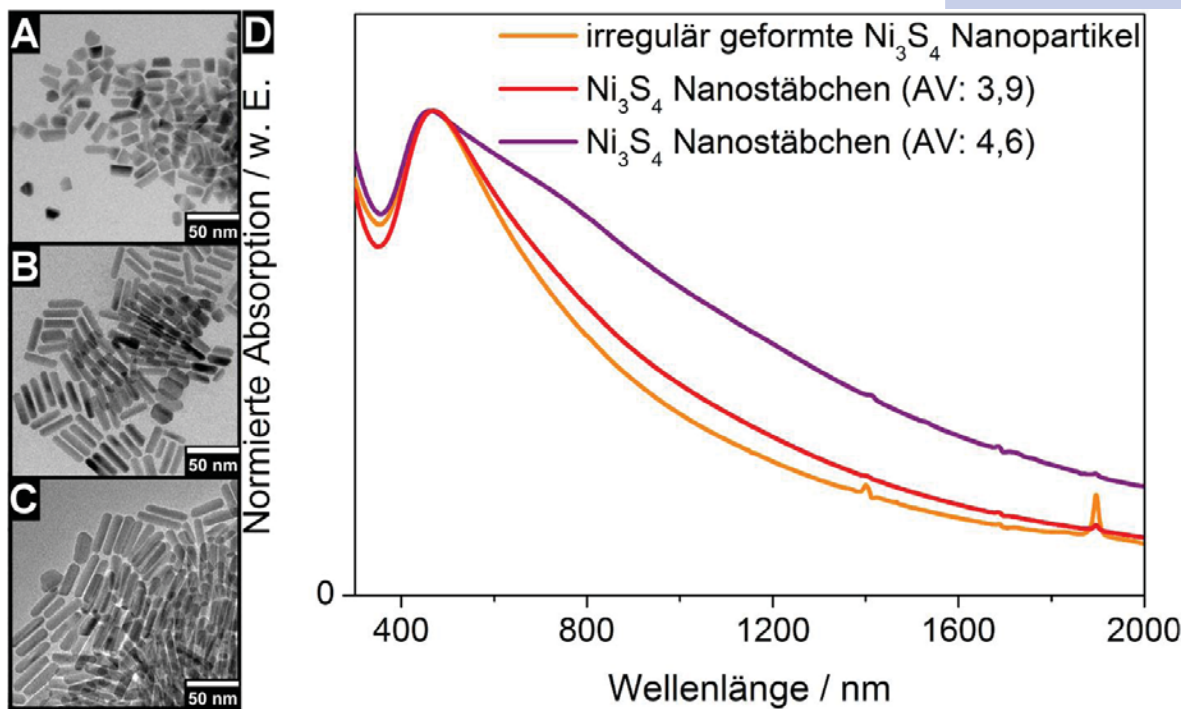


Abbildung 2: (A-C) TEM-Aufnahmen von irregulär geformten Ni_3S_4 Nanopartikeln (A) sowie Ni_3S_4 Nanostäbchen mit einem AV von 3,9 (B) beziehungsweise 4,6 (C). (D) Normierte UV/vis/NIR-Absorptionsspektren der entsprechenden Partikel. Mit wachsendem Aspektverhältnis nimmt die Absorption der Nanostäbchen im nahinfraroten Bereich deutlich zu.

Vergrößert sich das Aspektverhältnis der Stäbchen, so ist zudem eine steigende, breite Absorption im nahinfraroten Bereich zu erkennen, welche durch die unterschiedliche Resonanzfrequenz der Ladungsträgerdichte entlang der transversalen und der longitudinalen Achse der Nanopartikel erklärt werden kann. Da die zusätzliche lokalisierte Oberflächenplasmonenresonanz entlang der longitudinalen Achse jedoch stark gedämpft ist, ist im Absorptionsspektrum keine ausgeprägte Bande zu sehen.

Zusammenfassung

Es konnten erfolgreich plasmonische Nanostrukturen aus zwei unterschiedlichen Nickelsulfid-Phasen hergestellt werden, welche lokalisierte Oberflächenplasmonenresonanzen im sichtbaren Bereich des elektromagnetischen Spektrums aufweisen. Damit konnte das Forschungsgebiet der Materialien mit Resonanzfrequenzen in diesem Bereich, welches bisher vornehmlich von Edelmetallpartikeln dominiert wurde, durch deutlich kostengünstigere Materialien erweitert werden.

Die hier präsentierten Forschungsergebnisse und zusätzliche Messdaten sind verfügbar in Form von Quelle [8].

References

- [1] Anker, J. N.; Hall, W. P.; Lyandres, O.; Shah, N. C.; Zhao, J.; Van Duyne, R. P. Biosensing with Plasmonic Nanosensors *Nat. Mater.* 2008, 7, 442–453.
- [2] Jain, P. K.; Huang, X.; El-Sayed, I.; El-Sayed, M. A. Noble Metals on the Nanoscale: Optical and Photothermal Properties and Some Applications in Imaging, Sensing, Biology, and Medicine *Acc. Chem. Res.* 2008, 41, 1578-1568.
- [3] Mühlischlegel, P.; Eisler, H. J.; Martin, O. J. F.; Hecht, B., Pohl, D. W. Resonant Optical Antennas *Science* 2005, 308, 1607-1609.
- [4] Krenn, J. R. Nanoparticle waveguides: Watching energy transfer *Nat. Mater.* 2003, 2, 210-211.
- [5] Tian, Z. Q.; Ren, B.; Li, J. F.; Yang, Z. L. Expanding generality of surface-enhanced Raman spectroscopy with borrowing SERS activity strategy *Chem. Commun.* 2007, 34, 3514-3534.
- [6] Dorfs, D.; Härtling, T.; Miszta, K.; Bigall, N. C.; Kim, M. R.; Genovese, A.; Falqui, A.; Povia, M.; Manna, L. Reverse Tunability of the Near-Infrared Valence Band Plasmon Resonance in Cu₂-xSe Nanocrystals *J. Am. Chem. Soc.* 2011, 133, 11175–11180.
- [7] Kanehara, M.; Koike, H.; Yoshinaga, T.; Teranishi, T. Indium Tin Oxide Nanoparticles with Compositionally Tunable Surface Plasmon Resonance Frequencies in the Near-IR Region *J. Am. Chem. Soc.* 2009, 131, 17736–17737.
- [8] Himstedt, R.; Rusch, P.; Hinrichs, D.; Kodanek, T.; Lauth, J.; Kinge, S.; Siebbeles, L. A., Dorfs, D. Localized Surface Plasmon Resonances of Various Nickel Sulfide Nanostructures and Au-Ni₃S₂ Core-Shell Nanoparticles *Chem. Mater.* 2017, 29, 7371-7377.
- [9] Liu, Q.; Diaz, A.; Prosvirin, Z.; Luo, Z.; Batteas, D. Shape-controlled Synthesis of Nanopyramids and Nanoprisms of Nickel Sulfide (Ni₃S₄) *Nanoscale* 2014, 6, 8935-8942.

Graphen-ähnliche und leitfähige zweidimensionale Metallorganische Gerüstverbindungen als Nanosensoren

B.Hoppe^{1*}, K. Hindricks^{1*}, C. Belke^{2*}, A. Gehl^{3*}, R. Haug^{2*}, S. Zimmermann^{3*}, P.Behrens^{1*}

1 Institut für Anorganische Chemie, Callinstraße 9, 30167 Hannover, Germany

2 Institut für Festkörperphysik, Appelstraße 2, 30167 Hannover, Germany

3 Institut für Grundlagen der Elektrotechnik und Messtechnik, Appelstraße 9A, 30167 Hannover, Germany

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

In den letzten Jahren haben sich die metallorganischen Gerüstverbindungen (engl.: metal-organic frameworks, MOFs) zu einem bedeutenden Forschungsbereich entwickelt. Besonders die zum Teil extrem hohen spezifischen Oberflächen [1] in Kombination mit der Möglichkeit zur chemischen Modifizierbarkeit des gesamten Materials machen diese Materialklasse attraktiv für verschiedene Anwendungsgebiete, da die MOFs auf die gewünschte Fragestellung angepasst werden können. Trotz dieser Vielseitigkeit gibt es nur sehr wenige MOFs, die neben einem zugänglichen Porensystem eine wesentliche elektrische Leitfähigkeit aufweisen. Eine neue Gruppe sogenannter Graphen-ähnlicher MOFs mit einer hexagonalen Schichtstruktur vereint eben diese beiden Eigenschaften.[2,3] Zusätzlich wird durch die Einlagerung von Gastmolekülen in das Porensystem die elektrische Leitfähigkeit verändert [4,5], weshalb diese Materialien für die Verwendung in schnellen und effektiven Sensoren getestet werden sollen.

Aus chemischer Sicht ist die Beeinflussung des Kristallwachstums und damit des Kristallhabitus von zentraler Bedeutung. Bei Betrachtung der Kristallstruktur dieser 2D Schicht-Materialien (Fig. 1) wird deutlich, dass durch diese Einflussnahme das Verhältnis von Porenvolumen zu Porenlänge beeinflusst werden kann. Das Produkt der in der Literatur beschriebenen besteht aus stäbchenförmigen Partikeln, bei denen das Kristallwachstum vorwiegend entlang der Stapelrichtung erfolgt. Solche Partikel haben vergleichsweise lange eindimensionale Poren. Innerhalb solcher Poren ist die Diffusion von Gästen sehr langsam, was eine solche Partikelform für schnelle Sensorvorgänge weniger günstig erscheinen lässt. Durch die Beeinflussung des Wachstums

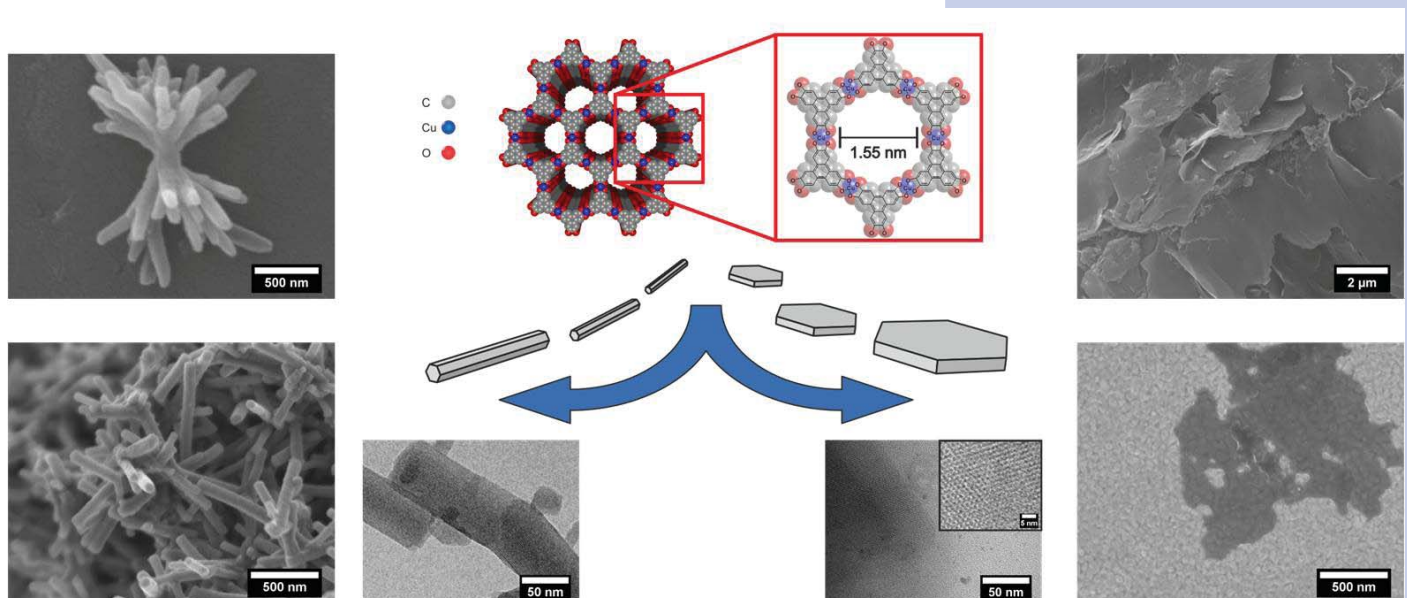


Fig.1: Modell der simulierten Struktur (oben Mitte) des Graphen analogen Cu_3hhtp_2 -MOFs zusammen mit REM sowie TEM Bildern von Partikeln mit unterschiedlicher Morphologie.

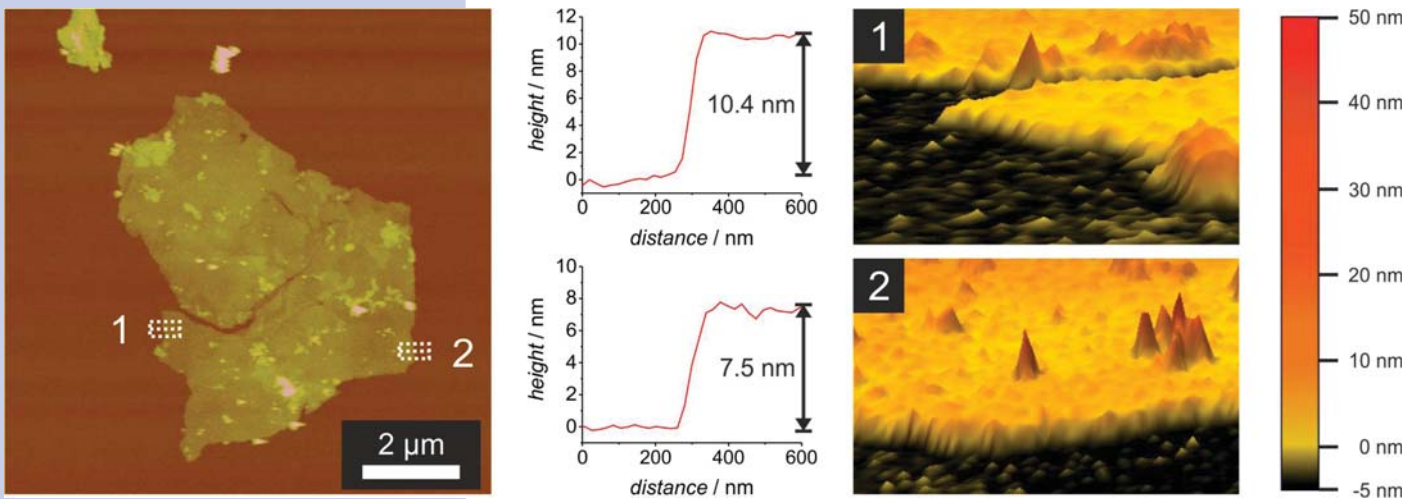


Fig.2: AFM-Aufnahme eines einzelnen Partikels mit Höhenbestimmung.

ist es möglich, plättchenförmige Partikel zu erzeugen und so die Länge der Poren zu reduzieren. Bei gleichem Gesamtporenvolumen sollte dieses Material eine wesentlich bessere Diffusionskinetik aufweisen, da mehr und kürzere Poren vorhanden sind.

Neben der Beeinflussung des Porensystems wird bei der Veränderung des Partikelwachstums auch die Ausdehnung des konjugierten π -Systems des Materials verändert. Analog zu Graphit [6] ist zu vermuten, dass die elektrische Leitfähigkeit innerhalb der Schichten besser ist als senkrecht dazu. Dementsprechend sollten dünne Partikel mit großer Ausdehnung in den Schichten von Interesse, da diese eine bessere Leitfähigkeit bieten sollten. Mit Hilfe der Rasterkraftmikroskopie konnte eine Partikeldicke zwischen 7.5 und 10.4 nm bestimmt werden (Fig. 2). Um die zuvor genannte Hypothese zu verifizieren, ist die Kontaktierung einzelner Partikel mit entsprechenden Geometrien vorgesehen. Neben den Untersuchungen zur elektrischen Leitfähigkeit in Abhängigkeit der kristallographischen Orientierung sind aber auch die Art der Ladungsträger sowie der Mechanismus der Ladungsträgerleitung bisher nicht geklärt und zentraler Punkt aktueller Forschung.

Neben der Charakterisierung von Einzelpartikeln ist zusätzlich auch die Verwendung dieses Materials im Verbund als Beschichtung verschiedener Oberflächen von Interesse. Durch die Verwendung wasserbasierter Dispersionen hat sich die Sprühbeschichtung als sehr zuverlässige Methode etabliert. Die Verwendung automatisierter Sprühroboter ermöglicht zusätzlich eine großflächige Beschichtung bei gleichbleibender Qualität. Durch die Verwendung von Tensiden ist es außerdem möglich mit bis zu 20 S cm^{-1} für diese Materialklasse vergleichsweise hohe spezifische Leitfähigkeiten zu erhalten. Ebenso ermöglicht die Beschichtung von Polymerfolien einen Einsatz von MOFs im Bereich der flexiblen Elektronik (Fig. 3).

Vorversuche (Fig. 4A) haben gezeigt, dass es möglich ist auf diese Weise sehr sensitive Filme zu erhalten, die schnell auf Testgase wie Kohlenstoffdioxid oder Methanol in einem Trägergasstrom reagieren. Für weitere Untersuchungen zu den Sensoreigenschaften soll das Material auf Interdigitalelektroden aufgebracht werden und es sollen quantitative Messungen mit verschiedenen Analytkonzentrationen durchgeführt werden (Fig. 4B). Des Weiteren sollen in Zukunft die zuvor kontaktierten Einzelpartikel ebenso als Sensor getestet und eingesetzt werden, wodurch ein Einzelpartikel-Nanosensor ermöglicht werden könnte.

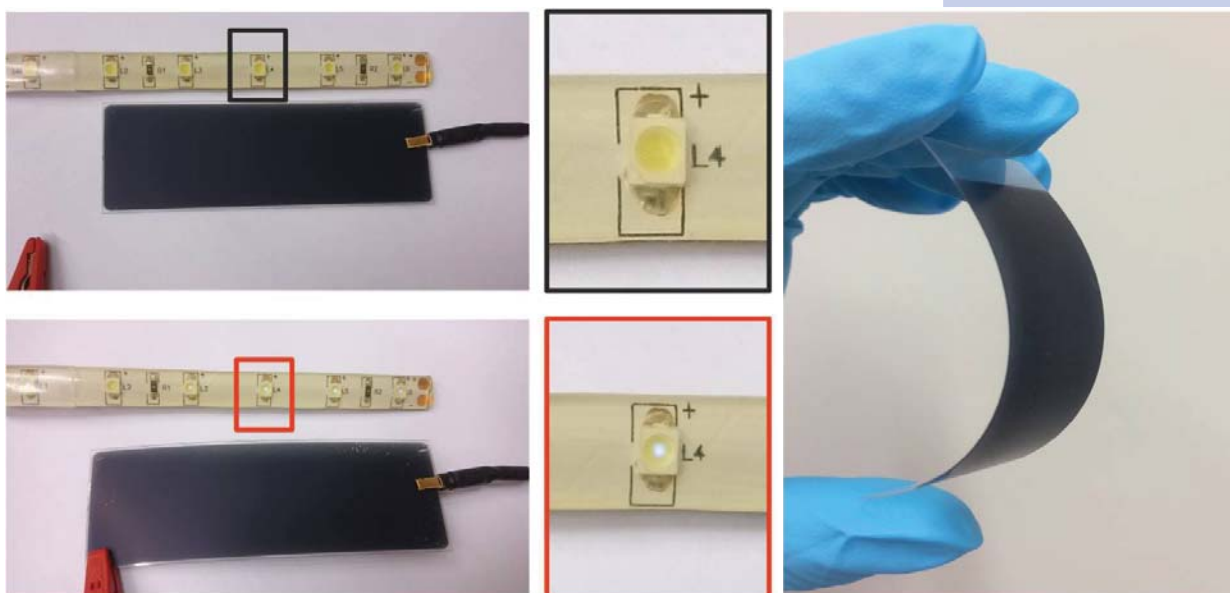


Fig.3: Mit Cu_3hhtp_2 beschichtete flexible Polymerfolie verbunden mit einem LED-Streifen. Die Beschichtung sowie die Leitfähigkeit bleiben auch nach mehrmaligem Biegen der Folie stabil.

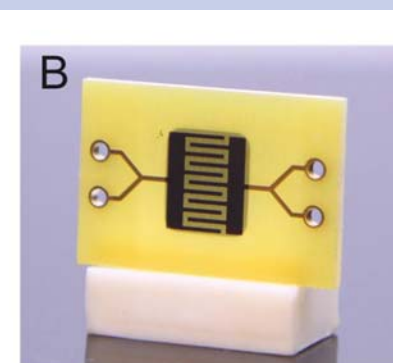
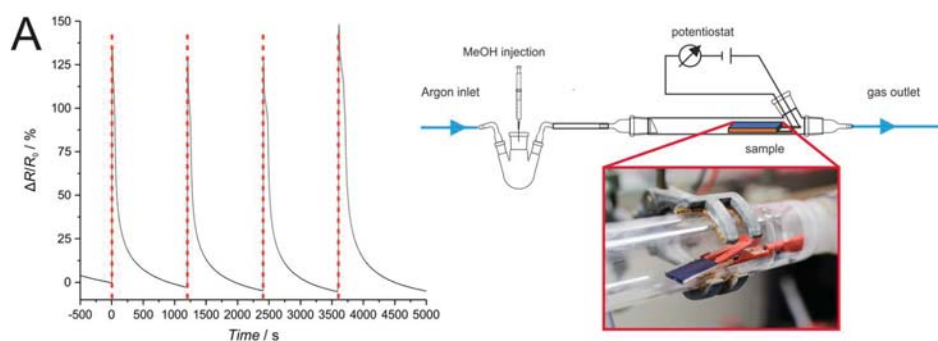


Fig.4: (A) Vorversuch zur Testung von beschichteten Glaträgern. Die rot markierten Zeitpunkte repräsentieren die Injektionszeit von jeweils $20\ \mu\text{L}$ Methanol in den Gasstrom. (B) Beschichtete Interdigitalelektrode für quantitative Sensormessungen.

References

- [1] M. Farha, I. Eryazici, N. Jeong, B. Hauser, C. Wilmer, A. Sarjeant, R. Snurr, S. Nguyen, A. Yazaydin, J. Hupp, *J. Am. Chem. Soc.* 2012, 134, 15016
- [2] M. Hmadeh, Z. Lu, Z. Liu, F. Gandara, H. Furukawa, S. Wan, V. Augustyn, R. Chang, L. Liao, F. Zhou, E. Perre, V. Ozolins, K. Suenaga, X. Duan, B. Dunn, Y. Yamamoto, O. Terasaki, O. Yaghi, *Chem. Mater.* 2012, 24, 3511
- [3] D. Sheberla, L. Sun, M. Blood-Forsythe, S. Er, C. Wade, C. Brozek, A. Aspuru-Guzik, M. Dinca, *J. Am. Chem. Soc.* 2014, 136, 8859
- [4] M. Campbell, D. Sheberla, S. Liu, T. Swager, M. Dinca, *Angew. Chem. Int. Ed.* 2015, 54, 4349
- [5] M. Campbell, S. Liu, T. Swager, M. Dinca, *J. Am. Chem. Soc.* 2015, 137, 13780
- [6] H. Pierson, *Handbook of carbon, graphite, diamond and fullerenes: properties, processing, and applications* 1993

Spin and reoccupation noise beyond the fluctuation-dissipation theorem

J. Wiegand^{1,*}, D. S. Smirnov², J. Hübner^{1,*}, M. M. Glazov², and M. Oestreich^{1,*}

¹ *Institut für Festkörperphysik, Leibniz Universität Hannover, Appelstraße 2, 30167 Hannover, Germany*

^{*} *Laboratorium für Nano- und Quantenengineering, Schneiderberg 39, 30167 Hannover, Germany*

² *Ioffe Institute, Polytechnicheskaya 26, 194021 St. Petersburg, Russia*

InGaAs quantum dots (QDs) hosting a single hole-spin are particularly promising solid-state candidates for spin-photon devices in view of quantum information processing [1]. They provide very long coherence times and a large spin-photon coupling strength, which can be further enhanced by embedding the QDs in a Bragg mirror cavity, enabling efficient spin detection and manipulation [2]. We investigate the spin and charge dynamics in such a coupled QD microcavity system under strong driving by a quasi-resonant light field addressing the relevant optical transition for spin-photon interfaces.

The spin dynamics of semiconductor systems can be optimally studied by spin noise (SN) spectroscopy, a quantum optical method that has been very successfully transferred to semiconductor physics during the last decade [3]. The fundamental principle of this method is to map stochastic spin fluctuations - referred to as spin noise - onto the polarization of a non-resonant weakly interacting probe laser via Faraday or Kerr rotation. The fluctuation-dissipation theorem states that the full dynamics of the spin system can then be derived from these fluctuations measured in thermal equilibrium. Driving the spin system by a strong resonant light field creates a highly non-equilibrium situation that requires a special theoretical analysis beyond the fluctuation-dissipation theorem. As will be shown below, the non-equilibrium SN spectroscopy is capable to deliver information not only about the spin dynamics in the ground and the excited state, but also about charge dynamics in the strongly driven QD.

The measurement setup (Fig. 1(a)) is a home-built low-temperature confocal microscope that enables photoluminescence (PL) characterization and SN spectroscopy on a specific QD via the same optical path. Figure 1(b) shows a typical PL spectrum of a single QD with the optical transition of the exciton

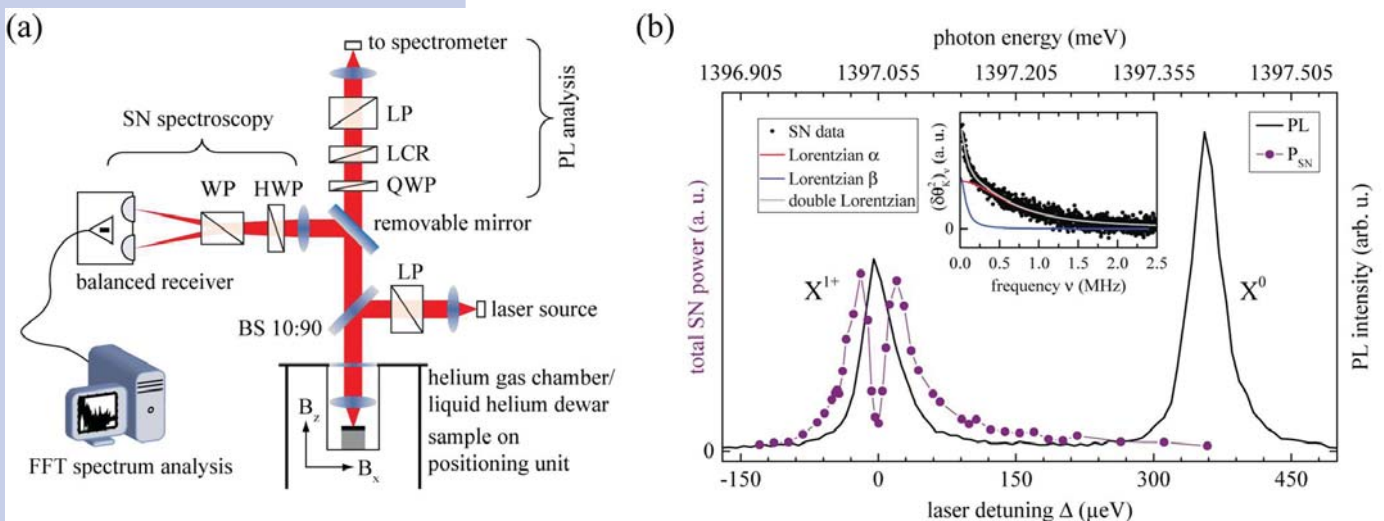


Fig. 1: (a) Experimental setup for PL analysis and SN spectroscopy on a single QD. (b) PL spectrum of a single QD showing the optical transition of the neutral exciton (X^0) and the positively charged trion (X^{1+}). The purple data points depict the SN power measured as a function of probe laser detuning with respect to the trion resonance. The inset shows a typical SN frequency spectrum revealing two Lorentzian noise contributions.

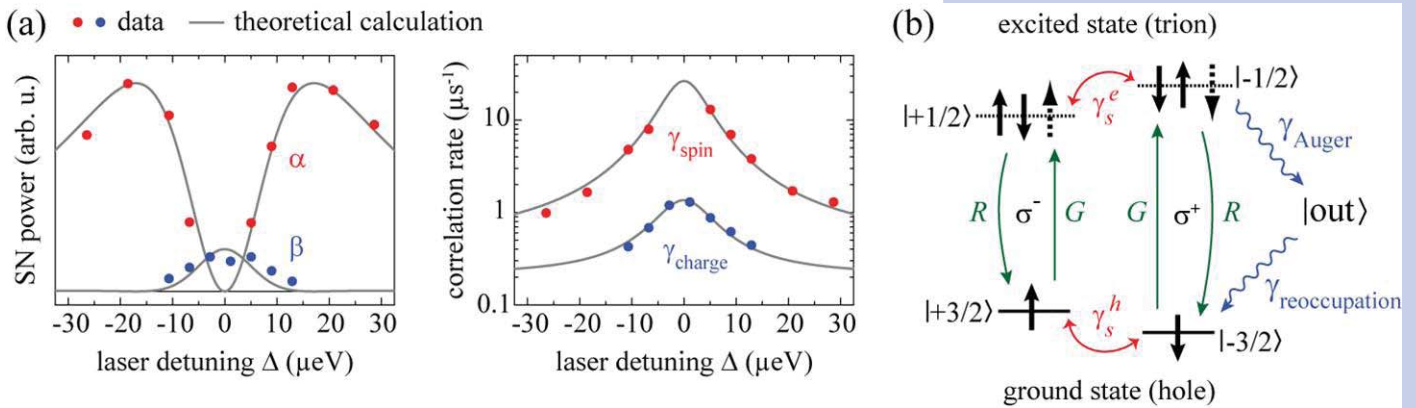


Fig. 2: (a) SN power and correlation rate of the two Lorentzian noise contributions α and β as a function of laser detuning. (b) Sketch of the QD states and the relevant transitions considered for the theoretical calculation.

(X^0) and the positively charged trion (X^{1+}) which indicates a resident hole in the QD. The noise of the hole spin can be sensed by tuning the probe laser over the X^{1+} transition which is quantified by the measured SN power shown as purple data points in Fig. 1(b). The distinct shape of the SN power curve with two sharp maxima around the resonance is characteristic for a SN measurement on a single homogeneously broadened QD transition. This is very special for a QD in an unbiased solid-state structure, as the transitions are usually inhomogeneously broadened due to charge fluctuations in the environment which also influence the spin dynamics [4]. To study dynamics the SN is analyzed in the frequency domain. A typical SN frequency spectrum is shown in the inset of Fig. 1(b). It consists of two Lorentzian contributions with a different width, which corresponds to a correlation rate, and a different area corresponding to the SN power. These two Lorentzian noise contributions α and β are analyzed separately regarding their SN power and correlation rate as a function of laser detuning in Fig. 2(a).

The SN power spectra exhibit a differing dependence on the detuning which supports the identification of the underlying mechanism linked to the respective noise contribution by theoretical calculation. The calculations shown by the gray lines in Fig. 2(a) are in excellent agreement with the measured data. They are based on a four level system of the QD spin states as depicted in Fig. 2(b).

The SN power spectrum of the α contribution, which drops to zero at the resonance, can be assigned to the spin fluctuations. For large laser detunings, i.e. negligible optical excitation, the SN measurement yields the dynamics of the hole spin in the QD ground state with a long spin relaxation time of 2.5 μs deduced from the correlation rate. At small laser detunings absorption of the probe laser leads to generation of the trion, which is composed of a hole singlet state and an unpaired electron spin (cf. Fig. 2(b)). Hence, close to the resonance we measure the dynamics of the electron spin in the excited state which has a significantly shorter relaxation time of 30 ns. The correlation rate profile measured in Fig. 2(a) is obtained by the weighted sum of hole and electron spin relaxation rates and is proportional to the light absorption.

The second Lorentzian noise contribution β , which has a maximal SN power at the resonance, is found to belong to a different kind of noise linked to the charge state of the QD. The generation of a trion by light absorption is followed by recombination back to the QD ground state. The recombination energy is usually emitted radiatively, but it can also be transferred to the resident hole leading to the ejection of the hole from the QD (Auger process). The empty QD is reoccupied after a certain time via tunneling of a hole from an outer state in the solid-state environment (see Fig. 2(b)). The observation of this occupation noise in SN spectroscopy is possible due to a small magnetic field applied to sample which results in a finite Kerr rotation angle only in the case

of an occupied QD. A magnetic field dependence of the β SN power proves the correct identification of this contribution [5]. The corresponding correlation rate yields the rate of the Auger process and increases proportional to the absorption as the probability for the Auger effect increases proportional to the population of the trion states. We extracted an Auger rate of $2.9 \mu\text{s}^{-1}$ which is in good agreement with the value found in [6] for similar QDs. For large laser detuning the correlation rate approaches the hole tunneling rate which yields an estimate of about $5 \mu\text{s}$ tunneling time for the reoccupation of the QD.

In summary, we have measured the non-equilibrium SN of a homogeneously broadened single QD in a microcavity. The measurements in combination with a theoretical analysis beyond the fluctuation-dissipation theorem reveal the spin dynamics in the ground and the excited state of the strongly driven artificial atom which is potentially useful for spin-photon interfacing. In addition, the measurements reveal a new noise contribution due to temporary escaping of the resident hole in the QD which may be parasitic for spin-photon interfacing. We expect that the reoccupation of the QD becomes slower with decreasing background doping densities leading to the conclusion that QDs in unbiased structures are disturbed by charge fluctuations at high background doping densities and by slow reoccupation at low background doping densities.

References:

- [1] A. Imamoglu et al., Phys. Rev. Lett. 83, 4204 (1999).
- [2] V. Giesz et al., Commun. 7, 11986 (2016).
- [3] J. Hübner et al., phys. stat. sol. (b) 251, 9 (2014).
- [4] R. Dahbashi et al., Phys. Rev. Lett. 112, 156601 (2014).
- [5] J. Wiegand et al., arXiv:1708.01245 (2017).
- [6] A. Kurzman et al., Nano Letters 16, 3367 (2016).

Improved hydrogen selectivity of Surface Modified Graphite (SMG) membranes: Permeation experiments and characterisation by micro-Raman spectroscopy and XPS

A. Wollbrink^{a,*}, C.H. Rüscher^{b,*}, K. Volgmann^a, J. Koch^c, A. Breuksch^a, C. Tegenkamp^{c,*}, J. Caro^{a,*}

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

b Institute of Mineralogy, Leibniz University Hannover, Callinstr. 3, D-30167 Hannover, Germany

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

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

Zusammenfassung und Motivation

Graphit ist ein preiswertes 2D-Kohlenstoffmaterial, dessen Flocken sich durch uniaxiales Pressen relativ leicht zu etwa 1 mm dicken Scheiben verformen lassen. Diese verpressten Graphitscheiben wurden als gastrennende Membran evaluiert. Bereits ohne jegliche Oberflächenbehandlung ergaben sich überraschend hohe Trennfaktoren in der Abtrennung von Wasserstoff aus den Gemischen mit Kohlendioxid und Wasserdampf von $\alpha(\text{H}_2/\text{CO}_2) = 5$ und $\alpha(\text{H}_2/\text{H}_2\text{O}) = 6$ bei 140°C. Im Projekt zeigen wir, dass durch Oberflächensilanierung dieser Trenneffekt weiter gesteigert werden kann auf $\alpha(\text{H}_2/\text{CO}_2) = 9$ und $\alpha(\text{H}_2/\text{H}_2\text{O}) = 10$ bei 140°C. Durch Zusammenarbeit im LNQE konnte durch XPS und Micro-Raman der molekulare Mechanismus der Wechselwirkung aufgeklärt und verstanden, und dadurch letztlich optimiert werden. Die oberflächenmodifizierten Graphite werden „surface modified graphite“ (SMG) genannt.

Während der Stofftransport durch die unbehandelten verpressten Graphitflocken durch ein einfaches ideales Knudsenmodell beschrieben werden kann, wird der Stofftransport durch die SMG-Schichten infolge Oberflächen-Silanierung modifiziert. Es kommt zu neuen sterischen und adsorptiven Wechselwirkungen, die das Transportverhalten durch Diffusion und Adsorption verändern.

Die Abbildung 2 zeigt das Photoelektronen XPS C 1s-Spektrum von Graphit. Es können mehrere C-Species unterschieden werden: Hauptsignal II stammt vom Graphit als sp^2 -hybridisierter Kohlenstoff. Signal III steht für sp^3 -hybridisierten amorphen Kohlenstoff, der im Ausgangsmaterial vorhanden und eigentlich unerwünscht ist. Die Oberfläche der Graphitflocken enthält auch Carbonylgruppen (IV) und Carboxylgruppen (V). Herstellungsbedingt, treten auch hydrophobie-rende CF-Gruppen auf (Signale VI und VII).

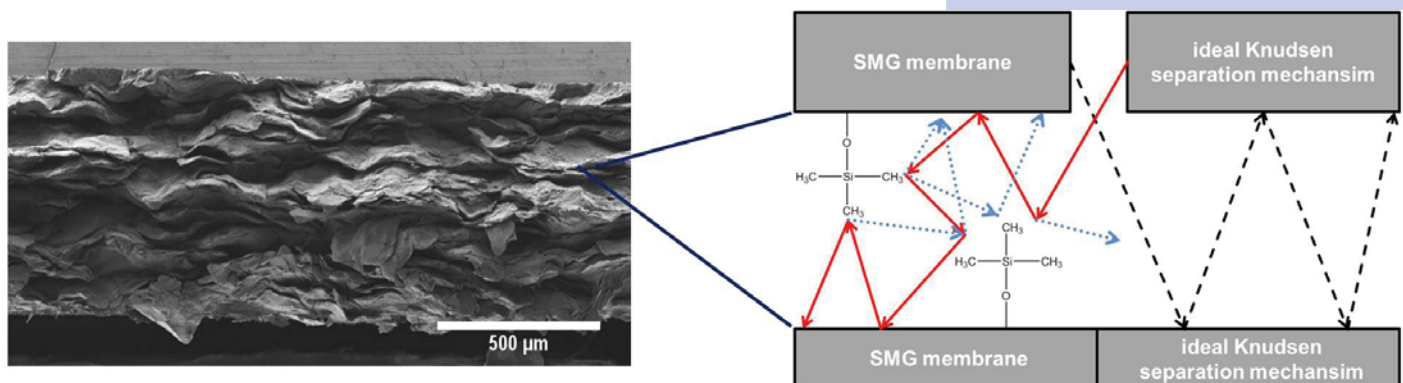


Abbildung 1: Der Stofftransport durch oberflächenmodifiziertes Graphite wird durch die Oberflächen-Silanierung modifiziert.

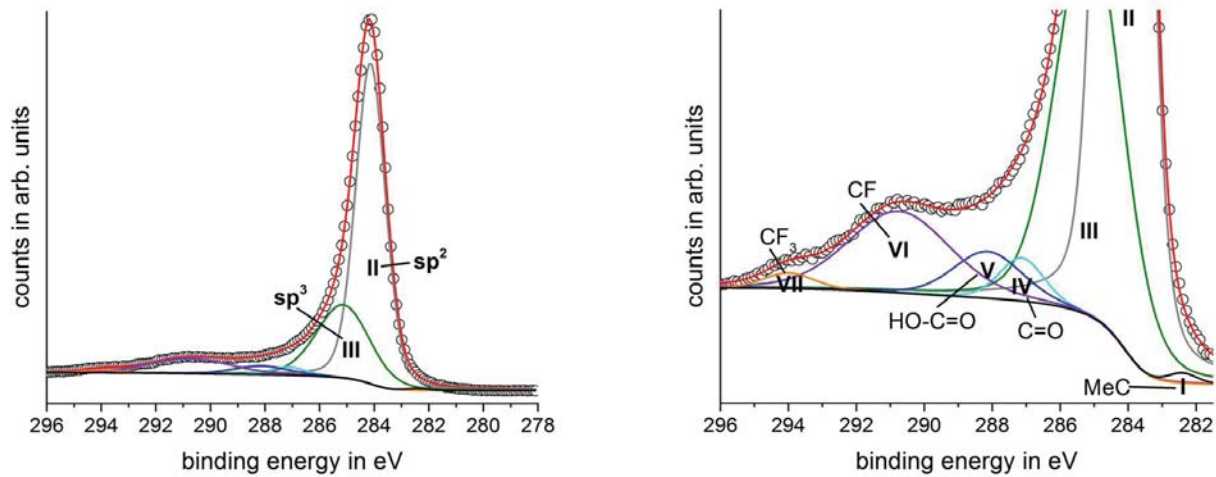


Abbildung 2: Photoelektronen XPS C 1s-Spektrum von Graphit.

Die SMG-Membran wurde entwickelt, um unter in situ-Bedingungen den Wasserstoff während des Steam-Reformings von Bio-Methan und Bio-Ethanol abzuziehen und dadurch die Gleichgewichtslimitierung des Dampfreformierens zu umgehen: $\text{CH}_4 + 2 \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons 4 \text{H}_2 + \text{CO}_2$ und $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH} + 3 \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons 6 \text{H}_2 + 2 \text{CO}_2$. Die Herausforderung bestand darin, eine Membran zu entwickeln, die im Beisein von Kohlendioxid und Wasserdampf bei Temperaturen über 100 °C selektiv für Wasserstoff ist. Dieses Problem wurde wie beschrieben gelöst.

References

Das Projekt wurde im renommierten Journal of Membrane Science veröffentlicht:

A. Wollbrink, C.H. Rüscher, K. Volgmann, J. Koch, A. Breuksch, C. Tegenkamp, J. Caro (2017): Improved hydrogen selectivity of surface modified graphite (SMG) membranes: Permeation experiments and characterization by micro-Raman spectroscopy and XPS, *J. Membr. Sci.* 528 (2017) 316-325
DOI: 10.1016/j.memsci.2016.12.067

Development of 3D human cells-based microvessels microfluidic model for replacement of animals in microvascular disease study

B. Chichkov¹, Roman Kiyani², and H. Haller³

1 Institut für Quantenoptik LUH

2 Laboratorium für Nano- und Quantenengineering

3 Klinik für Nieren- und Hochdruckerkrankungen MHH

It has been recognized that microcirculation plays an important role in pathogenesis of many diseases. Understanding and regulation of microvasculature are urgently needed for developing effective therapeutic strategies. However, suitable models allowing in depth biomedical research of microcirculation are missing. Most of the research is performed with the use of animal models. The main aim of the project is to develop human cells-based microvessel microfluidic model (HZ-MMM). Vessels are grown from microvascular endothelial cells (EC) and accompanying cells in a microfluidic device by the process of angiogenesis. The model is adjusted for applications in basic research and drug development.

In the Seventh Report from the Commission to the Council and the European Parliament on the Statistics of the number of animals used for experimental and other scientific purposes in the member states of the European Union it is stated that the general number of animals used for experimental and other scientific purposes has decreased to just below 11,5 million [1]. On the contrary, the number of animals used for fundamental biological studies has increased by 21% since 2010. The number of animals used for drug research and development has also increased. This statistics necessitates further attempts to establish and integrate alternative models of experimentation into basic and transitional research.

At present, in vivo animal models are the main tools for studying microcirculation. Experimental approaches are mainly based on imaging of prepared tissues on anesthetized animal. This approach assumes induction of diseased conditions followed by observations on animal for several hours and leads inevitably to the sacrifice of the animal after the experiment is completed. Rodents and bigger animal (rabbits, newborn pigs) are used for such kind of research. However, despite recognized limitations of animal kidney disease

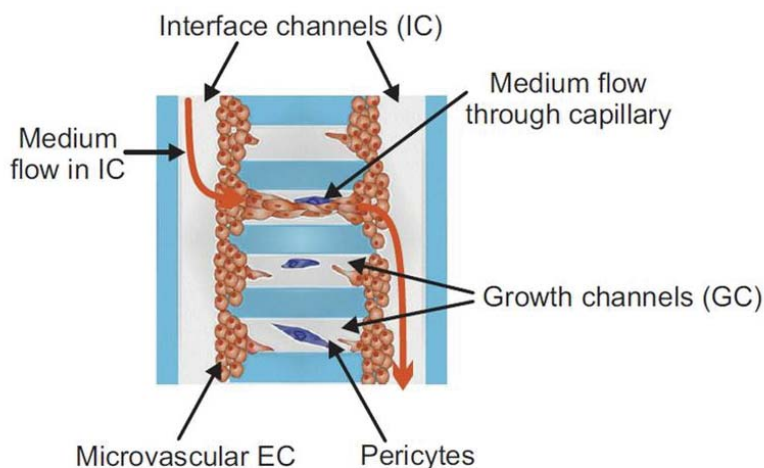


Figure 1: Schematic of the KABA-chip and microvessels angiogenesis in the chip.

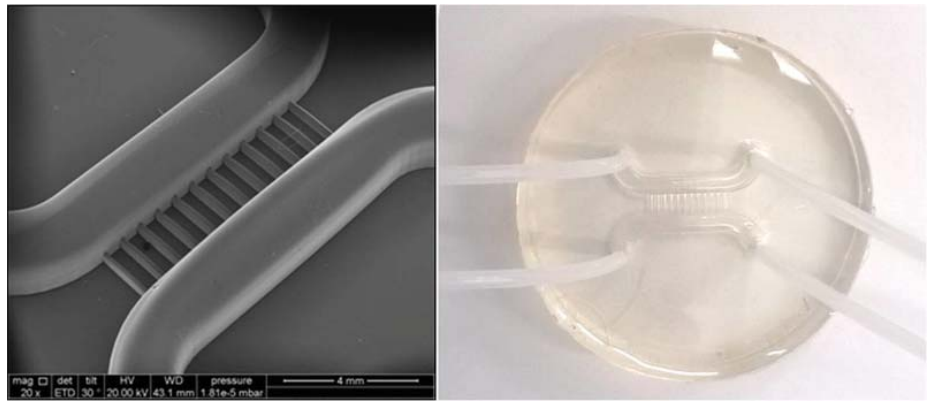


Figure 2: Scanning electron microscope image of the KABA-chip replicated in PDMS (Left) and assembled KABA-chip (Right). This chip contains 12 growth channels of $200 \times 200 \mu\text{m}$ cross-section and 2 mm long. Cross-section of the medium flow channels is $1 \times 2 \text{ mm}$.

models [2,3], rats and mice remain the favorite models. Considering multiple limitations of in vivo approach, like effects of anesthesia and tissue preparation surgery, large number of animals required to reach high quality statistical results, difference between human and animal studies, this research leads to unjustified animal suffering. In the frames of 3R strategy [4], the HZ-MMM should replace animals in basic research and reduce the number of animals used at the development stage to the minimal required for pharmacokinetic optimization and toxicity.

In this project, microfluidic chip for controllable growth of microvessels (Kapillar- und Arteriolen Bildung durch den Prozess der Angiogenese, KABA-chip) and microfluidic actuation platform for operation of this chip are developed. Principles of the chip operation and microvessels formation are shown schematically in Fig. 1.

The KABA-chip is molded in polydimethylsiloxane (PDMS) and covered by glass slide using plasma bonding [5]. The new approach is implemented for fabrication of the mould by direct laser writing in the photo-resist using two-photon polymerization (2PP) technique [6]. 2PP technique allows 3D fabrication of polymer objects with sub- μm resolution. Since lithographic mask is not needed for this process, fabrication of mould is very flexible allowing fast production of moulds of any desired complexity. Ability of 2PP direct laser writing to create 3D structures with sub-micrometer resolution is crucial in fabrication of the KABA-chip. An example of the chip replicated in PDMS is shown in Fig. 2 (Left).

Angiogenesis in the KABA-chip was achieved by seeding endothelial human cells and fibroblasts into the medium flow channels. The angiogenesis is starting on the fourth day after seeding. An example of the microvessel grown into the thin channel is shown in Fig 3.

In conclusion, formation of blood microvessels in newly developed KABA-chip has been demonstrated. Further objective is to achieve the microvessel penetration through the whole length of the growth channels and perfusion of the microvessel by liquid in controllable way. The developed model will be applied for studies of microcirculation disorders.

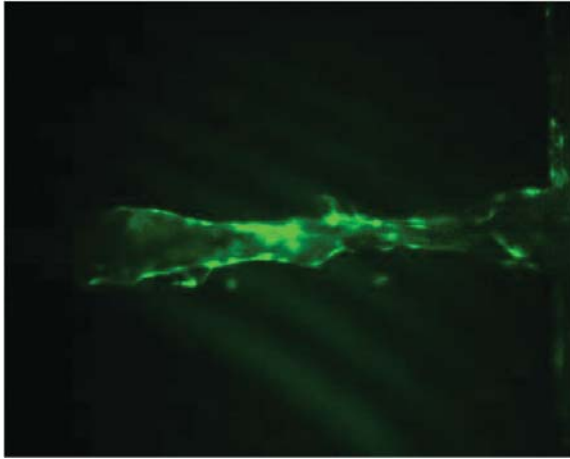


Figure 3: Scanning confocal microscopy image of the fibroblasts assisted angiogenesis in KABA-chip. The image is recorded on the seventh day after seeding.

References

- [1] ec.europa.eu/environment/chemicals/lab_animals/reports_en.htm
- [2] Becker GJ, Hewitson TD (2013) Animal models of chronic kidney disease: useful but not perfect. *Nephrol Dial Transplant* 28: 2432-2438.
- [3] Susztak K, Bitzer M, Meyer TW, Hostetter TH (2008) Animal models of renal disease. *Kidney Int* 73: 526-528.
- [4] Russell, W.M.S. and Burch, R.L., *The Principles of Humane Experimental Technique*, Methuen, London, 1959
- [5] D.C.D. Duffy, J.C.J. McDonald, O.J.O. Schueller, G.M.G. Whitesides. Rapid prototyping of microfluidic systems in poly(dimethylsiloxane). *Anal. Chem.* 70, 4974–4984 (1998).
- [6] M. Farsari, B. Chichkov, Two-photon fabrication. *Nat. Photonics* 8, 450–452 (2009).



Leibniz Universität Hannover
Laboratorium für Nano- und Quantenengineering
Schneiderberg 39
30167 Hannover
Germany
www.LNQE.uni-hannover.de