



LNQE

Laboratorium für  
Nano- und Quantenengineering

11  
102  
1004

Leibniz  
Universität  
Hannover

# Jahresbericht 2008

Laboratorium für Nano- und Quantenengineering

# Annual Report 2008

Laboratory of Nano and Quantum Engineering

## Seite | Inhalt

Page | Content

- 2 | Grußworte  
*Greetings*
- 4 | Ziel des Laboratoriums  
*Goals of the Laboratory*
- 6 | Forschungsbereiche  
*Research Areas*
- 8 | Nanoelektronik  
*Nanoelectronics*
- 10 | Nanomaterialien  
*Nanomaterials*
- 12 | Quanten-, Bio- Nanoengineering  
*Quantum, Bio and Nano-engineering*
- 14 | Mechanik/Magnetik  
*Mechanics/Magnetics*
- 16 | Mitglieder  
*Members*
- 22 | Forschungsneubau  
*New research building*
- 28 | Studiengang Nanotechnologie  
*Study Course Nanotechnology*
- 32 | Aktuell in 2008  
*News in 2008*
- 41 | NanoDay 2008  
*NanoDay 2008*
- 44 | Kolloquien in 2008  
*Colloquia in 2008*
- 45 | Pressespiegel  
*Press Review*
- 46 | Projekte  
*Projects*
- 75 | Impressum  
*Imprint*

Grußworte/*Greetings*

Sehr geehrte Leserin, sehr geehrter Leser,

Nanotechnologie ist ein hochinteressantes Forschungsgebiet, das die Basis für neuartige und innovative Anwendungen und Produkte darstellt. Um die Technologie auf der Nanometerskala zu beherrschen und die faszinierenden physikalischen Abläufe dort zu verstehen, bedarf es des Know-hows verschiedenster Fachdisziplinen. Im Laboratorium für Nano und Quantenengineering (LNQE) der Leibniz Universität Hannover haben sich Naturwissenschaftler und Ingenieure aus zurzeit 24 verschiedenen Arbeitsgruppen interdisziplinär vernetzt, um gemeinsam Fragestellungen der Nanotechnologie zu beantworten.

Der vorliegende Jahresbericht stellt das LNQE vor und fasst die wichtigsten Ereignisse des Jahres 2008 aus Sicht des Laboratoriums zusammen.

Von besonderer Bedeutung für das Laboratorium ist der LNQE-Forschungsneubau am Schneiderberg in Hannover. Hier entstehen für rund 14 Mio. Euro auf insgesamt 3.500 qm neue Labore, Büros und ein großer Forschungsreinraum. So werden exzellente Forschungsbedingungen für gemeinsame interdisziplinäre Forschung auf Spitzenniveau geschaffen.

Das Bauvorhaben wurde im Juli 2008 erneut durch den Wissenschaftsrat evaluiert. Das LNQE-Bauvorhaben belegte dabei einen sehr guten fünften Platz in der Reihung der insgesamt 16 empfohlenen Bauten, sechs Vorhaben wurden abgelehnt. Durch die Bewilligung der Förderung durch die Gemeinsame Wissenschaftskonferenz von Bund und Ländern im Oktober 2008 wird das Bauvorhaben durch weitere Bundesmittel in Millionenhöhe unterstützt und die Bedeutung des LNQE unterstrichen.

Nach einem Jahr Bauzeit feierte das LNQE im September 2008 unter Beisein von Wissenschaftsminister Lutz Stratmann das Richtfest des neuen Forschungsneubaus. Wenn trotz des kalten Winters der Bauzeitenplan eingehalten werden kann, dann wird das

*Dear readers,*

*Nanotechnology is a highly interesting field of research which is the basis for novel and innovative applications and products. To control the technology on the nanoscale and to understand the fascinating physical processes there, the know-how of most different academic disciplines is needed. In the Laboratory of Nano and Quantum Engineering (LNQE) of the Leibniz Universität Hannover (Germany) natural scientists and engineers from currently 24 different work groups are interdisciplinary, interconnected to answer jointly questions of nanotechnology.*

*The present annual report introduces the LNQE and sums the most important events of the year 2008 from the laboratory's point of view up.*

*Of particular importance for the laboratory is the new LNQE research building at Schneiderberg in Hannover/Germany. Here for about 14 Mio. Euros on in total 3.500 sqm arise new labs, new offices and a large research clean room. Thus, new excellent research conditions for joint interdisciplinary research on the top level are created.*

*The building project was evaluated again in July 2008 by the German Wissenschaftsrat. The LNQE building project became a very good 5th place of in total 16 recommended buildings. Six further building were declined. With the approval of the grants by the Joint Science Conference of the Federal Government and the Länder the building project is funded with additional federal funds amounting to millions and the importance of the LNQE is underlined.*

*After one year building time the LNQE celebrated in September 2008 under presence of Minister of Science Lutz Stratmann the topping out ceremony of the new research building. If the building time schedule can be adhered despite the cold winter, then the building can be handed over presumably in July 2009.*

*A further success for the laboratory is the start of the corporate interdisci-*

Gebäude voraussichtlich im Juli 2009 übergeben werden.

Ein weiterer Erfolg für das Laboratorium ist der Start des gemeinsamen interdisziplinären Bachelor-Studiengangs „Nanotechnologie“ an der Leibniz Universität Hannover, der unter Federführung von Prof. H.-H. Gatzert (Institut für Mikrotechnologie) entstand. Er wird Studierende für die Tätigkeit in einem Bereich qualifizieren, der als Schlüsseltechnologie des 21. Jahrhunderts gilt. Im Wintersemester 2008/2009 begannen 40 Studenten ihr Bachelorstudium. Diese Studenten werden im Anschluss an ihr Bachelorstudium ein entsprechendes Masterstudium beginnen können.

Außerdem freut es mich zu berichten, dass das Präsidium der Leibniz Universität Hannover im November 2008 das LNQE nach vorheriger positiver Evaluation durch die Wissenschaftliche Kommission Niedersachsen offiziell als interdisziplinäres Forschungszentrum eingerichtet hat.

Mit freundlichen Grüßen

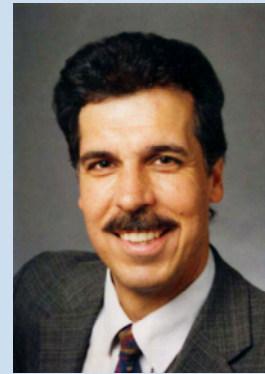
Prof. Dr. Rolf Haug  
- Sprecher des Vorstandes -

*plinary bachelor study course “Nanotechnology” at the Leibniz Universität Hannover, which was developed under the direction of Prof. H.-H. Gatzert (Institute of Microtechnology). It will qualify students for work in a field which is regarded as key technology of the 21th century. In winter semester 2008/2009 40 students began their bachelor study. These students will be offered a corresponding master study subsequent to their bachelor study.*

*Furthermore, I am pleased to report that the university management of the Leibniz Universität Hannover has set the LNQE in November 2008 officially as an interdisciplinary research centre after previous positive evaluations by the Wissenschaftliche Kommission Niedersachsen.*

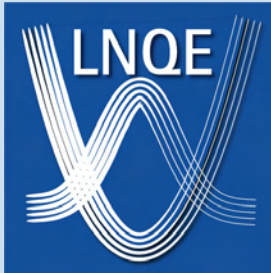
*Sincerely yours*

*Prof. Dr. Rolf Haug  
- Speaker of the executive board -*



Prof. Dr. Rolf Haug

## Ziele des Laboratoriums/ Goals of the Laboratory



Logo vom Laboratorium für Nano- und Quantenengineering (LNQE).  
*Logo of the Laboratory of Nano and Quantum Engineering (LNQE).*

Die Synthese und Kontrolle von Materialien auf Größenskalen im Mikrobis Nanobereich 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 give access to all-new material and system properties. On this scale quantum effects appear which have the potential of not yet utilized revolutionary functionalities. The manipulation and control of such materials and functionalities need new tools. The research of scientists and engineers merge at this structure sizes setting free synergetic resources. This leads to new solutions for nanotechnological devices.*

*The essential interdisciplinary research finds a basis in the Laboratory of Nano and Quantum Engineering. In a broad effort, the know-how of different fields is focused and bundled to develop new areas of application based on targeted basic research and to utilize nanotechnology economically.*

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

*The 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.*



Workshop NanoDay des LNQE.  
*Workshop NanoDay of the LNQE.*



LNQE Forschungsneubau (Computergrafik).  
*LNQE new research building (computer graphics).*

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 beabsichtigt das Laboratorium für Nano- und Quantenengineering ein eigenes Gebäude in Hannover mit Laboren, Geräten etc. und insbesondere Reinräumen zu errichten und betreiben.

*To achieve these goals the organization in particular has to*

- *Execute research and development which are 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 bring together 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 purposes and tasks the Laboratory of Nano and Quantum Engineering aims to build and run an own building in Hannover hosting labs, equipment, etc. and in particular clean room facilities.*



Kolloquiumsreihe mit Vorträgen zur Nanotechnologie.  
*Series of colloquia on nanotechnology.*



Universitätspräsident Barke bei der Grundsteinlegung des LNQE-Neubaus am 05. Oktober 2007.  
*University president Barke at the grand laying the foundation stone in 5th October 2007.*



## Forschungsbereiche/Research Areas

Die Forschung im LNQE ist fokussiert auf vier Kernbereiche der Nanotechnologie, wobei die Bereiche sich gegenseitig synergetisch unterstützen. Die Forschungsbereiche werden jeweils von einem Mitglied des Vorstandes geleitet. Jede Arbeitsgruppe im LNQE arbeitet mindestens in einem, meist in mehreren Forschungsbereichen mit. Die Forschung konzentriert sich auf Schlüsseltechnologien („Enabling Technologies“) mit starker Betonung auf die Umsetzung in Anwendungen:

*The research in the LNQE is focused on four core areas of nanotechnology which support themselves synergistically. Each research areas is lead by a member of the managing. Every workgroup of the LNQE participates in at least one, mostly in several research areas. The research concentrates on enabling technologies with a strong emphasis of transfer into applications:*

### **Nanoelectronics – continuation of microelectronics at the nanoscale**

- Research of new materials for some future use in nanoelectronics.
- Research of new functionalities in new devices and circuits.

### **Nanomaterials – smallest particles of size 1 nm – 100 nm**

- Nanostructures with tailored properties for specific applications.
- Development of most different fabrication facilities.
- Systematic analysis and characterization of the Nanomaterials, development of standards and Feedback.

### **Quantum Bio and Nanoengineering - Artificial made quantum systems for new applications**

- Basic understanding of quantum mechanical systems.
- Development of innovative nanostructural process engineering.
- Application in new quantum sensors, in quantum metrology through to quantum information processing.

### **Nanoelektronik - Fortführung der Mikroelektronik auf Nanoskala**

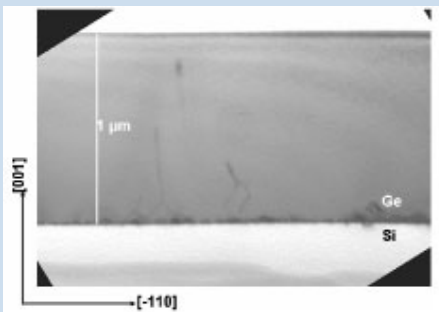
- Erforschung neuer Materialien zum zukünftigen Einsatz in der Nanoelektronik.
- Erforschung neuartiger Funktionalitäten in neuen Bauelementestrukturen und Schaltungen.

### **Nanomaterialien – Kleinste Partikel in der Größe 1 nm – 100 nm**

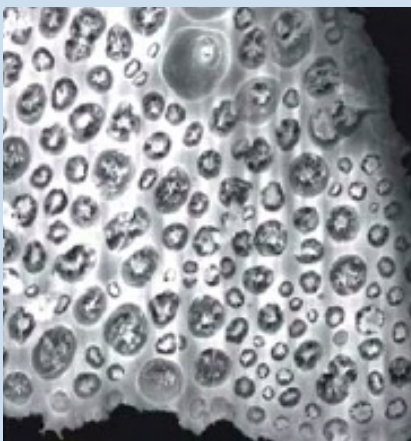
- Nanostrukturen mit maßgeschneiderten Eigenschaften für spezifische Anwendungen.
- Entwicklung unterschiedlichster Herstellungsmöglichkeiten.
- Systematische Analyse und Charakterisierung der Nanomaterialien, Entwicklung von DIN-Standards und Rückführung.

### **Quanten-, Bio- und Nanoengineering – künstlich geschaffene Quantensysteme für neuartige Anwendungen**

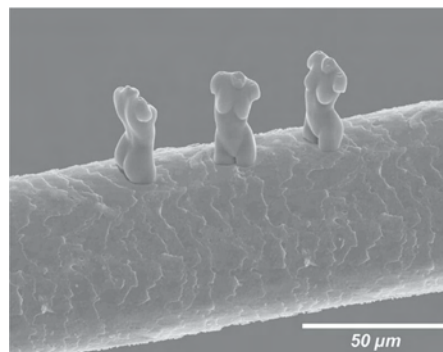
- Grundlegendes Verständnis quantenmechanischer Systeme.
- Entwicklung von innovativen Nanostrukturierungsverfahren.



MBE-Wachstum von Germanium auf Silizium/*MBE-Growth of germanium on silicon* (Hofmann/MBE)



Biomineralisierung/*Biomimetalisation* (Behrens/ACI)



Zwei-Photonen-Polymerisation/*Two-photon polymerisation* (Chichkov/LZH)

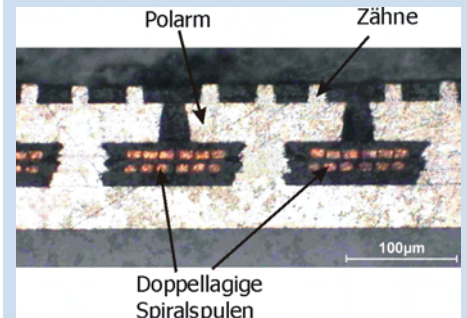
- Anwendung in neuartigen Quantensensoren, in der Quantenmetrologie bis hin zur Quanteninformationsverarbeitung.

**Mechanik/Magnetik – Verbindung der Nanowelt mit der makroskopischen Umgebung**

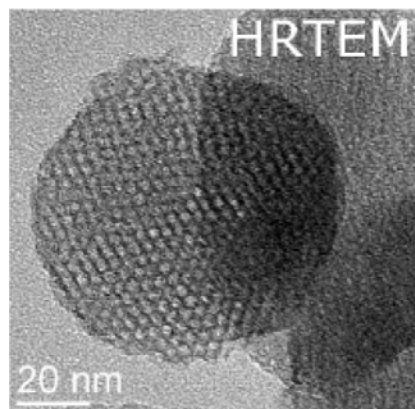
- Aufbau- und Verbindungstechnik von Nanosystemen, Werkzeuge für Nanosysteme, Mikroaktorik.
- Mikro- und Nano-Magnetiken für Anwendungen als Sensoren und Aktoren.
- Nanotribologie.

**Mechanics/Magnetics – Connection of the nano-world with its macroscopic environment**

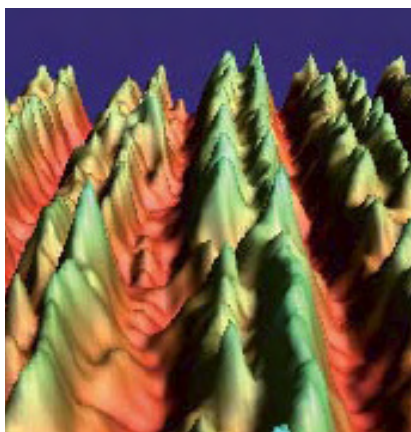
- *Packaging of nanosystems, tools for nanosystems, micro-actoric*
- *Micro and nano magnetics for applications as sensors and actors.*
- *Nano-tribology*



Teil eines Mikromotors/*Part of a micromotor* (Ponick/IAL, Gatzert/imt)



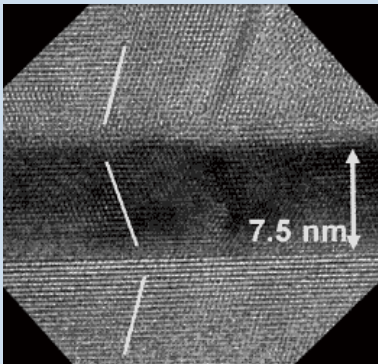
Mesoporöse Nanopartikel/*Mesoporous Nanoparticles* (Marschall, Wark/PCI)



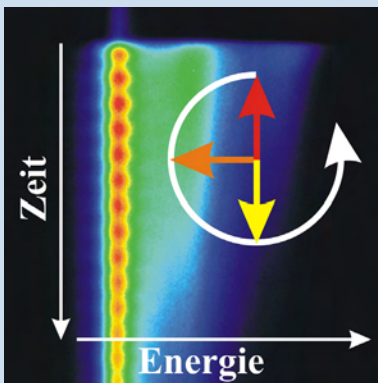
Oberflächenphysik mit atomarer Auflösung/*Surface physics with atomic resolution* (Pfnür/FKP)

## Nanoelektronik/Nanoelectronics

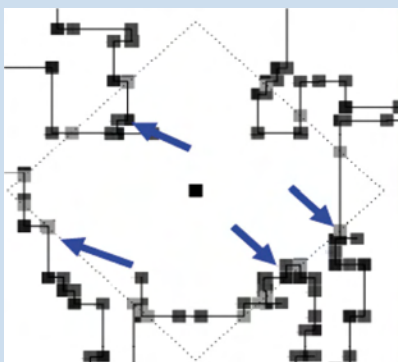
Ansprechpartner/*contact person*: Prof. Dr. H.J. Osten



MBE-Wachstum neuer Materialien/  
*MBE-Growth of new materials* (Fissel/  
LFI, Osten/MBE)



Spintronik/*Spintronics* (Oestreich/FKP)



Neue Software-Tools für die Nanoelektronik - Hier zur Berechnung von Netztopologien von Interconnects/  
*New software tools for nanoelectronics - Here for calculation of net topologies of interconnects* (Barke/IMS)

Die Entwicklung der Mikroelektronik war im letzten Jahrzehnt hauptsächlich durch die ständige Reduzierung der Strukturmaße (Skalierung) geprägt. Dabei blieben der Aufbau der Baugruppen sowie die verwendeten Materialien nahezu unverändert. Diese Entwicklung ist kurz vor ihrem Endpunkt, da eine weitere Verkleinerung der Strukturen auf physikalische Grenzen stößt. Wir durchleben somit einen grundlegenden Wechsel in der mikroelektronischen Entwicklung/Forschung. Innovationen auf allen Ebenen sind jetzt notwendig für die weitere Entwicklung der Mikroelektronik in Richtung einer Nanoelektronik:

- Neue Materialien in konventionellen Bauelementen mit sub-100 nm-Strukturen
- Neue Bauelementekonzepte und Funktionsprinzipien
- Neuartige Schaltungs- und Systemlösungen

Dabei wird Silizium zumindest auch in den nächsten Jahren der hauptsächlich genutzte Halbleiter bleiben. Die folgenden Aufgaben sind im Mittelpunkt der Forschungen unserer Si-basierenden Nanoelektronik:

### Physikalische Effekte und Bauelemente

Teilweise basierend auf den Erkenntnissen der Materialentwicklung sollen physikalische Effekte (Leitfähigkeit, Tunneltransport, spinabhängiger Ladungstransport und Anregungen usw.) im Hinblick auf ihre Verwendbarkeit für neuartige Bauelemente untersucht werden, die die Quanteneigenschaften kleinster Strukturen auszunutzen gestatten. Viele dieser Arbeiten stehen in enger Beziehung zu den Forschungsaktivitäten des Forschungsbereichs Quanten-, Bio- und Nanoengineering.

### Neue Materialien und neue Herstellungsverfahren

Die Voraussetzung für die Untersuchung neuartiger nanoelektronischer Prinzipien ist die Möglichkeit der Herstellung entsprechend geeigneter und auf die angestrebte Funktionalität zugeschnittener Materialsysteme. Das beinhaltet die Fähigkeit des Materialengineering auf molekularem Niveau

*In the last decade the history of microelectronics was mainly characterized by a miniaturization of the electrical components (scaling). However, the design and the materials used stayed nearly the same. This development comes near to end since a further decrease of the size comes to physical limitations. As a consequence, we undergo an essential change in research and development of microelectronics. Innovations on all levels are now necessary for further development of microelectronics towards nanoelectronics:*

- *New materials in conventional devices with sub-100 nm structures*
- *New device concepts and functional principles*
- *New circuit and system solutions*

*In this Silicon will stay the primary used semiconductor at least in the next years. The following tasks are the focus of research of our Si-based nanoelectronics:*

### Physical effects and devices

*Partially based on findings in material development, physical effects (conductance, tunnel transport, spin dependent charge transport, excitations etc.) shall be investigated with regard to their applicability for new devices, which admit to take advantage of quantum features of smallest structures. Many of this works are in close relationship to the research activities of the research area quantum, bio and nanoengineering.*

### New materials and new manufacturing methods

*The pre-condition for the analysis of new nanoelectrical principles is the feasibility to manufacture adequate and for the aimed functionality tailored material systems. This includes the skill of material engineering on molecular level with manipulation of single atoms on surfaces and also the development and combination of different materials (like e. g. new inorganic or organic compounds on silicon substrates). These challenges can only be solved with interdisciplinary approaches. A close cooperation with the research area nanomaterials is required.*



einschließlich der Manipulation von einzelnen Atomen auf Oberflächen genau so wie die Entwicklung und Kombination verschiedenster Materialien (wie z.B. neue anorganische oder organische Verbindungen auf Silizium-Substraten). Diese Herausforderungen sind nur durch interdisziplinäre Ansätze zu bewältigen. Eine enge Verbindung mit dem Forschungsbereich Nanomaterialien ist eine Voraussetzung.

### Quantenmechanische Modellierung und neue Schaltungskonzepte

Die experimentellen Arbeiten werden unterstützt durch Simulation und Modellierung. Gleichzeitig wird untersucht, wie sich höchste Integrationsdichten realisieren lassen, und wie sich elektronische Signale in neuartigen Schaltkreisen bei höchsten Integrationsdichten verhalten.

### Chipsysteme und Entwurfsmethodik

Mit den bisherigen Entwurfsmethoden und der bisherigen internen Gestaltung der Chips kann den Herausforderungen der Nanoelektronik nicht mehr begegnet werden. Der bisherige Schaltkreisentwurf muss sich zum zuverlässigen, anwendungsorientierten, vom System zum Layout durchgängigen und hochgradig automatisierten Entwurf entwickeln. Es werden dabei vollkommen neue Ansätze gesucht.

Die enge Kooperation der verschiedenen Arbeitsgruppen in der nanoelektronischen Forschung führt unmittelbar zu synergetischen Effekten bei der Entwicklung von Materialsystemen und integrierten Systemen mit neuer nanoelektronischer Funktionalität.

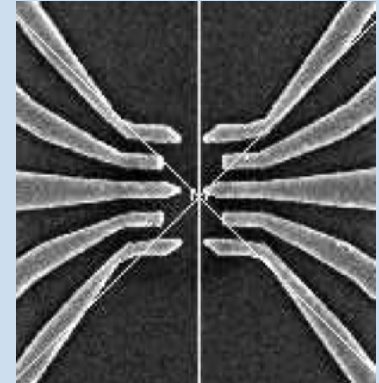
### Quantum mechanical modelling and new circuit concepts

*The experimental works are supported by simulations and modelling. It is investigated how to realize highest integration levels and how electrical signals behave in new circuits with highest integration levels.*

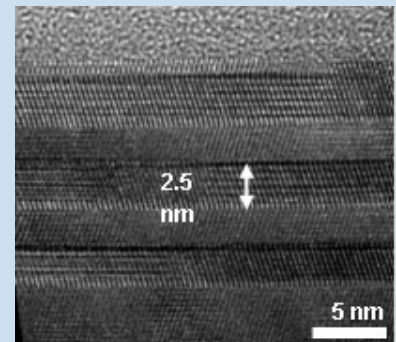
### Chip systems and design methods

*The existing design methods and internal design of chips as hitherto are incapable to address the new challenges of nanoelectronics. The circuit design must develop towards a save, application orientated, and highly automated design. All-new approaches are looked for.*

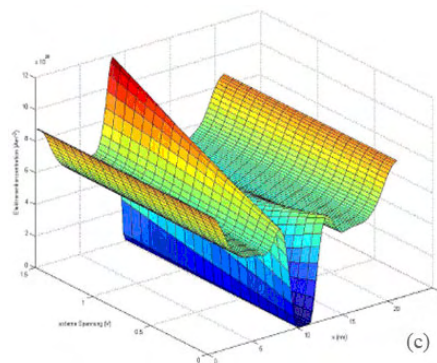
*The close cooperation of different work groups in nanoelectronic research leads directly to synergetic effects in the development of material systems and integrated systems with new nanoelectronic functionalities.*



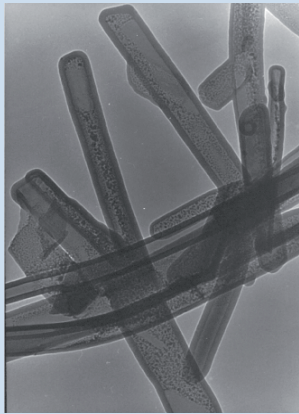
Einzelelektronentunneltransistor/*Single electron tunneling transistor* (Haug/FKP)



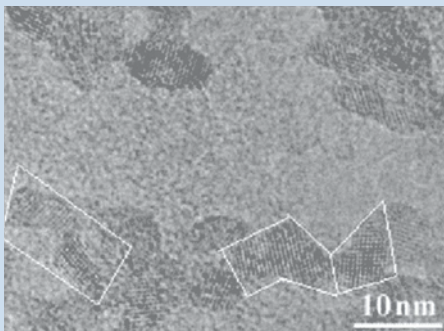
Polytypismus von Silizium/*Polytypism of silicon* (Fissel/LFI)



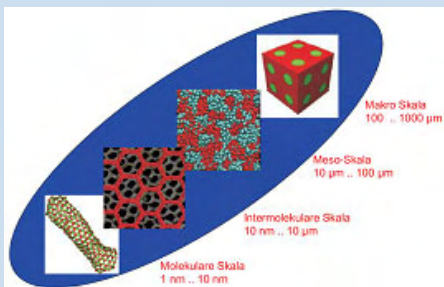
Modellierung von quantenmechanischen Effekten in nanoskaligen MOSFETs/*Modeling of quantum mechanical effects in nanoscale MOSFET* (Mathis/TET)



Silizium Nanotubes/*Silicon nanotubes*  
(Wark, Caro/PCI)



TiO<sub>2</sub> Nanopartikel/*TiO<sub>2</sub> nanoparticles*  
(Bahnmann/TCl)



Multi-Skalen-Analyse mit Nanopartikeln/*Multi-scale analysis with nanoparticles* (Wriggers/IKM)



Hochreine, in Kunststoff eingebettete Nanopartikel/*High-purity nanoparticles embedded in plastics* (Barcikowski, Chichkov/LZH)

## Nanomaterialien/*Nanomaterials*

Ansprechpartner/*contact person*: Prof. Dr. J. Caro

Die ständige Reduzierung der Strukturmaße mikroelektronischer Bauelemente führte zu immer feinskaligeren Strukturen. Einer weiteren Verkleinerung der unveränderten Baugruppenkonzepte auf der Basis der bislang für ihre Fertigung genutzten Materialien sind jedoch physikalische Grenzen gesetzt. Bei der Annäherung an prinzipielle Grenzen, die unter 100 nm liegen dürften, könnte für die Nanoelektronik durchaus ein radikaler Technologiewandel erforderlich sein.

Es werden daher verstärkt man-made Materialien mit maßgeschneiderten Eigenschaften gesucht. Dieses Material-Engineering auf molekularem Niveau umfasst kombinierte chemische und physikalische Arbeitstechniken der Materialsynthese und Deposition. Entsprechend dem Gesamtkonzept des LNQE, wonach in den nächsten Jahren Silizium der hauptsächlich genutzte Halbleiter bleiben wird, ergeben sich folgende Aufgaben die Entwicklung Si-kompatibler Nanomaterialien:

### Synthese von Nanostrukturen mit maßgeschneiderten elektronischen Eigenschaften

Die Verkleinerung der Strukturen und die Erhöhung der Arbeitsgeschwindigkeiten auf dem Chip erfordern neue Materialien für die Leiterbahnen, neue Isolierstoffe mit hohen bzw. niedrigen Dielektrizitätskonstanten, neue Si-adäquate Materialkombinationen. Diese Arbeiten erfolgen in enger Abstimmung und Zusammenarbeit mit der Gruppe „Nanoelektronik“.

### Nanomaterialien mit neuen physikalischen Funktionen

Nano-Halbleiter- und -Metallpartikel lassen sich definiert herstellen und stabilisieren. Die neuen Funktionalitäten werden quantenelektronische Effekte mit neuen Materialien nutzen. Materialien für integrationsfähige Basisstrukturen im niedrigen nm-Bereich mit 0D- und 1D-Ladungsträger-Confinement wie Single-Electron-Transistoren, Quantendraht-Transistor, Nano-Leitungen, Nano-Röhren, bistabile Molekulare Schalter sind gefragt. Diese Arbeiten erfolgen in enger Ab-

*The continuous downscaling of the structure sizes of microelectronic devices leads to finer scaled structures. A further reduction of the usual device concepts, based on the materials used for the fabrication so far, is restricted by physical limits. Approaching fundamental limits, which should be the case for dimensions smaller than 100 nm, a radical technological change for nanoelectronics could become necessary.*

*For this reason, man-made materials with tailored properties are increasingly demanded. This material engineering on the molecular level enfoldes combined chemical and physical techniques of material synthesis and deposition. Due to the overall concept of the LNQE, whereby during the next years silicon remains the mainly used semiconductor, the following tasks arise for the development of Si-compatible nanomaterials:*

### Synthesis of nanostructures with tailored electronic properties

*The miniaturization of structures and the increase of the operating speed on a chip demands novel materials for conducting paths, new insulator materials with high resp. low dielectric constants and new Si-compatible material combinations. These research topics are addressed in close coordination and cooperation with the research area „nanoelectronics“.*

### Nanomaterials with new physical functions

*Nanosized semiconductor and metal particles can be defined, produced and stabilized. The new functionalities are going to use quantum mechanical effects with new materials. Materials for integrable basic structures in the low nm-range with 0D- and 1D-charge carrier confinement like single electron transistors, quantum wire transistors, nano leads, nanotubes and bi-stable molecular switches are demanded. These operations occur in close coordination and cooperation with the research area „nanoeengineering“.*

### Structuring of nanomaterials

*Si-compatible materials are needed*

stimmung und Zusammenarbeit mit der Gruppe „Nanoengineering“.

### Strukturierung von Nanomaterialien

Si-kompatible nanometrisch strukturierbare Materialien für neue Basisstrukturen mit neuen elektronischen Funktionen wie Nanocluster, FET-Konfigurationen werden benötigt. In Kombination mit den klassischen physikalischen Techniken werden neue Wege der Deposition und Nanostrukturierung geschaffen. Bei Strukturweiten unter 100 nm gelangt die optische Lithographie an ihr Ende, gefragt sind Verfahren der Post-optischen Lithographie, die auch noch zur Herstellung von Strukturen am Quantenlimit taugen. Diese Arbeiten erfolgen in enger Abstimmung und Zusammenarbeit mit den Gruppen „Mechanik/Magnetik“ und „Quanten-, Bio- und Nanoengineering“.

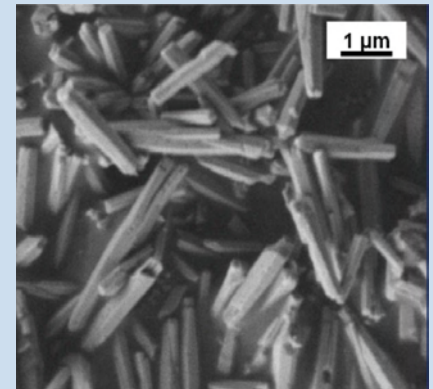
### Simulation auf der Nano-Ebene

Für eine gezielte Verbesserung der Struktureigenschaften ist bisher eine große Anzahl zeit- und kostenintensiver Versuche erforderlich. Die makroskopischen Eigenschaften des zu betrachtenden Systems sind durch den molekularen Aufbau festgelegt und können mittels molekularer Simulation ermittelt werden. Durch virtuelle Versuche kann so der Einfluss einer veränderten Struktur wie z.B. durch die Zugabe von Nanopartikeln auf das Strukturverhalten untersucht werden. Neben dem Ansatz der Molekulardynamik (MD) wird der Ansatz der Molekulardynamischen Finite Elemente Methode (MDFEM) entwickelt, um in einer Mehrskalenanalyse die Eigenschaften ausgehend vom Aufbau des Moleküls bis zu den Eigenschaften des Bauteils im numerischen Modell abbilden zu können.

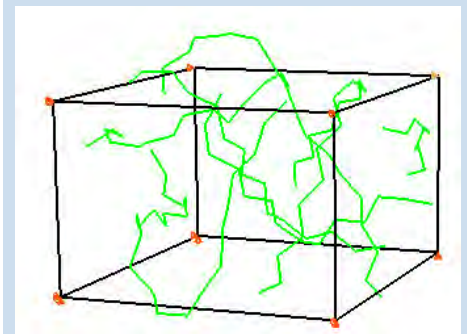
*that can be nanostructured for new basic structures with new electronic functions like nanoclusters, FET-configurations. In combination with classical physical techniques new ways of deposition and nanostructuring are created. At structure sizes below 100 nm optical lithography comes to its end and post-optical lithography processes are in demand, which can be used for development of structures at the quantum limit. These operations occur in close coordination and cooperation with research areas „mechanics / magnetics“ and „quantum, bio and nanoengineering“.*

### Simulation on nano-level size

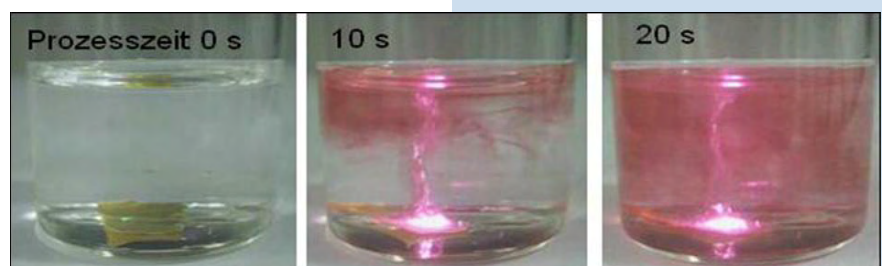
*For a selective improvement of structure properties up to now numerous time and cost intensive experiments are needed. The macroscopic properties of the investigated systems are determined from their molecular configuration and can be calculated with molecular simulation. With virtual experiments the influence of a changed structure on the structural behavior can be tested, e.g. the influence of added nanoparticles. Besides the molecular dynamic (MD) approach the molecular dynamics finite element method (MDFEM) will be developed to map the properties in a numerical model in a multi channel analysis, starting from the structure of the molecule and going up to properties of the device.*



Organische-anorganische Kompositmaterialien/*Organic-anorganic composites* (Hering, Behrens/ACI)



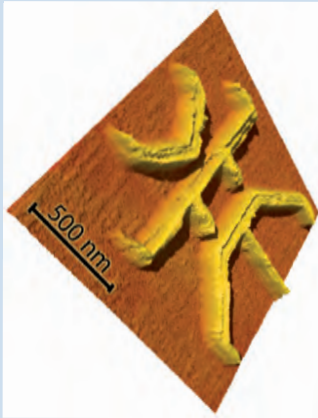
Computergestützte Materialentwicklung/*Computer-aided material development* (Rolfes/ISD)



Laserbasierte Erzeugung von Nanopartikeln/*Laser-based generation of nanoparticles* (Barcikowski, Chichkov/LZH)

## Quanten-, Bio- und Nanoengineering/ Quantum, Bio and Nanoengineering

Ansprechpartner/contact person: Prof. Dr. R. J. Haug



Mit dem Rasterkraftmikroskop erzeugter Quantenpunkt/*With an atomic force microscope fabricated quantum dot* (Haug/FKP)

Nanostrukturierte Systeme bekommen in der Physik, Optik und auch der Biologie eine immer größere Bedeutung. Bei vielen dieser Systeme spielen auf Grund der kleinen Dimensionen Quanteneffekte eine wichtige Rolle.

Themen der Arbeitsrichtung:

### Bionanotechnologie

Nanolithographie mit Biomolekülen, Biochips, Grundlagen und Anwendungen von Nanobubbles, lipidbasierte Systeme, Biosensors, Drug Delivery Systems, Tissue Engineering.

### Nanostrukturierung

Oberflächen-Laserstrukturierung, 3D Two-Photon Lithographie, lasergestützte Erzeugung von Nanopartikeln, Oberflächenbearbeitung mit dem Rasterkraftmikroskop, Strukturierung mit dem Rastertunnelmikroskop, Elektronenstrahlolithographie.

*Nanostructured systems are of increasing importance in physics, optics and also in biology. In many of these systems quantum effects play a major role due to the small dimensions.*

*Fields in this area:*

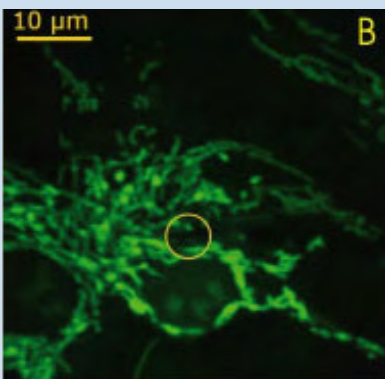
### Bionanotechnology

*Nanolithography with biomolecules, biochips, basics and applications of nanobubbles, lipid-based systems, biosensors, drug delivery systems, tissue engineering.*

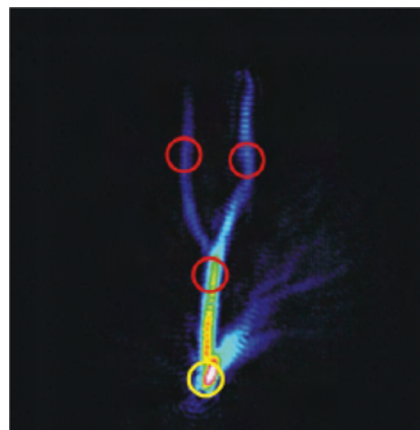
### Nanostructuring

*Surface laser structuring, 3D two-photon lithography, laser based fabrication of nanoparticles, surface processing with an atomic force microscope, structuring with a scanning tunneling microscope, electron beam lithography.*

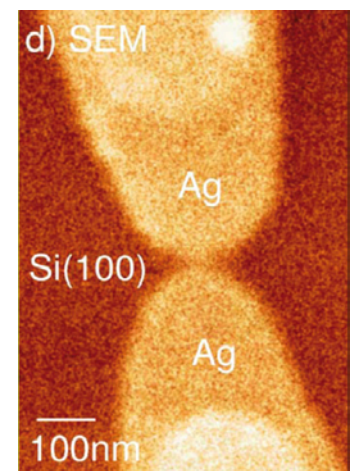
### Nanooptics



Zellchirurgie mit Femtosekunden-Laserpulsen/*Cell surgery with femtosecond laser pulses* (Quelle: Ertmer/LZH)



Plasmonischer Wellenleiter/*Plasmonic waveguide* (Passinger, Chichkov/LZH)



Ultradünne Kontakte/*Ultra-thin contacts* (Pfnür/FKP)

**Nanooptik**

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

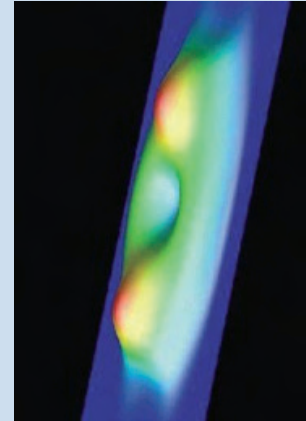
**Quantensysteme**

Quanteninterferenz und Quantentransport in niedrigdimensionalen Systemen, Quantensensoren auf der Basis von integrierten atomoptischen Systemen, atomare Systeme in Nanostrukturen, atomare Inertialsensoren, Einsatz von einfachen und gekoppelte Quantenpunktsysteme bei der Quanteninformationsverarbeitung, Spineffekte bei der Quanteninformationsverarbeitung.

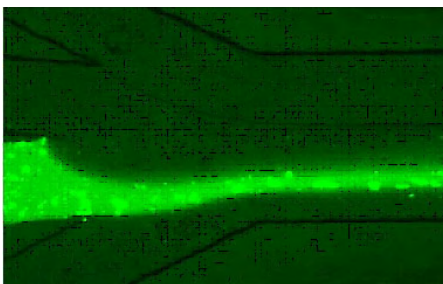
*Application of nanoscale materials in thin film solar cells, production and characterization of photonic crystals, nanostructures and devices for plasmonics, coherence effects in electron-hole spin-coupling, application of spin-polarized charge carriers in semiconductor lasers.*

**Quantum systems**

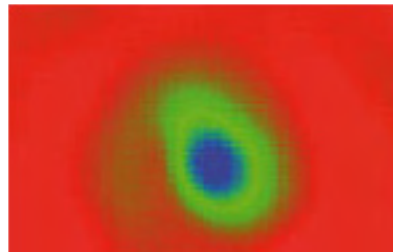
*Quantum interference in low-dimensional systems, quantum sensors based on integrated atom optical systems, atomic systems in nanostructures, atomic inertial sensors, use of single and coupled quantum point systems for quantum information processing, spin effects in quantum information processing.*



Bose-Einstein Kondensat/*Bose-Einstein condensate* (Arlt, Ertmer/IQ)



Mikro- und Nanofluidik/*Micro and nano fluidics* (Hardt/NMP)



Nanochemie mit einzelnen Molekülen/*Nanochemistry with single molecules* (Morgenstern/FKP)

## Mechanik/Magnetik *Mechanics/Magnetics*

Ansprechpartner/*contact person*: Prof. Dr. -Ing. H.-H. Gatzen

### Mikro- und Nanotribologie

Dieser Bereich beschäftigt sich mit Adhäsionsphänomenen einschließlich dem Flüssigkeitskleben (stiction) bei Mikro- und Nanokontakten von Mikrobauanteilen, Phänomenen der Mikro- und Nanoreibung von Oberflächen bei geringen Kontaktkräften und dem Mikro- und Nanoverschleiß. Im Vordergrund steht die optimale Gestaltung der Mikro- und Nanotopographie von Oberflächen, der Einsatz von Verschleißschutzschichten wie z.B. aus amorpher Kohlenstoff (diamond-like carbon - DLC), sowie der Einsatz von molekularen Lagen von Schmiermitteln.

### *Micro- and Nanotribology*

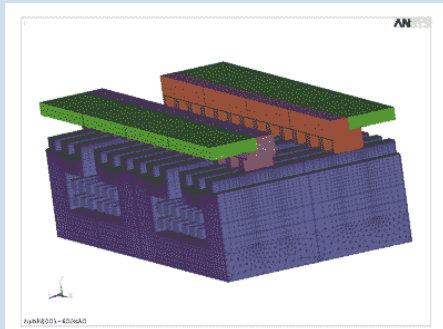
*This area covers adhesion phenomena including bonding of liquids (stiction) in case of micro- and nano-contacts of micro-devices, phenomena of micro- and nano-friction of surfaces at low contact forces and micro- and nano-abrasion. A priority is given to the optimal design of the micro- and nano-topography of surfaces, to the use of abrasion protective coatings made e. g. of amorphous carbon (diamond-like carbon - DLC) and also to the application of molecular layers of lubricants.*

### *Packaging of integrated Circuits of Nanosystems/Support of the Nanotechnology with macroscopic Devices*

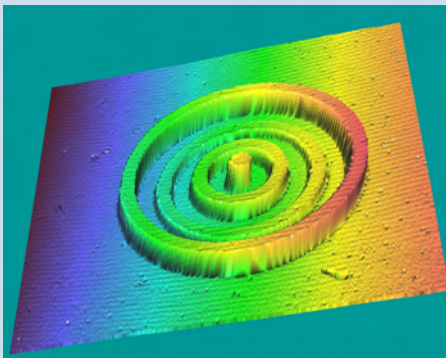
*This area's task is to support the system integration of nanodevices. The technologies needed are provided and, if necessary, newly developed. This includes the creation of microactuators for high-precise positioning of nanodevices during the assembly.*

### Aufbau und Verbindungstechnik von Nanosystemen/Unterstützung der Nanotechnik durch makroskopische Bauteile

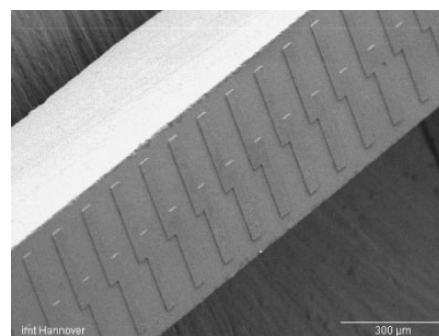
Dieser Bereich hat die Aufgabe, die Systemintegration von Nanobauteilen zu unterstützen. Die hierzu notwendigen Technologien werden bereitgestellt und, wenn notwendig, neu entwickelt. Dies schließt die Schaffung von Mikroaktuatorik ein, um Nanobauteile bei der Montage hochgenau zu positionieren.



Simulation eines Mikro Linear Motors/  
*Simulation of a micro linear motor* (Ponick/IAL)



Heißprägen von Nanostrukturen/  
*Hot embossing of nanostructures* (Reithmeier/IMR)



Dünnschicht Mikropositionierung für Sensoren/  
*Thin-film micropositioning for sensors* (Gatzen/imt)

### Mikro- und Nanomagnetik

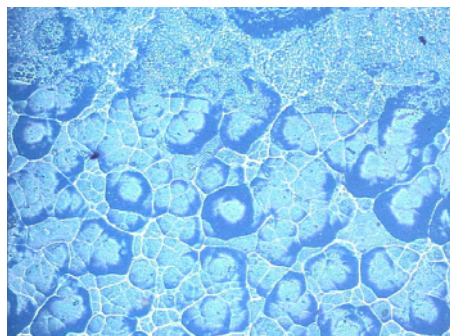
Das Aufgabengebiet umfasst die magnetische Sensorik und Aktorik. Im Bereich der Sensorik erfolgt die Erforschung von Bauteilen, welche magnetische Effekte nutzen. Diese können klassischer Natur sein (Induktion, Magnetoelastizität etc.) oder auch quantenmechanischer (giant-magneto-resistiver Effekt - GMR, tunnel-magneto-resistiver Effekt - TMR etc.), wobei bei letzteren elektronenspinabhängige Phänomene im Vordergrund stehen. Im Bereich der Aktorik werden elektromagnetische und elektrodynamische Effekte erforscht und zum Aufbau von Mikroaktoren und Mikrogeneratoren (energy scavenging) genutzt.

### Micro- and Nano-magnetics

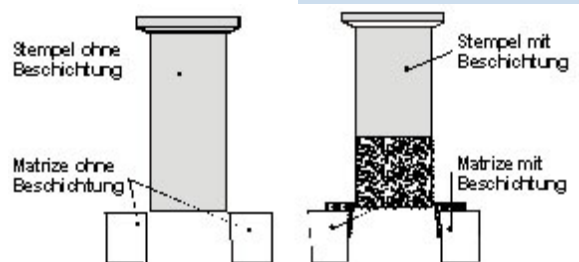
*The field of application covers magnetical sensors and actuators. In the field of sensors, devices based on magnetic effects are investigated. These could be of classical nature (induction, magneto-elasticity etc.) or of quantum mechanical nature (giant-magneto-resistiv Effect - GMR, tunnel-magneto-resistiv effect - TMR etc.), whereby in the latter case electron spin dependent phenomena are of special concern. In the fields of actuators, electromagnetic and electro-dynamical effects are investigated and used for the development of micro-actuators and micro-generators (energy scavenging).*



Solarzellen/Solar cells (Brendel/FKP, ISFH)



Nanopartikel in Förderbändern/  
*Nanoparticles in Conveyor belts* (Overmeyer/ITA)



Neuartig beschichtetes Schneidwerkzeug/*Novel coated cutting tool* (Behrens/IFUM)

## Vorstand/*Executive Board*



**Prof. Dr. Rolf J. Haug**  
 (Sprecher des Vorstandes  
*Speaker of the Executive Board*)  
 Institut für Festkörperphysik  
 Abteilung Nanostrukturen  
 Leibniz Universität Hannover  
 Appelstr. 2  
 D-30167 Hannover  
 Phone: +49 (0)511 762 2901  
 Fax: +49 (0)511 762 2904  
 haug@nano.uni-hannover.de  
 www.nano.uni-hannover.de

Kernkompetenzen/*Core competencies:*

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



**Prof. Dr. Jürgen Caro**  
 Institut für Physikalische Chemie und  
 Elektrochemie  
 Leibniz Universität Hannover  
 Callinstr. 3-3a  
 D-30167 Hannover  
 Phone: +49 (0)511 762 3175  
 Fax: +49 (0)511 762 19121  
 juergen.caro@pci.uni-hannover.de  
 www.pci.uni-hannover.de/~lgpcb/

Kernkompetenzen/*Core competencies:*

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



**Prof. Dr.-Ing. Hans-Heinrich Gatzert**  
 Institut für Mikrotechnologie  
 Leibniz Universität Hannover  
 An der Universität 2  
 D-30823 Garbsen  
 Phone: +49 (0)511 762 5103  
 Fax: +49 (0)511 762 2867  
 gatzert@imt.uni-hannover.de  
 www.imt.uni-hannover.de

Kernkompetenzen/*Core competencies:*

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



**Prof. Dr. H. Jörg Osten**  
 Institut für Materialien und Bauelemente  
 der Elektronik  
 Leibniz Universität Hannover  
 Appelstr. 11A  
 D-30167 Hannover  
 Phone: +49 (0)511 762 4211  
 Fax: +49 (0)511 762 4229  
 osten@mbe.uni-hannover.de  
 www.mbe.uni-hannover.de

Kernkompetenzen/*Core competencies:*

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



## Mitglieder/*Members*

### Prof. Dr. Jan Arlt

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

#### Kernkompetenzen/*Core competencies:*

- Bose-Einstein-Kondensation (BEK)/*Bose-Einstein condensates (BEC)*
- Fermi-Gase/*Fermi-gases*
- Magneto-Optische Fallen/*Magneto-optical traps*
- Atomoptik mit BEK/*Atom optics with BEC*
- Kohärenzeigenschaften von BEK/*Coherence properties of BEC*



### Prof. Dr. Detlef W. Bahnemann

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

#### Kernkompetenzen/*Core competencies:*

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



### Prof. Dr.-Ing. Erich Barke

Institut für Mikroelektronische Systeme  
Fachgebiet Entwurfsautomatisierung  
Leibniz Universität Hannover  
Appelstr. 4  
D-30167 Hannover  
Phone: +49 (0)511 762 19690  
Fax: +49 (0)511 762 19694  
barke@ims.uni-hannover.de  
www.ims.uni-hannover.de

#### Kernkompetenzen/*Core competencies:*

- Rechnergestützter Entwurf mikroelektronischer Schaltungen und Systeme/*Electronic Design Automation (EDA)*
- Verfahren für den Analog- und Mixed-Signal-Entwurf/*Methods for analog and mixed-signal design*
- Werkzeuge für den physikalischen Entwurf und seine Verifikation/*Tools for physical design and its verification*
- Methoden zum Entwurf robuster Schaltungen/*Tools for design of robust circuits*



### Prof. Dr.-Ing. Bernd-Arno Behrens

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

#### Kernkompetenzen/*Core competencies:*

- Blechumformung/*Sheet metal forming*
- Massivumformung/*Massive forming*
- Umformmaschinen/*Metal forming machines*
- CA – Techniken/*Computer aided engineering*
- Numerische Methoden/*Numerical methods*





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

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



**Prof. Dr.-Ing. Rolf Brendel**  
 Institut für Festkörperphysik  
 Abteilung Solarenergie  
 Leibniz Universität Hannover  
 Appelstr. 2  
 D-30167 Hannover  
 Fax: +49 (0)511 762 2904  
 Rolf.Brendel@isfh.de  
 www.isfh.de

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



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

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



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

- 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*

**Apl. Prof. Dr. Andreas Fissel**

Laboratorium für Informationstechnologie  
Abteilung Halbleiter-Technologie und Bauelemente

Leibniz Universität Hannover  
Schneiderberg 32  
D-30167 Hannover  
Phone: +49 (0)511 762 5041  
Fax: +49 (0)511 762 5052  
fissel@lfi.uni-hannover.de  
www.lfi.uni-hannover.de

**Kernkompetenzen/Core competencies:**

- Epitaktische Metall-Isolator Resonant-Tunneling Strukturen für Bauelemente der Silizium-Nanoelektronik/*Epitaxial metal-insulator resonant tunneling structures for devices of Si nanoelectronics*
- Epitaktische Gate-Dielektrika für die Si- und SiC-Elektronik/*Epitaxial gate dielectrics for Si and SiC electronics*
- Halbleiter-Isolator-Grenzflächen/*Semiconductor-insulator interfaces*
- Epitaktische Nanocluster-Speicher-Strukturen/*Epitaxial nanocluster memory structures*
- Heterostrukturen auf der Basis verschiedener Kristallstrukturen des Siliziums/*Heterostructures on basis of different crystal structures of silicon*

**Prof. Dr. Steffen Hardt**

Institut für Nano- und Mikroprozessertechnik

Leibniz Universität Hannover  
Callinstraße 36  
D-30167 Hannover  
Phone: +49 (0)511 762 2278  
Fax: +49 (0)511 762 2167  
hardt@nmp.uni-hannover.de  
www.nmp.uni-hannover.de

**Kernkompetenzen/Core competencies:**

- Mikro- und Nanofluidik/*Micro- and nanofluidics*
- Optofluidik/*Optofluidics*
- Mikroverfahrenstechnik/*Micro process engineering*
- Lab-on-a-Chip-Technologie/*Lab-on-a-chip technology*
- Wärme- und Stofftransport auf der Mikro- und Nanometerskala/*Heat and mass transfer on the micro and nanoscale*

**Prof. Dr. Karl R. Hofmann**

Institut für Materialien und Bauelemente der Elektronik

Leibniz Universität Hannover  
Appelstr. 11A  
D-30167 Hannover  
Phone: +49 (0)511 762 4220  
Fax: +49 (0)511 762 4229  
hofmann@mbe.uni-hannover.de  
www.mbe.uni-hannover.de

**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.-Ing. Wolfgang Mathis**

Institut für Theoretische Elektrotechnik

Leibniz Universität Hannover  
Appelstr. 9A  
D-30167 Hannover  
Phone: +49 (0)511 762 3201  
Fax: +49 (0)511 762 3204  
mathis@tet.uni-hannover.de  
www.tet.uni-hannover.de

**Kernkompetenzen/Core competencies:**

- Modellierung und Simulation von/*Modelling and simulation of:*
  - Nanostrukturierten Bauelementen und Schaltungen/*Nanostructured devices and circuits*
  - Atomkraftmikroskopie (EFM, MFM)/*Atomic force microscopy (EFM, MFM)*
  - Nano-elektromechanischen Systemen (NEMS)/*Nano electro mechanical systems (NEMS)*





**Prof. Dr. Karina Morgenstern**  
 Institut für Festkörperphysik  
 Abteilung Oberflächen  
 Leibniz Universität Hannover  
 Appelstraße 2  
 D-30167 Hannover  
 Phone: +49 (0)511 762 4821  
 Fax: +49 (0)511 762 4877  
 morgenstern@fkp.uni-hannover.de  
 www.fkp.uni-hannover.de/agm.html

Kernkompetenzen/*Core competencies*:

- Elementare Anregungen auf lokaler Skala/*Elemental excitations on local scale*
- Rastertunnelmikroskopie/*scanning tunnelling microscopy*
- Einzelmolekülchemie/*Single molecule chemistry*
- Dynamik von Nanostrukturen/*Dynamics of nanostructures*



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

Kernkompetenzen/*Core competencies*:

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



**Prof. Dr.-Ing. Ludger Overmeyer**  
 Institut für Transport- und Automatisierungstechnik  
 Leibniz Universität Hannover  
 An der Universität 2  
 D-30823 Garbsen  
 Phone: +49 (0)511 762 2503  
 Fax: +49 (0)511 762 4007  
 ludger.overmeyer@ita.uni-hannover.de  
 www.ita.uni-hannover.de

Kernkompetenzen/*Core competencies*:

- Transporttechnik/*Transport technology*
- Fördergurttechnologie/*Conveyor technology*
- Flurförderer/*Floor conveyor*
- Auto ID-Systeme im Materialfluss (z.B. RFID)/*Auto ID systems in material flow*
- Automatisierungstechnik/*Automation technology*
- Automatisierungstechnik im Materialfluss/*Automation technology in material flow*
- Spezialautomaten/*Special machines*
- Steuerungstechnik/*Machine control systems*
- Aufbau- und Verbindungstechnik/*Packaging of integrated circuits*
- Flip Chip Prozesse/*Flip chip processes*
- Dispensiertechnik/*Fluid dispensing*



**Prof. Dr. Herbert Pfnür**  
 Institut für Festkörperphysik  
 Abteilung Oberflächen  
 Leibniz Universität Hannover  
 Appelstraße 2  
 D-30167 Hannover  
 Phone: +49 (0)511 762 4819  
 Fax: +49 (0)511 762 4877  
 pfnuer@fkp.uni-hannover.de  
 www.fkp.uni-hannover.de/agp.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.-Ing. Bernd Ponick**

Institut für Antriebssysteme und Leistungselektronik  
 Fachgebiet Elektrische Maschinen und Antriebssysteme  
 Leibniz Universität Hannover  
 Welfengarten 1  
 D-30167 Hannover  
 Phone: +49 (0)511 762 2571  
 Fax: +49 (0)511 762 3040  
 ponick@ial.uni-hannover.de  
 www.ial.uni-hannover.de

Kernkompetenzen/*Core competencies:*  
 Klein- und Mikroaktoren/*Small and micro-actuators:*

- Entwurf/*Electromagnetic Design*
- Berechnung des stationären und dynamischen Betriebsverhaltens/*Prediction of the stationary and dynamic performance*
- Modellbildung/*Modelling*
- Parameteridentifikation/*Identification of parameters*
- Energieeffizienz von Antriebssystemen/*Energy efficient drive systems*
- Entwicklung von Spezialsoftware/*Development of expert software*

**Prof. Dr.-Ing. E. Reithmeier**

Institut für Mess- und Regelungstechnik  
 Leibniz Universität Hannover  
 Nienburger Straße 17  
 D-30167 Hannover  
 Phone: +49 (0)511 762 3331  
 Fax: +49 (0)511 762 3234  
 sekretariat@imr.uni-hannover.de  
 www.imr.uni-hannover.de

Kernkompetenzen/*Core competencies:*

- Fertigungsmess- und Prüftechnik/*Production measurement and test technology*
- Optosensorik/*Opto sensors*
- Regelungstechnik/*Control Engineering*
- Akustik/*Acoustics*

**Prof. Dr.-Ing. Raimund Rolfes**

Institut für Statik und Dynamik  
 Leibniz Universität Hannover  
 Appelstr. 9A  
 D-30167 Hannover  
 Phone: +49 (0)511 762 3867  
 Fax: +49 (0)511 762 2236  
 r.rolfes@isd.uni-hannover.de  
 www.isd.uni-hannover.de

Kernkompetenzen/*Core competencies:*

- Multifunktionale, leichte und langlebige Strukturen/*Multifunctional, lightweight, and durable structures*
- Schwingungen und Verbunde/*Vibrations and composites*
- Schadensfrüherkennung/*Health monitoring*
- Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit dynamisch beanspruchter Strukturen/*Serviceability of dynamically loaded structures*
- Robuster und wirtschaftlicher Entwurf von Faserverbundstrukturen/*Robust and economical design of fiber composite structures*
- Einrichtung virtueller Versuchsstände/*Creating virtual test setups*
- Materialgesetze für Verbunde/*Constitutive laws for composites*
- Molekulardynamische Finite Elemente Methode/*Molecular dynamic finite element method*

**Prof. Dr.-Ing. Peter Wriggers**

Institut für Kontinuumsmechanik  
 Leibniz Universität Hannover  
 Appelstr. 11  
 D-30167 Hannover  
 Phone: +49 (0)511 762 2220  
 Fax: +49 (0)511 762 5496  
 wriggers@ikm.uni-hannover.de  
 www.ikm.uni-hannover.de

Kernkompetenzen/*Core competencies:*

- Biomechanik/*Biomechanics*
- Konstitutive Modellierung von Materialien/*Constitutive modelling of materials*
- Kontaktmechanik/*Contact mechanics*
- Finite Elemente Algorithmen/*Finite element algorithms*
- Mikromechanik/*Micromechanics*
- Multiphysik/*Multiphysics*
- Multi-Skalen-Analysen für Materialien und Grenzflächen/*Multi-scale analysis for materials and interfaces*
- Optimierung/*Optimizing*
- Symbolische Ansätze in FEM/*Symbolic approaches in FEM*



## Forschungsneubau/New Research Building

Der LNQE-Forschungsneubau am Schneiderberg 38, 30167 Hannover besteht aus hochwertigen Laboren (Chemielabore, Messlabore, Laserlabore), einem Forschungsreinraum für Nanotechnologie und Büroräumen für Ca. 44 wissenschaftliche Mitarbeiter. Von der Konzeption her sind Labore und Reinraum so ausgestattet (Klimatisierung, Luftreinheit etc.), dass sie Forschungsarbeiten ermöglichen, die in den Instituten der Arbeitsgruppen des LNQE bisher technisch nicht möglich sind und auch vielen konkurrierenden Gruppen weltweit in dieser Konstellation nicht zur Verfügung stehen. Die Hauptnutzflächen sind: 430 qm Forschungsreinraum, 430 qm Labore und 442 qm Büroräume. Die Kosten betragen ca. 14 Mio. Euro. Die Finanzierung des Neubaus erfolgt zu 50 % durch das Land Niedersachsen und zu 50 % durch den Bund. Der Bundesanteil wurde durch erfolgreiche Beantragung beim Wissenschaftsrat im Rahmen der neuen Bund/Länderförderung von Forschungsbauten eingeworben.

Die Planungen liegen bei KSP - Engel und Zimmermann - Architekten (Braunschweig) für den Hochbau, Ing.-Büro Wolf + Weiskopf (Hannover) für den Reinraum, und vielen weiteren

*The LNQE new research building at Schneiderberg 38, 30167 Hannover, Germany consists of high-quality labs (chemistry, laboratory, laser labs), a research cleanroom for nanotechnology and office space for ca. 44 scientific staff members. By design, laboratories and cleanrooms are equipped (air conditioning, air purity, etc.) that they allow for research that within the institutes of the working groups of the LNQE previously not technically feasible, and also many groups around the world competing in this constellation is not available. The Main effective areas are: 430 sqm research clean room, 430 sqm laboratories, and 442 sqm of office space. The cost is around 14 million euros. The financing of the new building is at 50% by the state of Lower Saxony and to 50% by the federal government. The federal share has been successful attracted from the Wissenschaftsrat in the framework of the federal government/Länder promote of research buildings.*

*The plans are KSP - Engel und Zimmermann - Architects (Brunswick) for the building, Ing.-Büro Wolf + Weiskopf (Hanover) for the clean room, and many other specialist planners. The project is located within the State*



Computergrafik des geplanten LNQE-Forschungsneubaus. Die kompakte, rechteckige Bauweise erlaubt innen liegende Laserlabore und ist gleichzeitig besonders kostengünstig. (Quelle: KSP - Architekten) / *Computer graphics of the planned research new building LNQE. The compact, rectangular design allows internal laser laboratories and is also very inexpensive. (Source: KSP - Architects)*

Fachplanern. Die Projektleitung liegt beim Staatlichen Baumanagement Hannover.

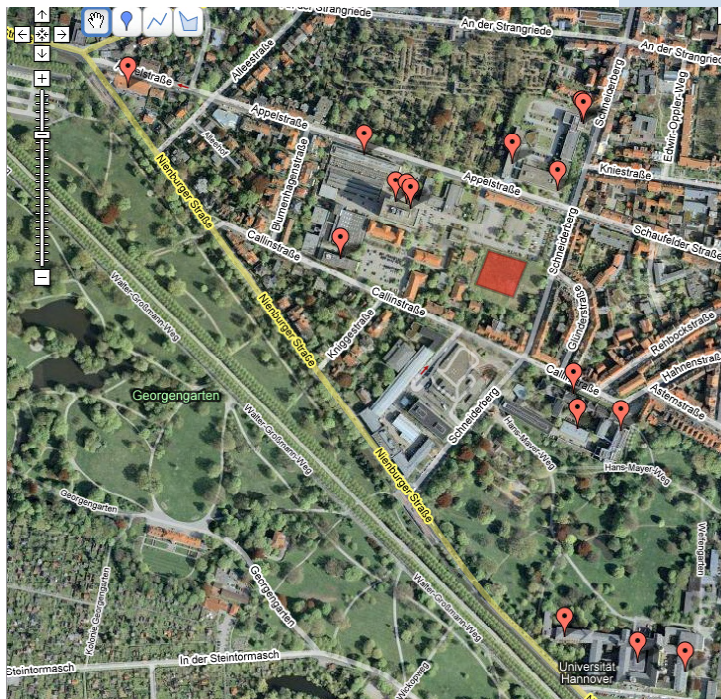
Der Baubeginn war im September 2007. Das Richtfest fand nach einem Jahr Bauzeit am 15. September 2008 statt. Die Grußworte hielten Dipl.-Ing. Matthias Reinhard (Leiter vom Staatlichen Baumanagement Hannover), Prof. Dr. Erich Barke (Präsident der Leibniz Universität Hannover), Lutz Stratmann (Nds. Minister für Wissenschaft und Kultur), Prof. Dr. Rolf Haug (Vorstandssprecher des LNQE) und Michael Zimmermann (Architekturbüro KSP Engel und Zimmermann). Alle Redner unterstrichen die hervorragende Leistung aller Planer, Verantwortlichen und Bauleute, diesen hochtechnologischen Forschungsbau zu errichten. Nach dem Richtspruch durch Herrn Hermann, Polier der Firma Industriebau Wernigerode, wurde die Richtkrone gesetzt. „...das der, der hier forscht, das er es auch bezahlen kann“ wünschte Herr Hermann mit einem Augenzwinkern.

Der Bau soll im Sommer 2009 fertig gestellt werden. Der tägliche Baufortschritt kann mit einer Webcam verfolgt werden: [www.lnqe.uni-hannover.de/webcam.htm](http://www.lnqe.uni-hannover.de/webcam.htm)

### Baumanagement Hannover.

*The start of construction was in September 2007. The topping-out ceremony took place after a year of construction on 15 September 2008. The Greeting were given by Dipl.-Ing. Matthias Reinhard (head of public project management Hannover), Prof. Dr. Erich Barke (president of Leibniz Universität Hannover), Lutz Stratmann (minister for science and culture of Lower Saxony), Prof. Dr. Rolf Haug (speaker of the executive board of the LNQE), and Michael Zimmermann (architectural office KSP Engel and Zimmermann). All speakers underlined the first-rate performance of all planners, persons responsible, and construction workers, to put up this high technological research building. After the topping-out speech by Mr. Hermann, foreman of the firm Industriebau Wernigerode, the topping-out crown was set. „...that the person, who researches here, that he can pay it also“ wished Mr. Hermann with a wink with the eye.*

*The construction should be completed in the summer of 2009. The daily construction progress can be pursued with a webcam: [www.lnqe.uni-hannover.de/webcam.htm](http://www.lnqe.uni-hannover.de/webcam.htm)*



Standort des neuen Forschungszentrums in der Mitte des Universitätsviertels von Hannover (Quadrat) mit den in der Nähe befindlichen LNQE Arbeitsgruppen. (Quelle: Google Maps) / *Location of the new research center in the middle of the university district of Hanover (square) with the nearby located LNQE workgroups. (Source: Google Maps)*

# Richtfest

## *Topping out ceremony*



Dipl.-Ing. Matthias Reinhard



Prof. Dr. Erich Barke



Lutz Stratmann



**am 15. September 2008**  
*at 15th September 2008*



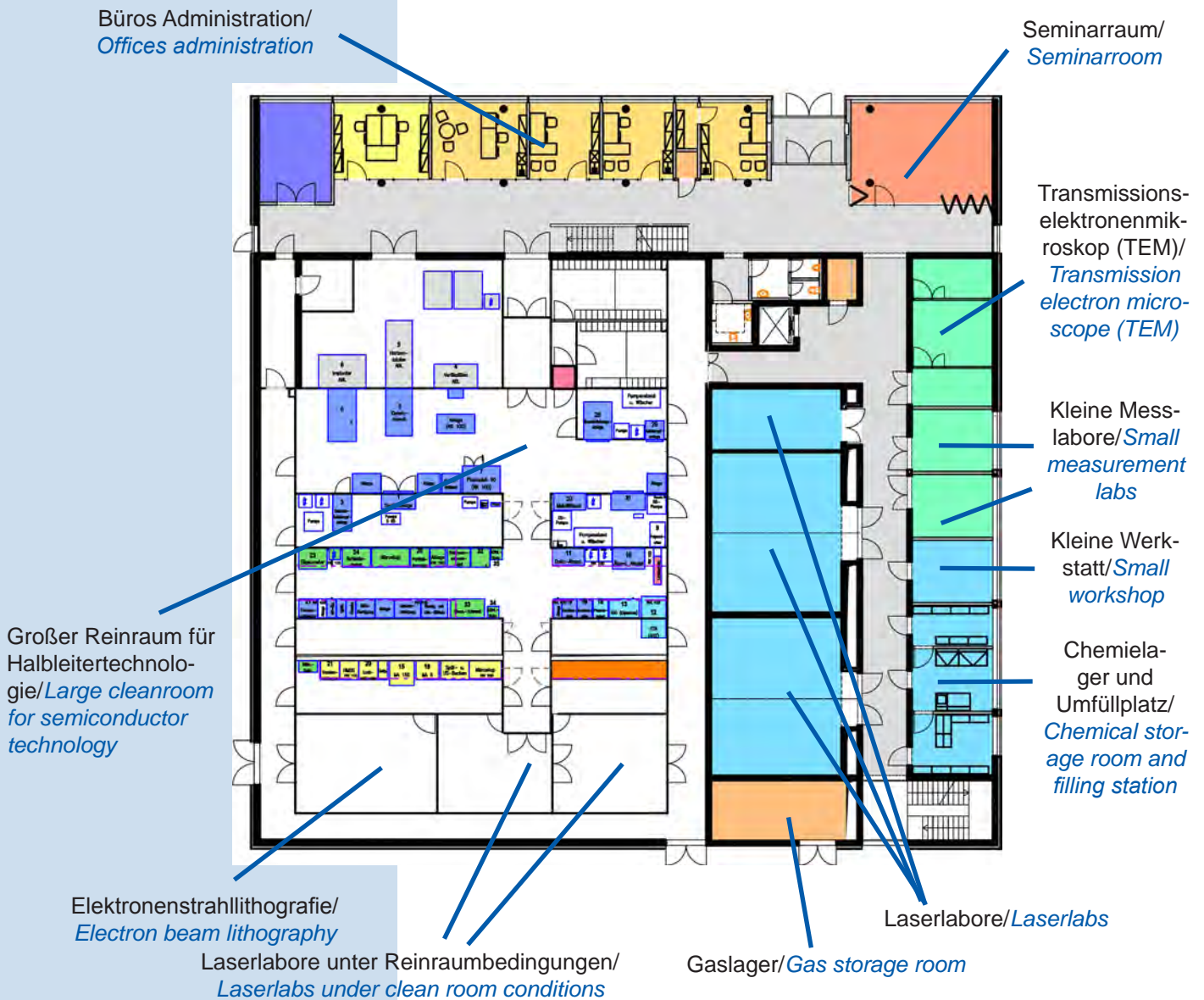
Prof. Dr. Rolf Haug



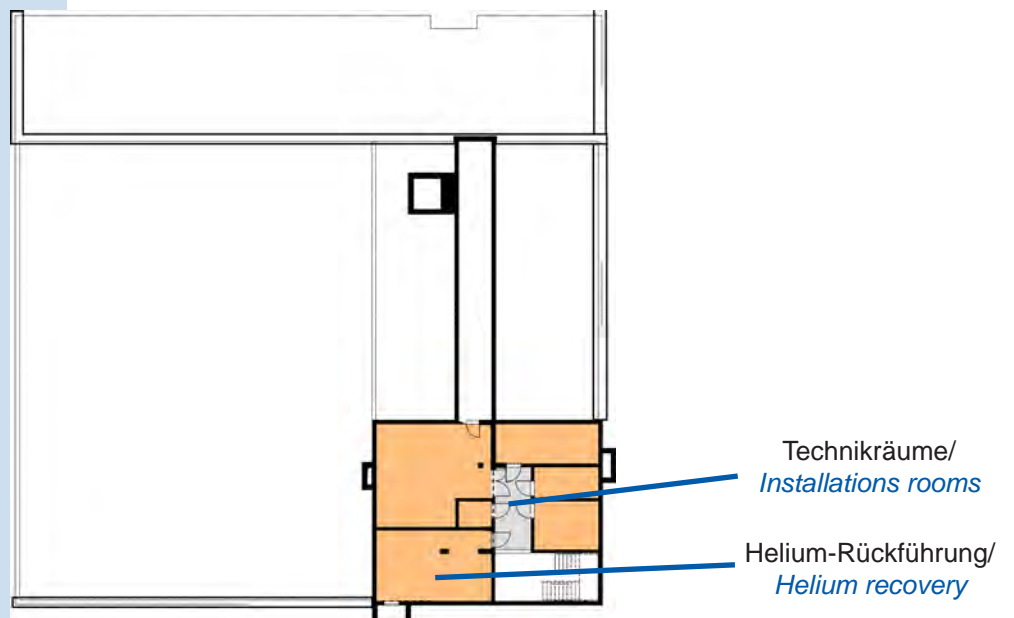
Michael Zimmermann



**Erdgeschoss/Ground floor**



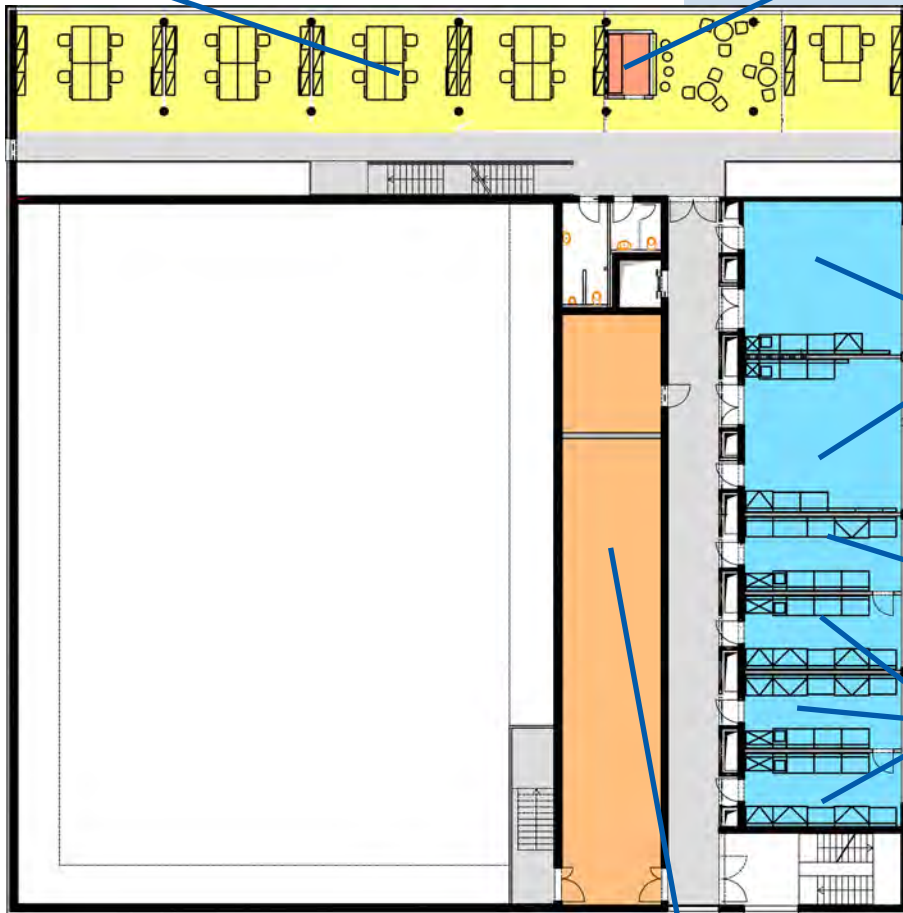
**Untergeschoss/Basement**



### 1. Obergeschoss/*First Floor*

Büros Wissenschaftliche Mitarbeiter und Gäste/  
*Offices scientific Staff and guests*

Kommunikationsfläche mit Teeküche/  
*Communication area with tea kitchen*



Große Messlabore/  
*Large measurement labs*

TEM Probenpräparation/  
*TEM sample preparation*

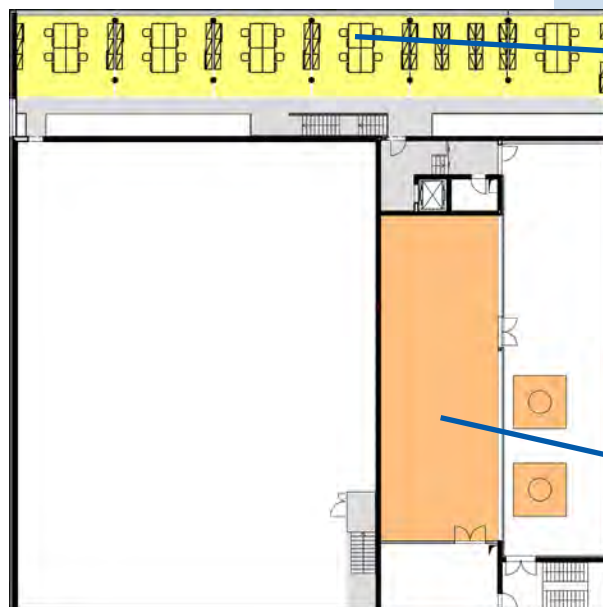
Chemielabore/  
*Chemistry labs*

Technikräume/  
*Installations rooms*

### 2. Obergeschoss/*Second Floor*

Büros Wissenschaftliche Mitarbeiter und Gäste/  
*Offices scientific Staff and guests*

Technikräume/  
*Installations rooms*



## Studiengang Nanotechnologie/ Study Course Nanotechnology

Die Fakultäten für Elektrotechnik und Informatik, für Maschinenbau, für Mathematik und Physik sowie die Naturwissenschaftliche Fakultät der Leibniz Universität Hannover bieten erstmals ab dem Wintersemester 2008 gemeinsam den interdisziplinären Studiengang Nanotechnologie an. Der Bachelorstudiengang führt einerseits zu einem ersten berufsqualifizierenden Abschluss, andererseits befähigt er zur Fortsetzung des Studiums im konsekutiven forschungsorientierten Masterstudiengang. Durch das 2003 erbaute Produktionstechnische Zentrum Hannover (PZH) sowie den Neubau des Laboratoriums für Nano- und Quantenengineering (LNQE) verfügt die Universität über eine hoch moderne Ausstattung. Dies sind optimale Voraussetzungen, um nicht nur Spitzenforschung am Standort Hannover betreiben zu können, sondern auch mit hochqualitativer Lehre den zukünftigen Bedarf an Fachkräften zu sichern.

### Struktur des Studienganges

Die Regelstudienzeit des Bachelor-Studiengangs „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 eine Studienarbeit, durch insgesamt 12 Wochen berufspraktische Tätigkeiten und Fachexkursionen sowie der Bachelorarbeit als Abschlussarbeit. Insgesamt sind 180 Leistungspunkte (LP) zu erreichen, welche sich wie folgt auf die einzelnen Leistungen aufteilen:

*The faculties of electrical engineering and computer science, mechanical engineering, mathematics and physics, and natural sciences of the Leibniz Universität Hannover offer as of winter semester 2008 the joint interdisciplinary study course nanotechnology for the first time. The bachelor course leads to a first occupation-qualifying graduation on the one hand, on the other hand it enables students to continue their studies in the consecutive research-oriented master course. By the 2003 build Centre of Technical Production (PZH) as well as the construction of the Laboratory for Nano and Quantum Engineering (LNQE), the university has an ultra-modern facilities. These are optimal conditions, in order to be able to operate not only top research at the location Hannover but also to secure future demand for skilled workers with high quality teaching.*

### 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. It bases and in-depth knowledge from different study focusing taught. In addition, tutoring is offered to the acquisition of key competencies. On the other hand, the practical training occurs by working out a study thesis, 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, which split as follows for the individual services:*

Grundlagenkurse/ <i>Foundation courses</i>	97 LP/CP
Vorlesungen und Labore des Vertiefungsstudiums/ <i>Lectures and laboratory studies of the deepening study</i>	47 LP/CP
Studienarbeit (300 Stunden)/ <i>Study thesis (300 hours)</i>	10 LP/CP
Bachelorarbeit (300 Stunden)/ <i>Bachelor thesis (300 hours)</i>	10 LP/CP
Fachpraktikum (12 Wochen)/ <i>Internship (12 weeks)</i>	15 LP/CP
Fachexkursionen (3 Tage)/ <i>Study tours (3 days)</i>	1 LP/CP
<b>Summe/Sum:</b>	<b>180 LP/CP</b>

## Grundlagenstudium

Der Bachelor-Studiengang 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.

### Foundation 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 foundation study is divided into the following competency: general, chemistry, electrical engineering and computer science, mechanical engineering, mathematics, and physics. The courses of the first three semesters are determined.*

*Bachelor thesis in the 6th Semester.*

### Fachexkursionen (3 Tage, 1,5 LP)

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

### Study tours (3 days, 1.5 CP)

*Excursions to companies, research institutions or trade fairs in an amount of three days.*

### Studienarbeit (300 Stunden, 10 LP)

Im Rahmen einer Studienarbeit arbeiten die Studierenden an einem ersten, eigenen wissenschaftlichen Projekt im Bereich der Nanotechnologie.

### Study thesis (300 hours, 10 CP)

*Within the framework of a study thesis, the students work on a first own scientific project in the field of nanotechnology.*

Kompetenzfeld: Allgemein (4 LP)/ <i>Competence area: General (4 CP)</i>
Einführung in die Nanotechnologie/ <i>Introduction to nanotechnology</i>
Kompetenzfeld: Chemie (7 LP)/ <i>Competence area: Chemistry (7 CP)</i>
Allgemeine Chemie/ <i>General chemistry</i>
Kompetenzfeld: Elektrotechnik und Informatik (18 LP)/ <i>Competence area: 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>
Informationstechnisches Praktikum/ <i>Information technology practical</i>
Kompetenzfeld: Maschinenbau (16 LP)/ <i>Competence area: Mechanical engineering (16 CP)</i>
Mikro- und Nanotechnologie/ <i>Micro and Nanotechnology</i>
Technische Mechanik I für Maschinenbau/ <i>Applied Mechanics I for mechanical engineering</i>
Technische Mechanik II für Maschinenbau/ <i>Applied Mechanics II for mechanical engineering</i>
Kompetenzfeld: Mathematik (30 LP)/ <i>Competence area: Mathematics (30 CP)</i>
Mathematik für Ingenieure I/ <i>Mathematics for Engineers I</i>
Mathematik für Ingenieure II/ <i>Mathematics for Engineers II</i>
Mathematik für Ingenieure III/ <i>Mathematics for Engineers III</i>
Kompetenzfeld: Physik (22 LP)/ <i>Competence area: Physics (22 CP)</i>
Experimentalphysik für Chemie, Biochemie, Geowissenschaft, Geodäsie und Geoinformatik/ <i>Experimental physics for chemistry, biochemistry, geology, geodesy and geoinformatics</i>
Physik II/ <i>Physics II</i>
Physik III/ <i>Physics III</i>

Tabelle 1/*Table 1*

Kurse im Grundlagenstudium/*Courses of the foundation study*

Pflichtfach (5 LP)/ <i>Compulsory subject (5 CP)</i>
Anorganische Chemie I/ <i>Inorganic Chemistry I</i>
Kompetenzfeld: Chemie (17 LP)/ <i>Competence area: Chemistry (17 CP)</i>
Instrumentelle Methoden I/ <i>Instrumental Methods I</i>
Physikalische Chemie I/ <i>Physical Chemistry I</i>
Technische Chemie I/ <i>Technical Chemistry I</i>
Kompetenzfeld: Elektrotechnik und Informatik (16LP)/ <i>Competence area: Electrical engineering and computer science(16 CP)</i>
Grundlagen der Materialwissenschaften/ <i>Fundamentals of Materials Science</i>
Grundlagen der Messtechnik/ <i>Fundamentals of Metrology</i>
Halbleiterelektronik/ <i>Semiconductor Electronics</i>
Halbleitertechnologie/ <i>Semiconductor Technology</i>
Kompetenzfeld: Maschinenbau (16 LP)/ <i>Competence area: Mechanical engineering (16 CP)</i>
Entwicklungs- und Konstruktionsmethodik I/ <i>Development and design methodology I</i>
Mikrosystemtechnik/ <i>Microsystems technology</i>
Werkstoffkunde I/ <i>Material science</i>
Kompetenzfeld: Physik (16 LP)/ <i>Competence area: Physics (16 CP)</i>
Einführung in die Festkörperphysik/ <i>Introduction to Solid State Physics</i>
Elektronik und Messtechnik/ <i>Electronics and measurement technology</i>
Wahl- Kompetenzfeld: Spezialisierung (10 LP)/ <i>Election Competence area: Specialization (10 CP)</i>
Wahl-Kompetenzfeld (aus dem Katalog der Wahl-Kompetenzfelder des Masterstudiengangs), mindestens ein Pflicht- und ein Wahlfach/ <i>Election competence area (from the catalog of the election competence areas of the masters course) , at least a compulsory and an elective subject</i>

Tabelle 2/ *Table 2*Kurse im Vertiefungsstudium/*Courses of the deepening study***Bachelorarbeit (300 Stunden, 10 LP)**

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.

**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 Studenten 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.

**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 of competence in accordance with their wishes, and so shape their timetable. In addition, a further specialization by the choice of an electoral competence from the master program occurs. The deepening study also includes an internship, study tours, study thesis and the Bachelor thesis in the 6th Semester.*

**Bachelor thesis (300 hours, 10 CP)**

*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 nature of the task and the challenge must be compatible with the output of the issue are set. The bachelor thesis must be evaluated by two reviewers. It may be in the form of a working group be made. 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“.*

## Praktikum (20 Wochen, 15 LP)

Ein berufsbezogenes Praktikum bildet einen wesentlichen Bestandteil des Studiums. Der Gesamtumfang des abzuleistenden Praktikums umfasst 20 Wochen. Das Praktikum setzt sich aus 8 Wochen Vorpraktikum (Grundpraktikum) und 12 Wochen Fachpraktikum zusammen. Das Vorpraktikum dient dem Erwerb erster praktischer Erfahrungen in der industriellen Fertigung. Eingegliedert in ein Arbeitsumfeld von Auszubildenden, Facharbeitern, Meistern und Technikern mit überwiegend ausführendem Tätigkeitscharakter soll der Praktikant/die Praktikantin verschiedene grundlegende Fertigungsverfahren und Fertigungseinrichtungen sowie betriebstechnische Abläufe kennenlernen. Das Fachpraktikum dient dem Erwerb von Erfahrungen in typischen Aufgabenfeldern 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.

## Der Master-Studiengang

Der akkreditierte Master-Studiengang Nanotechnologie ist als Weiterführung des Bachelor-Studiengangs Nanotechnologie konzipiert und startet daher im Anschluss, d. h. wenn die ersten Studenten ihren Bachelor of Science gemacht haben (voraussichtlich ab Wintersemester 2011/2012).

### Master study course

*The accredited master study course nanotechnology is designed as continuation of the bachelor course nanotechnology and therefore starts ongoing, i. e. when the first students have earned their bachelor of science (probably from the winter semester 2011/2012).*



Website zum Studiengang: [www.lnqe.uni-hannover.de/nano/](http://www.lnqe.uni-hannover.de/nano/)

Website of the study course: [www.lnqe.uni-hannover.de/nano/](http://www.lnqe.uni-hannover.de/nano/)

## Internship (20 weeks, 15 CP)

*An occupational internship is an essential part of the course. The total size of the training period covers 20 weeks. The internship consists of 8 weeks prior internship (basic training period) and 12 weeks of co-op program together. The prior internship serves to get the first practical experience in industrial production. Incorporated in a work environment of trainees, skilled workers, foremen and technicians with predominantly executive nature, the trainee gets to know several basic manufacturing processes and production facilities, as well as operational processes. The 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 gives the trainee order.*

07.02.2008



Laboratorium für  
Nano- und Quantenengineering:  
Jahresbericht 2007



Cover Jahresbericht 2007.  
*Cover annual report 2007.*

## Aktuell in 2008/News in 2008

### Jahresbericht 2007

Der Jahresbericht gibt einen Überblick über das Profil und die Aktivitäten des LNQE.

Der Jahresbericht 2007 des Laboratoriums für Nano- und Quantenengineering kann hier heruntergeladen werden: [PDF \(7,5 MB\)](#).

Bitte beachten Sie, dass viele Inhalte verlinkt sind, d. h. durch anklicken erhalten Sie z. B. die Vorträge des letzten Jahres als PDF, schnellen Zugang zu Webseiten unserer Mitglieder oder die Texte des Pressespiegels.

### Annual report 2007

*The Annual report gives an overview on the profile and the activities of LNQE.*

*The Annual report 2007 of the Laboratory of Nano and Quantum Engineering can be downloaded here: [PDF \(7.5 MB\)](#).*

*Please note that much content is linked i. e. by clicking on it you get e. g. the talks of the last year as PDF, fast access to the websites of our members or the texts of the press review.*

16.04.2008

### Bachelorstudiengang „Nanotechnologie“ startet im Wintersemester 2008/09

Studiengang wird durch Kooperation verschiedener Fakultäten der Leibniz Universität Hannover möglich.

Ab dem Wintersemester 2008/2009 bietet die Leibniz Universität Hannover durch Kooperation der Fakultäten für Naturwissenschaften, Elektrotechnik und Informatik, Maschinenbau sowie Mathematik und Physik den konsekutiven Bachelor-Masterstudiengang „Nanotechnologie“ an. Er wird Studierende für die Tätigkeit in einem Bereich qualifizieren, der als Schlüsseltechnologie des 21. Jahrhunderts gilt.

Interessiert? Weitere Informationen gibt es unter:  
<http://www.LNQE.uni-hannover.de/nano>

Der Begriff „Nanotechnologie“ (griech.: nanos = Zwerg) bezeichnet die Erzeugung und Nutzung von Bauteilen mit Strukturen, die in mindestens einer Dimension kleiner sind als 100 Nanometer - also kleiner als ein zehntausendstel Millimeter. Die Bedeutung dieser Technik ist, dass bei sehr kleinen Abmessungen in

### Bachelor study course „Nanotechnology“ starts in winter semester 2008/09

*Study course is made possible through cooperation of different Faculties of Leibniz Universität Hannover.*

*As from winter semester 2008/2009, the Leibniz Universität Hannover offers the consecutive bachelor and master course „Nanotechnology“. The study course is made possible by close cooperation of the faculties Natural Sciences, Electrical Engineering and Computer Science, Mechanical Engineering, and Mathematics and Physics. It will qualify students for a field of work which is believed to be the key technology of the 21st Century.*

*Interested? More informations can be found here:  
<http://www.LNQE.uni-hannover.de/nano>*

*The term „nanotechnology“ (Greek: nanos = dwarf) characterizes the development and use of devices with structures which are in at least one dimension smaller than 100 nanometers - so smaller than ten thousand part of a millimeter. The impact of this technique is that at very small dimen-*



Werkstoffen völlig neue physikalische Effekte auftreten, die quantenmechanisch bedingt sind. Forschung und industrielle Umsetzung verursachen eine immer stärkere Nachfrage nach Akademikern, welche umfassende interdisziplinäre Kenntnisse sowohl im Bereich der Natur- als auch Ingenieurwissenschaften besitzen.

Die Absolventinnen und Absolventen haben gute Möglichkeiten, Arbeitsplätze in unterschiedlichen Bereichen wie Halbleiterfertigung, Biomedizintechnik oder Grundlagenforschung an neuen Materialien zu erhalten. „Der Bedarf an Spezialistinnen und Spezialisten, die ein breit gefächertes Fachstudium im Bereich der Nanotechnologie absolviert haben und Kenntnisse aus verschiedensten natur- und ingenieurwissenschaftlichen Bereichen aufweisen, ist enorm“, sagt der Physiker Prof. Rolf Haug, Sprecher des Vorstands des im Bau befindlichen Laboratoriums für Nano- und Quantenengineering (LNQE) der Leibniz Universität Hannover. Mit diesem neuen Studiengang sind Studierende erstmals in der Lage, solche auf den Arbeitsbereich Nanotechnik ausgerichteten interdisziplinären Kenntnisse zu erwerben.

Hinweis:

Für nähere Informationen steht Ihnen Dr.-Ing. Christine Ruffert unter Telefon 0511/762-4034 oder per E-Mail unter [ruffert@imt.uni-hannover.de](mailto:ruffert@imt.uni-hannover.de) gern zur Verfügung.

## **LNQE wird Mitglied des NMN e.V.**

**Verstärkte Zusammenarbeit entlang der Wertschöpfungskette im Nano- und Materialinnovationen Niedersachsen e. V.**

Der NMN e. V. ist ein Nanotechnologie-Netzwerk mit Unterstützung des Niedersächsischen Wirtschaftsministeriums entlang der Wertschöpfungskette und bringt Forschung, KMU, Industrie und Finanz zusammen. Der Zweck des Vereins ist die Förderung von Wissenschaft und Forschung, insbesondere durch Entwicklung und Einsatz von Nano- und Materialinnovationen in Niedersachsen,

*sions in materials all-new physical effects arise, which are attributable to quantum mechanics. Research and industrial transfer cause an increasing request on academics with broad interdisciplinary knowledge on nature sciences and engineering.*

*The alumnae and alumni have good possibilities to get job in various fields of work like semiconductor production, biomedicine technique or basic research on new materials. „The demand on specialists with broad professional studies in nanotechnology and knowledge in the fields of natural and engineering science is enormous!“ say physician professor Rolf Haug, speaker of the managing board of the Laboratory of Nano and Quantum Engineering (LNQE) of Leibniz Universität Hannover, which is right now under construction. With this new study course the students are able to gain the interdisciplinary skills focused on the field of work nanotechnology for the first time.*

*Notice:*

*For further information is Dr.-Ing. Christine Ruffert available under telephone +49 (0)511 762 -4034 or E-Mail [ruffert@imt.uni-hannover.de](mailto:ruffert@imt.uni-hannover.de).*

## **LNQE becomes Member of NMN e.V.**

**Increased cooperation along the value chain in the Nano- und Materialinnovationen Niedersachsen e. V.**

*The NMN e. V. is a nanotechnology network with support of the Lower Saxony Ministry for Economics, Labour, and Transport along the value chain and brings research, SME, industry, and finance together. The aim of the registered association is the support of science and research, in particular through development and use of nano and materials innovations in Lower Saxony*

10.06.2008



- zur Optimierung der High-Tech-Basis in Niedersachsen,
- zur Stärkung der niedersächsischen FuE- und Wirtschaftslandschaft,
- zur Schaffung und Sicherung von Arbeitsplätzen.

Durch die Mitgliedschaft des LNQEs als Nanotechnologie-Cluster der Leibniz Universität Hannover ergeben sich vielfältige Synergieeffekte. Insbesondere:

- Informationsaustausch zwischen allen Mitgliedern des Vereins,
- verstärkte Öffentlichkeitsdarstellung,
- Vernetzung zu KMU und Industrie,
- Vermittlung von Praktikumsplätzen für die Studenten des neuen Studiengangs Nanotechnologie an der Leibniz Universität Hannover.

Auf gute Zusammenarbeit!

- for optimization of the high-tech-base of Lower Saxony,
- for strengthening of Lower Saxony's R & D and economy landscape
- for creating and saving jobs.

*By the membership of the LNQE as a nanotechnology cluster of the Leibniz Universität Hannover various synergistic effects result. In particular:*

- Exchange of information between all members of the association,
- Increased public representation,
- Networking to SME and industry,
- Placement of industrial training for students of the new study course nanotechnology at Leibniz Universität Hannover.

*We wish a good cooperation!*

16.06.2008

### **Erste Mitgliederversammlung des LNQE 2008**

**Vorstand für drei Jahre wiedergewählt.**

Am Mittwoch, den 11.06.2008 fand die erste Mitgliederversammlung des LNQE 2008 statt. Die wichtigsten Punkte der Tagesordnung waren:

- Bericht über die Aktivitäten des LNQE seit der letzten MV durch Prof. Dr. Rolf Haug
- LNQE-Neubau:
  - Vorstellung des Planungsstandes
  - Großgeräte: Durch eine Mitgliederbefragung wird eine Prioritätenliste erstellt werden.
- Diskussion Nutzerkonzept LNQE-Neubau: Maßgebliche Kriterien für die Nutzung sind wissenschaftlicher Inhalt des Forschungsvorhabens auf dem Gebiet des Nano- und Quantenengineering, Interdisziplinarität und Vernetzung zum LNQE.
- Wahl des Vorstandes: Der amtierende Vorstand, bestehend aus Prof. Caro, Prof. Gatzen, Prof. Haug und Prof. Osten, stellte sich zur Wiederwahl. Jeder der Vier

### **First General meeting of the LNQE 2008**

**Executive board re-elected for a period of 3 years.**

*On Wednesday 11.06.2008 the first general meeting of the LNQE 2008 took place. The most important agenda items were:*

- Report of the executive board on the events since the last general meeting by Prof. Dr. Rolf Haug
- LNQE New building:
  - Presentation of the status of planning
  - Large tools: A priority list will be created by a member survey
- Discussion user concept: Major criteria for the use are scientific content of the research project on the fields of nano and quantum engineering, interdisciplinarity, and network LNQE.
- Election of the executive board: The acting executive board, consisting of Prof. Caro, Prof. Gatzen, Prof. Haug and Prof. Osten, stand for re-election. All four were voted without vote against an accepted the poll.

*The protocol of the general meet-*

wurde ohne Gegenstimme gewählt und nahm die Wahl an.

Das Protokoll der Mitgliederversammlung steht im internen Bereich den Arbeitsgruppen des LNQE zum Download zur Verfügung.

## **Wissenschaftsrat stuft Forschungsbau LNQE in Hannover als herausragend ein Laboratorium für Nano- und Quantenengineering (LNQE) erhält Förderung.**

Von Mittwoch, 2. bis Freitag, 4. Juli 2008 tagte der Wissenschaftsrat in Berlin. Das Gremium gibt Empfehlungen zur Bundesförderung von Forschungsbauten an Hochschulen. Das Bauvorhaben Laboratorium für Nano- und Quantenengineering (LNQE) der Leibniz Universität Hannover belegt dabei einen sehr guten fünften Platz in der Reihung der insgesamt 16 geförderten Bauten. Sechs weitere Vorhaben wurden nicht zur Förderung empfohlen. Durch die Bewilligung der Förderung wird das Bauvorhaben durch weitere Bundesmittel - voraussichtlich in Millionenhöhe - unterstützt.

„Die sehr gute Platzierung zeigt, dass das LNQE in die Spitzengruppe der nationalen Nanotechnologiezentren vorstößt. Diese Position gilt es nun zu festigen und auszubauen“, sagt Prof. Rolf Haug, Sprecher des Vorstandes des LNQE. „Mit dem Forschungsbau erhalten wir exzellente technologische Möglichkeiten und können hoffentlich in Zukunft zu ähnlichen Zentren, wie sie bereits beispielsweise an der ETH Zürich oder in Harvard bestehen, aufschließen.“

Das Laboratorium für Nano- und Quantenengineering ist ein interdisziplinäres Forschungszentrum für Nanotechnologie an der Leibniz Universität Hannover. Es umfasst 25 Arbeitsgruppen aus den Natur- und Ingenieurwissenschaften. Inhaltliche Ziele sind sowohl exzellente Grundlagenforschung als auch anwendungsbezogenes Engineering im Nanobereich, begleitet durch eine entsprechende fächerübergreifende Ausbildung. Im Wintersemester 2008

*ing can be downloaded by the work groups of the LNQE in the members area.*

## ***The Wissenschaftsrat rates scientific new building LNQE in Hannover/Germany as outstanding***

***Laboratory of Nano and Quantum Engineering (LNQE) gets funding.***

*From Wednesday 23th till Friday 25th July 2008 the Wissenschaftsrat held a meeting in Berlin/Germany. This committee gives recommendations for federal grants of new buildings in universities. The building project Laboratory of Nano and Quantum Engineering (LNQE) of the Leibniz Universität Hannover come a very good 5th place of in total 16 funded buildings. Six further building were not recommended for grants. With the approval of the grants the building project is funded with additional federal funds - presumably into the millions - .*

*“The very good positioning shows that the LNQE push forwards the top group of national nanotechnology centers. It is vital to strengthen and to further build up this position.“ Says Prof. Rolf Haug, speaker of the executive board of the LNQE. „With the new building we get excellent technological possibilities and we can hopefully close up in the future to similar centers, as they already exist for instance at the ETH Zurich or in Harvard“.*

*The Laboratory of Nano and Quantum Engineering (LNQE) is an interdisciplinary research center on nanotechnology at the Leibniz Universität Hannover. It comprises 25 work groups from science and engineering. Goals are excellent basic research and applied engineering at the nanoscale, accompanied by corresponding interdisciplinary teaching. In winter semester 2008 starts the bachelor study course „nanotechnology“ at the Leibniz University Hannover.*

*The scientific building has 430 sqm of chemical, measurement and laser laboratories. 410 sqm are a re-*

16.07.2008

startet an der Leibniz Universität Hannover der Studiengang „Nanotechnologie“ mit Abschluss Bachelor.

Der Forschungsbau bietet auf 430 qm Platz für Chemielabore, Mess- und Laserlabore. 410 qm stehen für einen Forschungsreinraum sowie 509 qm für Arbeitsräume für 44 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter zur Verfügung. Die Kosten betragen zirka 14 Mio. Euro. Bereits im September 2007 wurde mit dem Bau begonnen. Mit der Fertigstellung ist im Sommer 2009 zu rechnen. Wer Interesse daran hat, die täglichen Baufortschritte zu beobachten, hat unter [www.LNQE.uni-hannover.de](http://www.LNQE.uni-hannover.de) die Möglichkeit dazu - auf dem Gelände ist eine Webcam installiert.

Zum gleichem Thema:

Pressemeldung des Wissenschaftsrates (15/2008): [link](#)

12.09.2008

**Gäste aus Saratov/Russland**  
**Frau Klimova und Frau Stetsyra von der Saratov State University sind für zwei Wochen zu Gast im LNQE.**

Seit Mittwoch, den 10. September 2008 sind Frau Klimova und Frau Stetsyra zu Gast im LNQE und informieren sich in den beteiligten Instituten über Nanotechnologie-Forschung.

Die Stadt Saratov ist die Hauptstadt im gleichnamigen russischen Gebiet, hat etwa 850.000 Einwohner und liegt am rechten Ufer der mittleren Wolga. Saratov ist eine traditionsreiche Stadt der Wissenschaft und Kultur. Die Saratov State University ist eine der größten Forschungs- und Lehrinstitutionen Russlands mit 28 Departments und Instituten, mehr als 90 Studiengängen und ca. 28 tausend Studenten.

[Portrait von Saratov und der Universität \(Film, avi, 70 MB\)](#)

Frau Dr. Svetlana Stetsyra ist Dozentin des Lehrstuhls für Materialkunde, Technologie und Qualitätssicherung an der Fakultät für nano- und biomedizinische Technologien der Saratov State University und stellvertretende Dekanin für Ausbildungsprozesse,

*search clean room and 509 sqm are workrooms for 44 staff members. The costs are approx. 14 Mio Euros. In September 2007 the construction was already begun. The completion will be in summer 2009. If you want to see the daily progress, you have the opportunity on [www.LNQE.uni-hannover](http://www.LNQE.uni-hannover.de) - on the construction site is a webcam installed.*

*On the same subject:*

*Press report of the Wissenschaftsrat (15/2008): [link](#)*

**Guests from Saratov/Russia**  
**Ms. Klimova and Ms. Stetsyra of the Saratov State University are guests for two weeks at the LNQE.**

*Since Wednesday 10th September, Ms. Klimova and Ms. Stetsyra are guests of the LNQE and inform themselves on nanotechnology research in the participating institutes.*

*The city Saratov is the capital city of the Russian area with the same name, has about 850.000 citizens and is located at the right bank of the middle Volga. Saratov is a city rich in tradition in science and culture. Saratov State University is a major higher education and research institution in Russia. The university has 28 departments and institutes, more than 90 programmes of study are offered and the current enrolment is around 28 thousand students.*

[Portrait of Saratov and the University \(Movie, avi, 70 MB\)](#)

*Ms. Dr. Svetlana Stetsyra is lecturer of the chair of material science, technology and quality management at the Department of Nano - and Biomedical Technologies of Saratov State University and Depute of Dean for Educational Work, Ms. Svetlana Klimova is*

Frau Svetlana Klimova ist dort Doktorandin.

[Kurzvorstellung des Department of Nano - and Biomedical Technologies \(Powepoint, ppt, 17 MB\)](#)

## Richtfest vom LNQE-Forschungsbau

**Feierliches Richtfest unter Beisein von Wissenschaftsminister Lutz Stratmann am 15. September 2008.**

Nach einem Jahr Bauzeit feierte das Laboratorium für Nano- und Quantenengineering (LNQE) das Richtfest des neuen Forschungsbaus am Schneiderberg 38, 30167 Hannover.

Die Grußworte hielten Dipl.-Ing. Matthias Reinhard (Leiter vom Staatlichen Baumanagement Hannover), Prof. Dr. Erich Barke (Präsident der Leibniz Universität Hannover), Lutz Stratmann (Nds. Minister für Wissenschaft und Kultur), Prof. Dr. Rolf Haug (Vorstandssprecher des LNQE) und Michael Zimmermann (Architekturbüro KSP Engel und Zimmermann). Alle Redner unterstrichen die hervorragende Leistung aller Planer, Verantwortlichen und Bauleute, diesen hochtechnologischen Forschungsbau zu errichten. Lobend erwähnt wurde mehrfach die erfolgreiche Evaluation des LNQE-Forschungsbaus durch den Wissenschaftsrat als auch die jüngste positive Evaluation des LNQE als interdisziplinäres Forschungszentrum durch die Wissenschaftliche Kommission Niedersachsen.

Nach dem Richtspruch durch Herrn Hermann, Polier der Firma Industriebau Wernigerode, wurde die Richtkrone gesetzt. „...das der, der hier forscht, das er es auch bezahlen kann“ wünschte Herr Hermann mit einem Augenzwinkern.

Am 17. Juli 2009 ist der Übergabetermin des Gebäudes an die Nutzer. Der tägliche Baufortschritt lässt sich mit der Webcam des LNQE verfolgen. Siehe auch: [Online News der Leibniz Universität Hannover am 15.09.2008](#)

*PhD student there.*

[Short representation of the Department of Nano - and Biomedical Technologies \(Powepoint, ppt, 17 MB\)](#)

## **Topping out ceremony of the LNQE new research building Grant topping out ceremony under presence of Minister of Science Lutz Stratmann at 15th September 2008.**

*After one year of construction time, the Laboratory of Nano and Quantum Engineering (LNQE) celebrated the Topping out ceremony of the LNQ new research building at Schneiderberg 38, 30167 Hannover, Germany.*

*The Greeting were given by Dipl.-Ing. Matthias Reinhard (head of public project management Hannover), Prof. Dr. Erich Barke (president of Leibniz Universität Hannover), Lutz Stratmann (minister for science and culture of Lower Saxony), Prof. Dr. Rolf Haug (speaker of the executive board of the LNQE), and Michael Zimmermann (architectural office KSP Engel and Zimmermann). All speakers underlined the first-rate performance of all planners, persons responsible, and construction workers, to put up this high technological research building. Commended mentioned was the successful evaluation of the LNQE new research building by the german Wissenschaftsrat and also the recent positive evaluation of the LNQE as an interdisciplinary research center by the Wissenschaftliche Kommission Niedersachsen.*

*After the topping-out speech by Mr. Hermann, foreman of the firm Industriebau Wernigerode, the topping-out crown was set. „...that the person, who researches here, that he can pay it also“ wished Mr. Hermann with a wink with the eye.*

*At 17th July 2009 is the date of transfer of the building to the users. The daily construction progress can be seen with the webcam of the LNQE. See also: [Online News of the Leibniz Universität Hannover at 15.09.2008](#)*

19.09.2008



Fotostrecke Richtfest LNQE am 15. September 2008  
*Photo gallery Topping out ceremony LNQE on 15th September 2008*

30.09.2008

**NanoDay 2008**

**Bereits zum vierten Mal fand der Nanotechnologie-Workshop in Hannover statt.**



Fotostrecke NanoDay2008  
am 25. September 2008  
[Photo gallery NanoDay2008](#)  
on 25th September 2008

Am Donnerstag, den 25. September 2008 fand der jährliche NanoDay des Laboratoriums für Nano- und Quantenengineering (LNQE) in Hannover statt. In acht Vorträgen und einer Postersitzung mit 40 angemeldeten Postern wurde ein Einblick in die aktuelle Forschung im LNQE gegeben. Die drei besten Poster wurden mit freundlicher Unterstützung durch den Freundeskreis der Leibniz Universität Hannover ausgezeichnet.

Die Preisträger sind:

„Nanopartikel als Kornfeiner in Aluminiumlegierungen“

Eric Wulf<sup>1</sup>, Christian Krause<sup>1</sup>, Dirk Bormann<sup>1</sup>, Mirko Schaper<sup>1</sup>, Jörg-August Becker<sup>2</sup>, Verena Becker<sup>2</sup>, Armin Feldhoff<sup>2</sup>, Friedrich-Wilhelm Bach<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Institut für Werkstoffkunde, Leibniz Universität Hannover

<sup>2</sup> Institut für Physikalische Chemie und Elektrochemie, Leibniz Universität Hannover

„Enhancement of photocatalytical activity by gold nanostructures in ordered mesoporous titania films“

Inga Bannat<sup>1</sup>, Katrin Wessels<sup>1</sup>, Detlef Bahnemann<sup>2</sup>, Torsten Oekermann<sup>1</sup>, Michael Wark<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Institute of Physical Chemistry and Electrochemistry, Leibniz University Hannover

<sup>2</sup> Institute of Technical Chemistry, Leibniz University Hannover

„Imaging Phonons With Atomic Resolution“

H. Gawronski, M. Mehlhorn und K. Morgenstern

Institut für Festkörperphysik, Abteilung Oberflächen, Leibniz Universität Hannover

Das LNQE bedankt sich bei allen Teilnehmern und Vortragenden für Ihre Teilnahme am NanoDay2008.

**NanoDay 2008**

**The nanotechnology workshop took place in Hannover/Germany already for the fourth time.**

Thursday, the 25 September 2008 the annual NanoDay of the Laboratory of Nano and Quantum Engineering (LNQE) took place in Hannover/Germany. In eight short talks and one poster session with 40 registered posters an insight into the recent interdisciplinary research in the LNQE was given. The best three posters were awarded with friendly support of the Freundeskreis der Universität Hannover e. V.

The prize winners are:

„Nanopartikel als Kornfeiner in Aluminiumlegierungen“

Eric Wulf<sup>1</sup>, Christian Krause<sup>1</sup>, Dirk Bormann<sup>1</sup>, Mirko Schaper<sup>1</sup>, Jörg-August Becker<sup>2</sup>, Verena Becker<sup>2</sup>, Armin Feldhoff<sup>2</sup>, Friedrich-Wilhelm Bach<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Institut für Werkstoffkunde, Leibniz Universität Hannover

<sup>2</sup> Institut für Physikalische Chemie und Elektrochemie, Leibniz Universität Hannover

„Enhancement of photocatalytical activity by gold nanostructures in ordered mesoporous titania films“

Inga Bannat<sup>1</sup>, Katrin Wessels<sup>1</sup>, Detlef Bahnemann<sup>2</sup>, Torsten Oekermann<sup>1</sup>, Michael Wark<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Institute of Physical Chemistry and Electrochemistry, Leibniz University Hannover

<sup>2</sup> Institute of Technical Chemistry, Leibniz University Hannover

„Imaging Phonons With Atomic Resolution“

H. Gawronski, M. Mehlhorn und K. Morgenstern

Institut für Festkörperphysik, Abteilung Oberflächen, Leibniz Universität Hannover

The LNQE thanks all participants and contributors for the success of the NanoDay 2008.

## Gemeinsame Wissenschaftskonferenz

**Neubau LNQE erhält Bundesförderung in Millionenhöhe.**

Jetzt ist es amtlich: Nachdem der Wissenschaftsrat das Bauvorhaben Laboratorium für Nano- und Quantenengineering (LNQE) der Leibniz Universität Hannover im Juli 2008 zur Förderung durch den Bund empfohlen hatte, hat jetzt die Gemeinsame Wissenschaftskonferenz (GWK) von Bund und Ländern die Förderung endgültig beschlossen. Die Kosten der Baumaßnahme betragen 14 Mio. Euro.

Die GWK ist die Nachfolgeorganisation der Bund-Länder-Kommission für Bildungsplanung und Forschungsförderung und am 1. Januar 2008 ihre Arbeit aufgenommen.

Zum gleichem Thema:

Pressemeldung der Gemeinsamen Wissenschaftskonferenz des Bundes und der Länder (GWK): [Link zu PM2008-19.pdf](#)

Pressemeldung des Ministeriums für Wissenschaft und Kultur des Landes Niedersachsen: [Link](#)

## LNQE erfolgreich evaluiert Formale Einrichtung als Forschungszentrum der Leibniz Universität Hannover.

Das Präsidium der Leibniz Universität Hannover hat in seiner Sitzung vom 5.11.2008 das Laboratorium für Nano- und Quantenengineering (LNQE) nach vorheriger Evaluation durch die Wissenschaftliche Kommission Niedersachsen (WKN) jetzt offiziell als interdisziplinäres Forschungszentrum eingerichtet.

Forschungszentren stehen für eine internationale und hohe wissenschaftliche Sichtbarkeit von Forschungsbereichen. Die Zusammenarbeit streckt sich dabei über Fach- und Fakultäts-grenzen hinweg und schließt auch die Beteiligung externer Forschungseinrichtungen ein. Forschungszentren werden in periodischen Zeitabständen von ca. fünf Jahren evaluiert.

## Joint Science Conference New building LNQE gets federal funding in to the millions.

*Now it is official: after the German Wissenschaftsrat recommended the building project Laboratory of Nano and Quantum Engineering (LNQE) in July 2008 for federal funding, has now the Joint Science Conference (GWK) of the Federal Government and the Länder finally granted the funding. The costs of the building project are 14 Mio Euros.*

*The GWK is the successor organization of the German Bund-Länder-Kommission for education planning and scientific funding, and has begun at 1st January 2008 its work.*

*On the same topic:*

*Press release of the Joint Science Conference: [Link to PM2008-19.pdf](#)*

*Press realize of the Ministry of science and culture of Lower Saxony: [Link](#)*

## LNQE successfully evaluated Formal establishment as a Research Center of the Leibniz Universität Hannover.

*The presidium of the Leibniz Universität Hannover established the Laboratory of Nano and Quantum Engineering (LNQE) in its meeting of 5.11.2008 now official as an interdisciplinary research centre, after previous evaluations by the Wissenschaftliche Kommission Niedersachsen (WKN).*

*Research centres have international and scientific visibility of the project. The cooperation extends beyond the borders of faculties and subjects and includes also the participation of external research institutions. The research centres are evaluated periodically (every five years).*

*The evaluation by the WKN was lead*

31.10.2008

17.11.2008

Die Evaluation durch die WKN wurde von Prof. Abstreiter/TU München geleitet. Im Evaluationsbericht heißt es zusammenfassend:

„Wesentliches Ziel des LNQE ist die Kontrolle von Materialien auf Größenskalen im Mikro- und Nanometerbereich, die Untersuchung der zu erwartenden neuen Material- und Systemeigenschaften, sowie deren Umsetzung in neuartige Anwendungen. Dieses Arbeitsgebiet ist höchst aktuell und weltweit entstehen an vielen Universitäten und Forschungseinrichtungen ähnliche Zentren. Die nationale und internationale Konkurrenz ist außerordentlich groß und es bedarf enormer Anstrengungen und innovativer Ideen um hier eine Führungsrolle einnehmen zu können. Dies wird voraussichtlich nur in einigen Teilbereichen gelingen. Eine Besonderheit des LNQE ist die sehr breite interdisziplinäre Aufstellung, die ungewöhnliche Synergien erwarten lässt, wie es nur an wenigen anderen Stellen möglich ist.

Die Einstufung des LNQE als Forschungszentrum der Leibniz Universität Hannover wird von den Gutachtern einstimmig und mit Nachdruck empfohlen.“

*by Prof. Abstreiter / TU München. The evaluation report says in summary (translated from German):*

*“Vital goal of the LNQE is the control of materials on size scales of micron- and nanometers, the study of expected new materials and systems properties, as well as the their transfer in new applications. This research area is very most up-to-date and world wide arise similar centres in many universities and research facilities. The national and international competition is exceptional large and enormous efforts and innovative ideas are needed to take a leading role here. This will presumably succeed only in some subareas. A specialty of the LNQE is the very broad interdisciplinary formation, which lets expect unusual synergies, like there are possible only in few other sites.*

*The establishment of the LNQE as a research centre of the Leibniz Universität Hannover is recommended by the referees unanimously and with force.”*



## NanoDay 2008/NanoDay 2008

Am Donnerstag, den 25. September 2008 fand der jährliche NanoDay des Laboratoriums für Nano- und Quantenengineering (LNQE) in Hannover statt. In acht Vorträgen und einer Postersitzung mit 40 angemeldeten Postern wurde ein Einblick in die aktuelle Forschung im LNQE gegeben. Die drei besten Poster wurden mit freundlicher Unterstützung durch den Freundeskreis der Leibniz Universität Hannover ausgezeichnet (Siehe Aktuell vom 30.09.2008 auf Seite 38).

*Thursday, the 25 September 2008 the annual NanoDay of the Laboratory of Nano and Quantum Engineering (LNQE) took place in Hannover/Germany. In eight short talks and one poster session with 40 registered posters an insight into the recent interdisciplinary research in the LNQE was given. The best three posters were awarded with friendly support of the Freundeskreis der Universität Hannover e. V. (See News from 30.09.2008 on page 38).*

### Das Programm/The Program

Die Vorträge gibt es als PDF auf der LNQE-Website zum downloaden.  
*The talks can be downloaded as a PDF from the LNQE-website.*

#### „Neue Festkörper-Protonenleiter: Funktionalisierte nanostrukturierte SiO<sub>2</sub>-Materialien für die Anwendung in Hochtemperatur-PEM-Brennstoffzellmembranen“

Roland Marschall, Michael Wark und Jürgen Caro  
Institut für Physikalische Chemie und Elektrochemie

#### „Einsatz von ultradünnen magnetoresistiven Schichtsystemen in Sensorapplikationen“

Tim Griesbach und Hans-Heinrich Gatzert  
Institut für Mikrotechnologie

#### „Analyseverfahren für den Entwurf nanoelektronischer Systeme unter Berücksichtigung stochastischer Fluktuationen“

Min Zhang, Markus Olbrich und Erich Barke  
Institut für Mikroelektronische Systeme - Entwurfsautomatisierung

#### „Räumlich aufgelöste Messung der Dotierkonzentration in Halbleitern mit Spin-Rausch Spektroskopie“

Jens Hübner, Michael Römer und Michael Oestreich  
Institut für Festkörperphysik, Abteilung Nanostrukturen

#### „Neuartige biomimetische organisch-anorganische Kompositmaterialien“

Britta Hering<sup>1</sup>, Sajjad Waraich<sup>2</sup>, Henning Menzel<sup>2</sup> und Peter Behrens<sup>1</sup>  
<sup>1</sup> Institut für Anorganische Chemie  
<sup>2</sup> Institut für Technische Chemie (TU Braunschweig)

#### „Zwei-Photonen Polymerisation und ihre Anwendung in der Plasmonik“

S. Passinger, R. Kiyan, C. Reinhardt, A. Seidel und B. Chichkov  
Laser Zentrum Hannover e.V., Nanotechnology Department

#### „Kontaktmechanik auf Nanoebene: Formulierung, numerische Methoden und Anwendungen“

Roger Sauer  
Institut für Kontinuumsmechanik

#### „Integration of low dimensional crystalline Si into functional epitaxial oxides“

Apurba Laha<sup>1</sup>, E. Bugiel<sup>1</sup>, A. Fissel<sup>2</sup>, and H. J. Osten<sup>1</sup>  
<sup>1</sup> Institute of Electronic Materials and Devices  
<sup>2</sup> Information Technology Laboratory

**NanoDay 2008**  
**Donnerstag 25.09.2008**  
Leibniz Universität Hannover, Welfengarten 1  
30167 Hannover, Hauptgebäude (1101)  
Vorträge im Kleinen Physikhörsaal (F-342), Poster im Lichthof

**Programm:**

09:00 - 09:15 Begrüßung und Frühstück

09:15 - 10:45 Sitzung I

- „Neue Festkörper-Protonenleiter: Funktionalisierte nanostrukturierte SiO<sub>2</sub>-Materialien für die Anwendung in Hochtemperatur-PEM-Brennstoffzellmembranen“  
Roland Marschall, Michael Wark und Jürgen Caro  
Institut für Physikalische Chemie und Elektrochemie
- „Einsatz von ultradünnen magnetoresistiven Schichtsystemen in Sensorapplikationen“  
Tim Griesbach und Hans-Heinrich Gatzert  
Institut für Mikrotechnologie
- „Analyseverfahren für den Entwurf nanoelektronischer Systeme unter Berücksichtigung stochastischer Fluktuationen“  
Min Zhang, Markus Olbrich und Erich Barke  
Institut für Mikroelektronische Systeme - Entwurfsautomatisierung

10:45 - 11:15 Kaffeepause

11:15 - 12:15 Sitzung II

- „Neuartige biomimetische organisch-anorganische Kompositmaterialien“  
Britta Hering<sup>1</sup>, Sajjad Waraich<sup>2</sup>, Henning Menzel<sup>2</sup> und Peter Behrens<sup>1</sup>  
<sup>1</sup> Institut für Anorganische Chemie  
<sup>2</sup> Institut für Technische Chemie (TU Braunschweig)
- „Zwei-Photonen Polymerisation und ihre Anwendung in der Plasmonik“  
S. Passinger, R. Kiyan, C. Reinhardt, A. Seidel und B. Chichkov  
Laser Zentrum Hannover e.V., Nanotechnology Department
- „Kontaktmechanik auf Nanoebene: Formulierung, numerische Methoden und Anwendungen“  
Roger Sauer  
Institut für Kontinuumsmechanik
- „Integration of low dimensional crystalline Si into functional epitaxial oxides“  
Apurba Laha<sup>1</sup>, E. Bugiel<sup>1</sup>, A. Fissel<sup>2</sup>, and H. J. Osten<sup>1</sup>  
<sup>1</sup> Institute of Electronic Materials and Devices  
<sup>2</sup> Information Technology Laboratory

12:15 - 13:00 Mittagspause

13:00 - 15:30 Sitzung III

- „Räumlich aufgelöste Messung der Dotierkonzentration in Halbleitern mit Spin-Rausch Spektroskopie“  
Jens Hübner, Michael Römer und Michael Oestreich  
Institut für Festkörperphysik, Abteilung Nanostrukturen

15:30 - 16:30 Posterabend

16:30 Konferenzabschluss & Preisverleihung des Posterpreises

www.LNQE.uni-hannover.de/nanoday2008.htm Gäste sind herzlich willkommen!



Begrüßung durch R. Haug/  
Greetings by R. Haug



8 Vorträge mit je 25+5 Minuten  
Länge von den Arbeitsgruppen  
des LNQE/8 talks with 25+5 min-  
utes length from the work groups  
of the LNQE

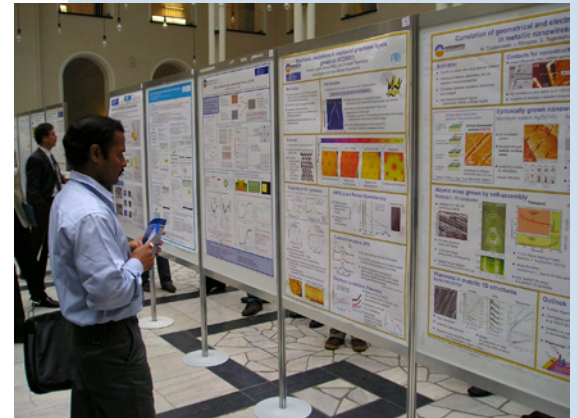




Postersitzung mit 40 registrierten Postern im Lichthof des Hauptgebäudes der Universität/Poster-session with 40 registered posters at the atrium of the university



2008



Konferenzphoto/ Conference photo



Posterpreis mit freundlicher Unterstützung des Freundeskreises der Leibniz Universität Hannover e. V./Poster prize with friendly support by the Freundeskreis der Leibniz Universität Hannover e. V.

## Kolloquien in 2008 *Colloquia in 2008*

- 16.04.2008 [„Nanopartikeltechnik: Erzeugen, Konfektionieren und Verarbeiten von Nanopartikeln zur Gestaltung innovativer Produkte“](#)  
Prof. Dr.-Ing. Arno Kwade  
Institut für Partikeltechnik  
TU Braunschweig
- 28.05.2008 [“Hydrogen Storage in novel complex hydrides“](#)  
Dr. Andreas Borgschulte  
EMPA Materials Sciences and Technology, Dept. Environment, Energy and Mobility, Abt. 138 „Hydrogen & Energy“, Überlandstrasse 129, CH-8600 Dübendorf (Switzerland)
- 19.11.2008 [“Nanoimprint lithography for optical components“](#)  
Dr. Ing. Giuseppe Scarpa  
Lehrstuhl für Nanoelektronik, Technische Universität München
- 10.12.2008 [„Analytisches aus der Speicher-Entwicklung“](#)  
Dr. Steffen Teichert  
Principal Physical Failure Analysis, Surface-/Material Analysis  
Qimonda Dresden GmbH & Co. OHG, Königsbrücker Straße 180, D-01099 Dresden
- .....
- 24.11.2008 NMN-Projektworkshop  
[„Highlights aus der Nanoforschung“](#)  
am Dienstag, den 24. November, von 10.00 – ca. 15.00 Uhr  
im Laser Zentrum Hannover e.V.

## Pressespiegel 2008

### Press Review 2008

(Artikel sind verlinkt/*Articles are linked*)

#### „Studiengang mit Zukunft“

Hannoversche Allgemeine Zeitung

22.04.2008

#### „Nanotechnologie – Made in Hannover“

Automotive Materials

06/2008

#### „Halbe Milliarde für Forschungsbauten von nationaler Bedeutung“

Pressemeldung Wissenschaftsrat 15/2008

07.07.2008

#### „Minister und Universitätspräsident besuchen Richtfest“

Online News der Leibniz Universität Hannover

15.09.2008

#### „Richtfest: Barke und Stratmann Seite an Seite“

Neue Presse

16.09.2008

#### „Thema des Tages: Ein angespanntes Verhältnis“

Hannoversche Allgemeine Zeitung

16.09.2008

#### „Hightech in Hannover“

Hannoversche Allgemeine Zeitung

16.09.2008

#### „55 Millionen Euro für niedersächsische Forscher“

Hannoversche Allgemeine Zeitung (online)

27.10.2008

#### „55 Millionen Euro für Forschung in Niedersachsen“

Nordwest-Zeitung

28.10.2008

#### „32 Millionen Euro für Hannovers Hochschulen“

Neue Presse

28.10.2008

## Projekte in 2008

### Projects in 2008

Im Folgenden finden Sie eine Auswahl von Projekten aus den Arbeitsgruppen des LNQE/*In the following you find a selection of projects from the work groups of the LNQE.*

### Anwendungen der affinen Arithmetik zur Verifikation analoger Schaltungen

Darius Grabowski, Markus Olbrich und Erich Barke

Institut für Mikroelektronische Systeme (IMS), Fachgebiet Entwurfsautomatisierung, Leibniz Universität Hannover  
Appelstraße 4, 30167 Hannover, Germany

Mit zunehmender Verkleinerung der Strukturgrößen in integrierten Schaltungen wächst der Einfluss von Parametervarianzen auf die Schaltungseigenschaften. Insbesondere bei analogen Schaltungen kann dieser zu Spezifikationsverletzungen führen. Für die Simulation solcher Systeme können prinzipiell zwei unterschiedliche Ansätze gewählt werden: Punktarithmetik (PA) und Gebietsarithmetik (GA). Die bekanntesten PA-basierten Verfahren sind Monte-Carlo- oder Corner-Case-Analyse: Diese Ansätze tasten den durch Varianzen aufgespannten Parameterraum punktweise ab und versuchen, den Worst-Case des Schaltungsverhaltens abzuschätzen bzw. Aussagen über die Verteilung von Schaltungseigenschaften zu geben. Sie weisen gewöhnlich folgende Nachteile auf:

- Eine vollständige Abdeckung des Parameterraums ist in endlicher

Zeit nicht möglich, somit liefert die Einhüllende der Ergebnisse keinen sicheren Einschluss aller tatsächlich möglichen Ergebnisse.

- Die Ergebnisse liefern keine Hinweise zur Optimierung der Dimensionierung, um die Spezifikation der Schaltung zu erfüllen.

GA-basierte Verfahren decken den gesamten Parameterraum ab, liefern jedoch häufig eine pessimistische Überabschätzung des tatsächlichen Schaltungsverhaltens. Einen bekannten Ansatz mit dieser Eigenschaft stellt die Intervallarithmetik dar.

Am IMS wurde der Blick auf die so genannte affine Arithmetik gerichtet, die ebenfalls zur Beschreibung von Gebieten geeignet ist. Die affine Arithmetik basiert auf den affinen Formen. Jede affine Form enthält Informationen über den Zentralwert (Mittelwert des Gebietes) und eine Linearkombination von partiellen Abweichungen. Die entsprechende Datenstruktur ist somit komplexer und rechenzeitintensiver im Vergleich zu Intervallen, bringt jedoch den Vorteil mit sich, dass lineare Abhängigkeiten im Verlauf der Berechnungen erhalten bleiben, was schließlich zu einer besseren Approximation im Hinblick auf Überabschätzung führt.

Ein weiterer wesentlicher Vorteil der affinen Arithmetik ist die vorhandene Möglichkeit zur Beschreibung von korrelierten Parametern durch affine Formen. Während Intervalle lediglich  $n$ -dimensionale Boxen beschreiben können, sind die tatsächlich auftretenden Toleranzkörper (z.B. für 3s-Abweichungen) durch affine Formen beliebig fein approximierbar. (Abbildung 2).

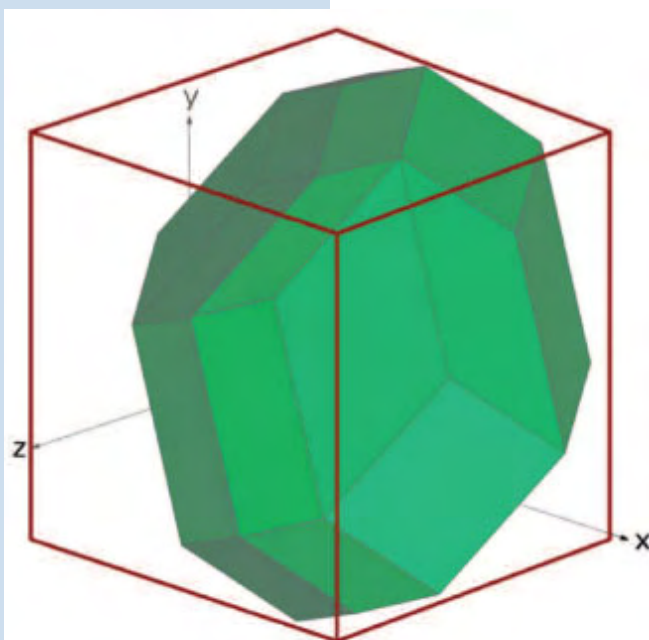


Abbildung 1: Affine Formen - Intervalle.

Die grundsätzliche Aufgabe bei der Behandlung analoger Schaltungen besteht in der Erweiterung der affinen Arithmetik zur Berechnung konservativer Lösungen für nichtlineare implizite Gleichungssysteme. Diese konservativen Lösungen werden auch als affine Approximationen bezeichnet.

Ein geeignetes Verfahren wurde am IMS entwickelt und auf die o.g. Problemstellungen übertragen. Abbildung 3 zeigt schematisch die Anforderungen an die affine Lösung, die einen sicheren Einschluss der exakten Lösung gewährleistet.

Mit Hilfe eines solchen affinen Gleichungslösers lassen sich die bekannten Analysearten, wie z.B. DC-, TR-, AC-Analyse (Abb. 4) sowie eine Spezifikationsüberprüfung durchführen. Darüber hinaus sind verbesserte Ansätze zum Model Checking bzw. der Erreichbarkeitsanalyse analoger Systeme denkbar.

Basierend auf dieser Grundlage sollen zukünftig die Vorteile der affinen Arithmetik in Form eines DFG-Projektes intensiver untersucht werden.

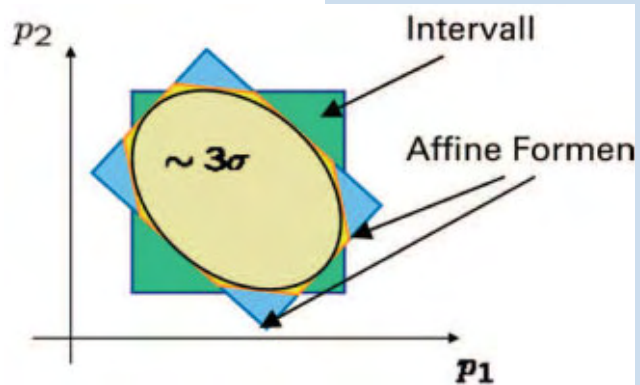


Abbildung 2: Beschreibung des Parameterraumes.

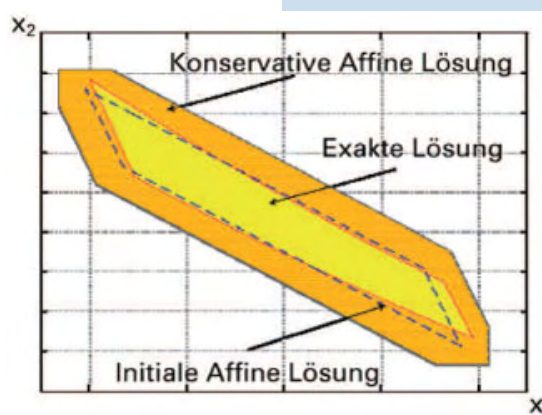


Abbildung 3: Konservative Approximation.

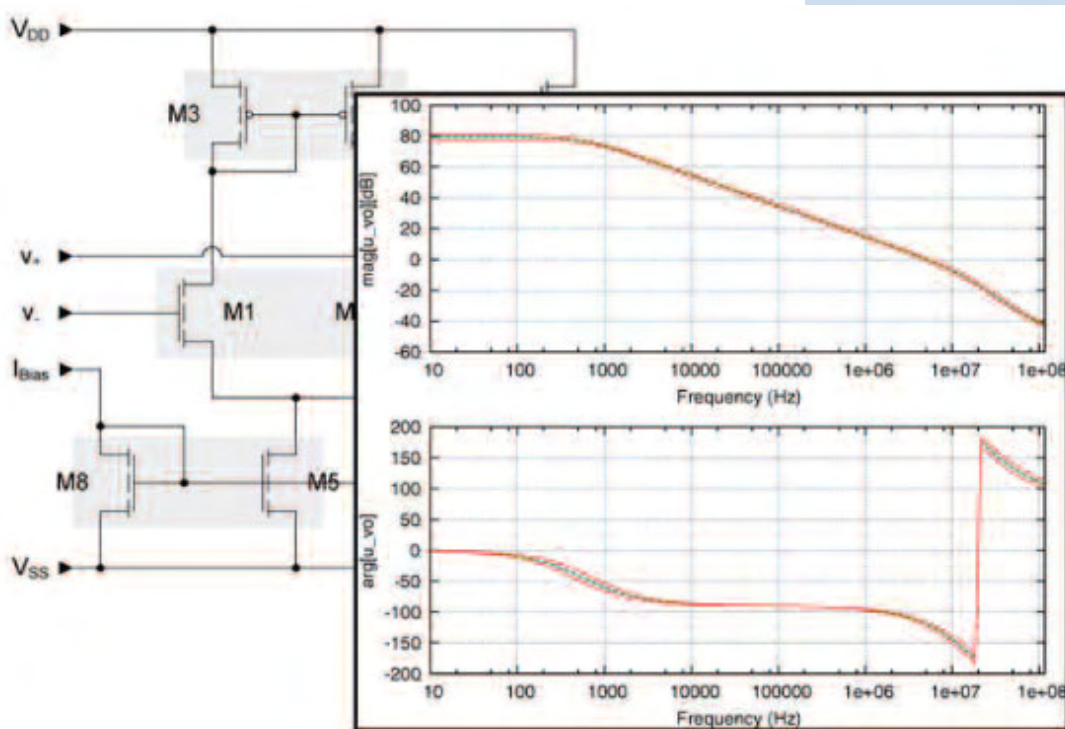


Abbildung 4: AC-Analyse eines Miller- OpAmps mittels affiner Arithmetik.

## Damped Bloch Oscillations of Bose-Einstein Condensates in Disordered Potential Gradients

S. Drenkelforth<sup>1</sup>, G. Kleine Büning<sup>1</sup>, J. Will<sup>1</sup>, T. Schulte<sup>1</sup>, N. Murray<sup>1</sup>, W. Ertmer<sup>1</sup>, L. Santos<sup>2</sup>, and J.J. Arlt<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup> Institut für Theoretische Physik, Leibniz Universität Hannover, Appelstraße 2, D-30167 Hannover, Germany

E-mail: drenkelforth@iqo.uni-hannover.de

*A detailed description of these results is given in: Drenkelforth et al. to appear in New Journal of Physics, see [cond-mat](#).*

### 1. Introduction

The ability to realise ultracold quantum gases in periodic potentials has enabled detailed studies of fascinating effects originating in solid state physics. Ongoing investigations of single particle phenomena such as Anderson localisation as well as many particle effects like the Bose-Glass phase and the Mott insulator [1, 2, 3, 4, 5, 6] show the variety of possibilities these ensembles offer. Especially the non-intuitive dynamics of quantum gases in periodic potentials is of interest for theoretical and experimental investigations, since quantum gases have enabled the first direct observation of Bloch oscillations [8] in tilted periodic potentials [9, 10, 11]. In these systems the periodicity leads to an oscillatory motion instead of a linear acceleration of the particles subjected to an external force.

In solid state systems scattering at imperfections of the crystal structure leads to damping of Bloch oscillations on timescales much shorter than the oscillation period itself. Therefore Bloch oscillations of electrons are only observable in semiconductor super lattices [12], where the large spatial period leads to high oscillation frequencies, which are faster than the damping. Optical lattices on the other hand constitute perfect optical crystals and allow for the observation of long lived Bloch oscillations [13, 14, 15, 16]. The experimental control of lattice parameters such as lattice depth and spacing, the possibility to detect the atomic cloud with absorption imaging and the very small momentum spread of Bose-Einstein condensates (BEC) have enabled detailed studies of this quantum effect.

A comparison of these systems gives

rise to the question how the controlled addition of disorder to an optical lattice will affect the dynamics of particles in such a periodic potential. Disorder can be realised with additional optical potentials [17, 18, 2, 19, 20, 21, 5, 7], impurity atoms [22, 23] or the roughness of the trapping potential close to the surface of atom chips [24]. The simultaneous application of a homogeneous force and the optical disorder potential constitutes a spatially inhomogeneous acceleration. This inhomogeneity can have important consequences for the application of Bloch oscillations as a sensitive tool for high precision measurements of small forces [15, 25, 26, 14, 13], since it leads to a dephasing of the quasi-momentum and thus to a damping of the centre-of-mass oscillation [27]. Therefore a detailed quantitative understanding of the effect of the disorder and the underlying mechanism is indispensable for future applications.

### 2. Experimental realisation

The experiments were performed with <sup>87</sup>Rb Bose-Einstein condensates in the  $F = 2$ ;  $m_F = 2$  state. A detailed description of our apparatus is given in [32]. Nearly pure BEC of up to  $N = 3 \times 10^5$  Atoms are produced, however all experiments described here were carried out with  $N = 5 \times 10^4$  atoms to reduce the interaction energy, and to ensure that no significant thermal background is present. After production of the BEC the magnetic offset field was adiabatically increased to 91 G within 440 ms, thus lowering the radial trapping frequency to  $\omega = 2 \pi \cdot 29$  Hz. This reduces the interaction energy by a factor of 6.25, which in combination with low atom numbers sufficiently inhibits the dynamical instability, such that up to four undamped Bloch oscillation periods can



be observed. The following procedure was used to observe the Bloch oscillations. After decreasing the radial trapping frequency the intensity of the optical lattice was adiabatically increased to its final value within 60 ms. Subsequently the atoms were subjected to either a homogeneous potential gradient or the spatially inhomogeneous one for a variable time. Finally all potentials were turned off at the same time and the atomic cloud was detected after a time-of-flight of 30 ms by absorption imaging.

The 1D optical lattice is provided by a standing light field at a wavelength of 825 nm, which is superimposed on the axial direction of the magnetic trap with a waist of  $\omega_0 = 140 \mu\text{m}$  at the position of the atoms. The investigations were performed at a lattice depth of  $2 E_r$ , since low lattice depths lead to a large width of the energy band and therefore to a high maximal group velocity. This results in an oscillation amplitude of the centre-of-mass motion of  $80 \mu\text{m}$  after a TOF of 30 ms, which can easily be detected, while the Bloch oscillations are not affected by Landau-Zener tunnelling [33].

The homogeneous potential gradient is provided by magnetic coils in anti-Helmholtz configuration, which produce gradients of up to 3.7 G/cm. This corresponds to an acceleration of  $2.4 \text{ m/s}^2$ .

The inhomogeneity is realised by a disordered optical dipole potential, generated by imaging a randomly structured chrome substrate radially onto the BEC, as described in a previous publication [2]. The correlation length of the disorder is  $8 \mu\text{m}$  and its depth was varied between 0 and  $135 \times 10^{-3} E_r$ , where the depth is defined as twice the standard deviation analogue to [17].

### 3. Damped Bloch oscillations

The theory of disorder induced damping of Bloch oscillations was investigated in detail in a previous publication [27] and we only briefly review the important features for the interpretation of the experimental results.

For the analysis of Bloch oscillations in an inhomogeneous potential gradi-

ent the GPE has to be modified by expanding the acceleration term to

$$V_{\text{grad}} = Fz + V_{\text{dis}}(z), \quad (1)$$

where  $V_{\text{dis}}(z)$  denotes the additional optical potential which constitutes the disorder.

Figure 1 shows the centre-of-mass position obtained from numerical simulations of damped Bloch oscillations for a typical disordered potential used in the experiment. One clearly recognises that the damping of the oscillations strongly depends on the disorder depth. The damping can be understood qualitatively in terms of the evolution of the phase difference from site-to-site. For an undisturbed homogeneous potential gradient it develops in time according to

$$\Delta\phi(t) = \delta E / \hbar \cdot t \quad (2)$$

where  $\delta E$  is the energy offset and  $\Delta\phi$  the time dependent phase difference between neighbouring sites.

The disorder gives rise to a spatially varying energy difference from site-to-site  $dE(z)$ . Therefore the phase evolution and the quasimomentum vary across the lattice. This broadening of the quasimomentum spectrum causes the damping of the Bloch oscillations, since each  $q$  corresponds to one group velocity.

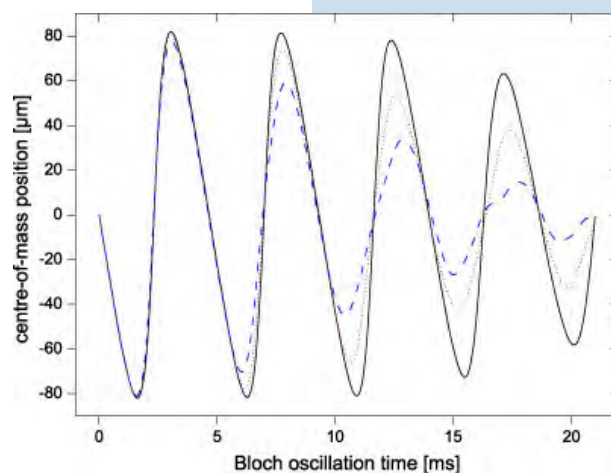


Figure 1. Centre-of-mass oscillation position of a BEC for a lattice depth of  $2 E_r$ , an acceleration of  $2.4 \text{ m/s}^2$  and disorder depths of  $0 E_r$  (black, solid line),  $70 \times 10^{-3} E_r$  (red, dotted line) and  $130 \times 10^{-3} E_r$  (blue, dashed line), obtained from a numerical solution of the GPE.

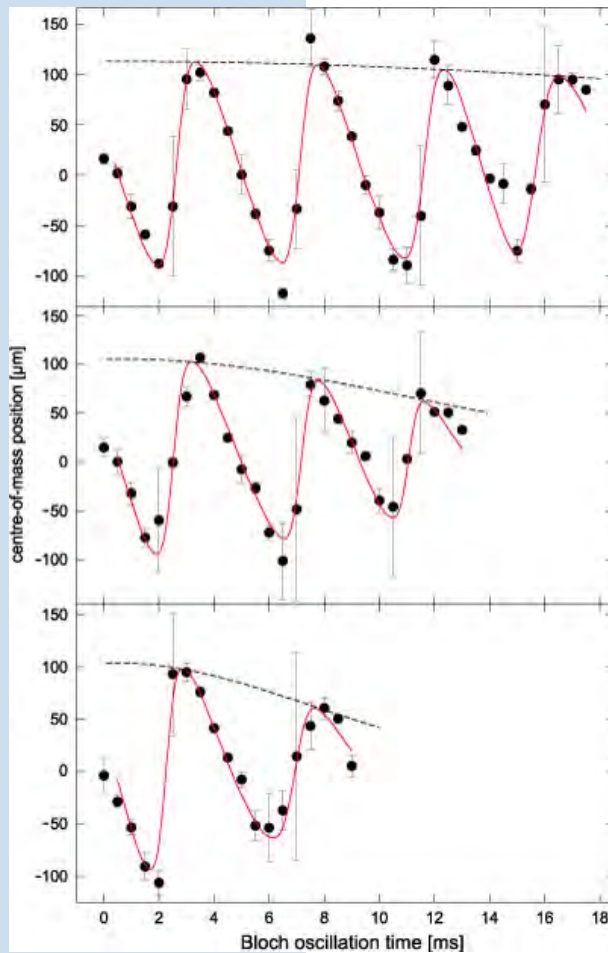


Figure 2. Centre-of-mass position of Bose-Einstein condensates performing damped Bloch oscillations. The disorder depths were  $35$ ,  $105$  and  $135 \times 10^{-3} E_r$ , from top down. A fit to the data (solid red line) and the Gaussian envelope (dashed black line) due to the damping are also shown. Note that the recorded oscillation time is reduced for increased disorder depth since the broadening of the quasimomentum spectrum causes a strong reduction of the contrast. This significantly reduces the signal-to-noise ratio of the absorption images.

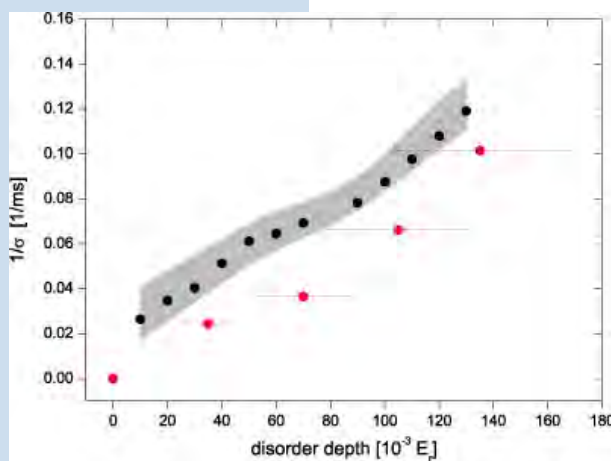


Figure 3. Damping coefficient  $1/\sigma$  of the centre-of-mass oscillation in the disordered lattice potential. The damping coefficients were obtained by applying the same fit procedure to the experimental data of Fig. 2 and the results of the numerical simulations. The red dots represent the experimental data and the black dots the simulations. Similar to the experimental case, the number of Bloch oscillation periods used in the fits to the simulations was reduced for increasing disorder depth. The shaded area corresponds to atom numbers used in the simulations ranging from  $3.5 \times 10^4$  to  $6.5 \times 10^4$ .

Figure 2 shows the experimental observation of disorder induced damping of Bloch oscillations for various disorder depths. Note that the lattice depth and the acceleration are identical to the undamped oscillation. The graph clearly shows the distinct reduction of the oscillation amplitude for increased disorder. The solid lines are a fit to the data, with the damping coefficient and the periodicity as free parameters.

To quantitatively compare the experimental data to the numerical solutions of the GPE, we show the resulting damping coefficients as a function of the disorder depth in Fig. 3. The parameters of the simulations correspond to the experimental ones for a typical realisation of the disordered potential. Since the damping rate strongly depends on the depth of the disorder potential, the horizontal error bars represent an experimental uncertainty in this depth of 25%. This was estimated by evaluating the depth of the used disorder potential at different positions, while small deviations between the exact shape of the disorder potential in the experiment and in the numerical simulation were not accounted for. The shaded area corresponds to an uncertainty in the atom number of 30%, accounted for in the simulations. Within this uncertainty, we observe good agreement between experimental and theoretical values of the damping coefficients.

#### 4. Conclusion

We have presented the first experimental investigation on disorder induced damping of Bloch oscillations of Bose-Einstein condensates. The application of an additional disorder potential during the oscillation leads to a strong damping of the centre-of-mass motion and to a significant reduction of the fraction of atoms in the BEC. The observed damping rates are in good agreement with predictions based on numerical solutions of the full Gross-Pitaevskii equation and show that the underlying physical mechanism for the damping is the broadening of the quasimomentum spectrum due to the spatially varying phase evolution of the condensate.

We show that even very small disorder results in fast dephasing of the

quasimomentum and therefore damping of the Bloch oscillation. Since the disorder presented here is equivalent to a spatially inhomogeneous force, the results are of special interest for the application of Bloch oscillations for high precision spectroscopy of very small forces. To reach high precision in such experiments it is essential to follow a large number of Bloch oscillations. This number may be reduced if the observed force is spatially inhomogeneous on length scales comparable to the extend of the condensate. The good agreement between theory and experiment shows the applicability of our method to analyse the effects of spatially varying forces, and allows for estimates of the effect of small inhomogeneities for future experiments.

## References

- [1] B. Damski et al., *Phys. Rev. Lett.* 91, 080403 (2003).
- [2] T. Schulte et al., *Phys. Rev. Lett.* 95, 170411 (2005).
- [3] L. Sanchez-Palencia et al., *Phys. Rev. Lett.* 98, 210401 (2007).
- [4] P. Lukan et al., *cond-mat/0707.2918v2* (2007).
- [5] L. Fallani et al., *Phys. Rev. Lett.* 98, 130404 (2007).
- [6] M. Greiner et al., *Nature* 415, S39 (2002).
- [7] J.E. Lye et al., *Phys. Rev. A* 75, 061603(R) (2007).
- [8] F. Bloch, *Z. Phys.* 52, 555 (1928); C. Zener, *Proc. R. Soc. A* 145, 523 (1934).
- [9] M. Ben Dahan et al., *Phys. Rev. Lett.* 76, 4508 (1996).
- [10] S.R. Wilkinson et al., *Phys. Rev. Lett.* 76, 4512 (1996).
- [11] O. Morsch et al., *Phys. Rev. Lett.* 87, 140402 (2001).
- [12] C. Waschke et al., *Phys. Rev. Lett.* 70, 3319 (1993).
- [13] G. Roati et al., *Phys. Rev. Lett.* 92, 230402 (2004).
- [14] M. Fattori et al., *cond-mat/0710.5131v1* (2007).
- [15] G. Ferrari et al., *Phys. Rev. Lett.* 97, 060402 (2006).
- [16] M. Gustavsson et al., *cond-mat/0710.5083v1* (2007).
- [17] J. E. Lye et al., *Phys. Rev. Lett.* 95, 070401 (2005).
- [18] D. Clément et al., *Phys. Rev. Lett.* 95, 170409 (2005); C. Fort et al., *Phys. Rev. Lett.* 95, 170410 (2005).
- [19] Y. P. Chen et al., *cond-mat/0710.5187v1* (2005).
- [20] P. Horak, J.-Y. Courtois, and G. Grynberg, *Phys. Rev. A* 58, 3953 (1998).
- [21] R.B. Diener et al., *Phys. Rev. A* 64, 033416 (2001).
- [22] U. Gavish and Y. Castin, *Phys. Rev. Lett.* 95, 020401 (2005).
- [23] S. Ospelkaus et al., *Phys. Rev. Lett.* 96, 180403 (2006).
- [24] R. Folman et al., *Adv. At. Molec. Opt. Phys.* 48, 263 (2002); C. Henkel, P. Kruger, R. Folman, and J. Schmiedmayer, *Appl. Phys. B* 76, 173 (2003); D.-W. Wang, M. D. Lukin, and E. Demler, *Phys. Rev. Lett.* 92, 076802 (2004).
- [25] P. Cladé et al., *Phys. Rev. Lett.* 96, 033001 (2006).
- [26] I. Carusotto et al., *Phys. Rev. Lett.* 95, 093202 (2005).
- [27] T. Schulte et al., *cond-mat/0707.3131v1* (2007).
- [28] M. Cristiani et al., *Phys. Rev. A* 65, 063612 (2002).
- [29] D. Witthaut, M. Werder, S. Mossmann, and H. J. Korsch, *Phys. Rev. E* 71, 036625 (2005).
- [30] C. Menotti, A. Smerzi, and A. Trombettoni, *New. J. Phys.* 5, 112 (2003).
- [31] M. Modugno, C. Tozzo, and F. Dalfovo, *Phys. Rev. A* 70, 043625 (2004).
- [32] L. Cacciapuoti, et al. *Phys. Rev. A* 68, 053612 (2003).
- [33] G. Zener, *Proc. R. Soc. London A* 137, 696 (1932);
- [34] M. Cristiani et al., *Optics Express* 12, 4-10 (2004).
- [35] T. Hartmann, F. Keck, H. J. Korsch, and S. Mossmann, *New J. Phys.* 6, 2 (2004);
- [36] L. Guidoni, C. Triché, P. Verkerk, and G. Grynberg, *Phys. Rev. Lett.* 79, 3363 (1997); G. Grynberg, P. Horak, and C. Mennerat-Robilliard, *Europhys. Lett.* 49, 424 (2000).

## DotTrans - Nanopartikel optimieren Transportbänder

Sascha Falkenberg, Tobias Wennkamp und Ludger Overmeyer  
 Institut für Transport- und Automatisierungstechnik, Leibniz Universität Hannover, An der Universität 2, 30823 Garbsen, Germany

Transportbänder stellen in der Intra-logistik eine der wichtigsten Schlüsselkomponenten dar. Im Rahmen des Projektes DotTrans sollen nanoskalige Füllstoffsysteme Verwendung finden, um betriebliche Parameter zu optimieren und Transportbänder mit innovativen Funktionseigenschaften zu entwickeln.

### Transportbänder - mehr als nur ein Stück Gummi

Das Produkt „Transportband“ ist ein komplexes Hochleistungsbauteil, dessen Anwendungen sich über einen weiten Bereich erstrecken. Transportbänder befördern Backwaren durch Öfen, Kohle von der Grube ins Kraftwerk oder Koffer aus dem Flugzeug zum Passagier. Auf ihnen wird gebacken, gedruckt und geschnitten. Die Belastungen, die ein hochwertiges Transportband unter extremen Bedingungen ohne Beschädigung aushalten muss, sind vielfältig.

Mit einem entsprechend großen Forschungs- und Entwicklungsaufwand versuchen Gurthersteller und Anlagenbetreiber, Transportbänder vor allem hinsichtlich ihres Verschleißes, ihrer Laufeigenschaften und damit ihres Energieverbrauchs sowie hinsichtlich ihrer Festigkeit zu optimieren.

Die Weiterentwicklung dieser hochkomplexen Bauteile erfordert die In-

tegration neuer Technologien und die Entwicklung neuer Werkstoffe. Durch das gezielte Einarbeiten nanoskaliger Partikel in einen Werkstoff werden dessen Eigenschaften oftmals grundlegend verbessert und anwendungsbezogen optimiert. Durch den Zusammenschluss führender Transportbandhersteller, Förderanlagenhersteller und Anlagenbetreiber mit Unternehmen der Nanotechnik wurde in Verbindung mit dem Institut für Transport- und Automatisierungstechnik der Leibniz Universität Hannover (ITA) im Rahmen des Projektes DotTrans ein interdisziplinär tätiges Kompetenznetzwerk ins Leben gerufen. Das Forschungs- und Entwicklungsprojekt wird mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) innerhalb des Rahmenkonzeptes „Forschung für die Produktion von morgen“ gefördert und vom Projektträger Forschungszentrum Karlsruhe, Bereich Produktion und Fertigungstechnologien (PTKA-PFT), betreut.

In mehreren Teilschritten sollen neue Erkenntnisse auf dem Sektor der Nanotechnologie Verwendung finden, um betriebliche Parameter wie Energieverbrauch oder Reibungseigenschaften, aber auch adaptive Eigenschaften, wie Entflammbarkeit oder Verschleiß- und Kratzfestigkeit, für den jeweiligen Anwendungsfall zu optimieren. Mit einer neu konzipierten Prüftechnik findet am ITA eine praxisnahe Erprobung und Bewertung statt.

### Weniger Reibung durch Nanopartikel

Unabhängig von deren Einsatzgebiet besitzen nahezu alle Transportbänder einen ähnlichen Aufbau. Sie bestehen aus einem Zugträger, der in eine elastische Matrix gebettet ist. Aufgrund der hohen Anforderung an die Festigkeit, besteht der Zugträger bei den Transportbändern für Anwendungen im Bereich der Gewinnungsindustrie, wie zum Beispiel bei der Förderung von Braunkohle, zumeist aus Stahlseilen oder aus Fasersträngen, welche sich in einer Matrix aus Gummiwerkstoffen befinden.



Abb. 1 - Kalksteintransport durch kurvengängigen Gurtförderer.

Bei Transportbändern, die vorwiegend für den innerbetrieblichen Transport von Stückgütern oder leichten Schüttgütern eingesetzt werden, wird der Zugträger aus einem Kunstfasero- oder Textilgewebe gebildet. Die umgebende Matrix besteht hierbei aus Kunststoffen.

Unabhängig davon, ob der Abtrag der Transportbänder durch Tragrollen oder durch Tische realisiert wird, tritt im Betrieb Reibung auf, welche die Gesamtlänge der Förderanlage begrenzt und den Energiebedarf entscheidend mitbestimmt.

Bei den über Tragrollen geführten Transportbändern stellt der Eindrückrollwiderstand bei horizontal verlaufenden Anlagen in der Gewinnungsindustrie mit ca. 60 % den wichtigsten Anteil am gesamten Bewegungswiderstand dar [1].

Bei den gleitend abgetragenen Transportbändern wird der Energieverbrauch der fördertechnischen Anlage maßgeblich durch das Zusammenwirken der Reibpartner Transportband und Tisch bestimmt. Auch hier ist mit konventioneller Technik mittelfristig keine deutliche Verbesserung zu erwarten.

Hier setzt das DotTrans-Projekt an. Untersuchungen zeigen, dass die funktionellen Eigenschaften der Materialien durch die Modifikation der Werkstoff-zusammensetzung im Nanometerbereich maßgeblich beeinflusst werden können. Somit ist es möglich, eine deutliche Reduktion der Reibung und des Eindrückrollwiderstands zu erzielen.

### Höhere Lebensdauer durch neue Füllstoffe

Die Lebensdauer eines Transportbandes wird maßgeblich durch dessen Verschleißverhalten bestimmt. Durch Nanopartikel können dem Transportband neue Eigenschaften eingestellt werden, die dieses Verschleißverhalten entscheidend beeinflussen. Betrachtet man Polymere innerhalb eines tribologischen Systems, so ist zu beobachten, dass keramische Nanopartikel dazu geeignet sind, den abrasiven Verschleiß zu reduzieren und damit zu einer größeren Wirtschaftlichkeit und verlängerter Lebensdauer der Bauteile beizutragen.

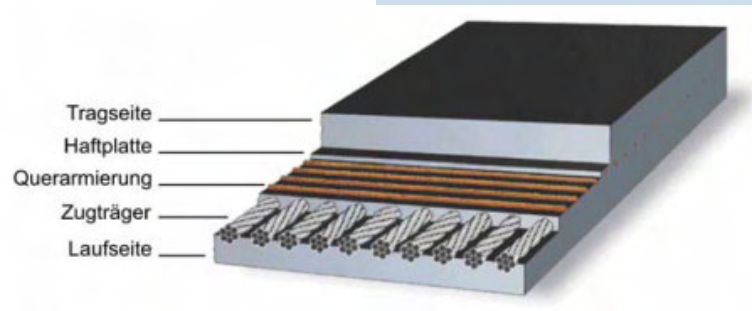


Abb. 2 - Aufbau eines Fördergurtes.

### Schneller in die Praxis

Die Entwicklung standardisierter Prüfverfahren und damit die messtechnische Bestimmung und Beschreibung der Betriebseigenschaften ist das dritte Ziel dieses Projektes. Dabei sollen schwerpunktmäßig erstmals vergleichbare Kennzahlen hinsichtlich des Energieverbrauches sowie des Verschleißverhaltens definiert und durch Versuche an Probekörpern im Labormaßstab sowie konventionellen und modifizierten Transportbändern ermittelt werden. Die neu gewonnenen Ergebnisse fließen unmittelbar in die Konzipierung von standardisierten Prüfverfahren ein, die erstmals eine Klassifizierung von Transportbändern, ähnlich einem Benchmark-Test, hinsichtlich ihres Energieverbrauches sowie ihrer Verschleißbeständigkeit ermöglichen.

### Neue Möglichkeiten durch Nanotechnik

Reduziert auf eine Größe von einem millionstel Millimeter entwickeln konventionelle Materialien wie Silikate

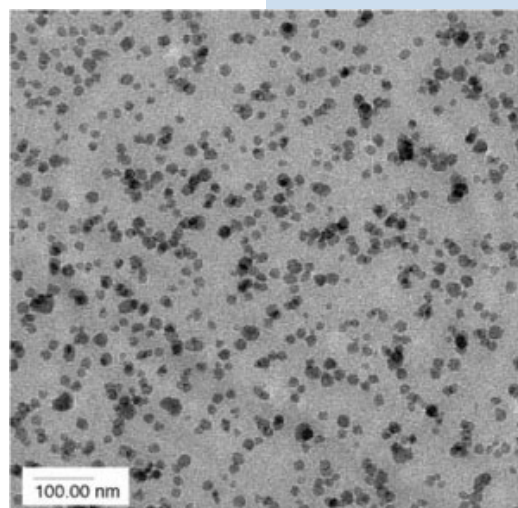


Abb. 3 - Transmissionselektronenmikroskopische (TEM) Aufnahme von Nanopox® (nanoresins AG).

neue und erstaunliche Eigenschaften: So werden ehemals trübe Lacke plötzlich klar und spröde Verbindungen elastisch.

Durch das Einarbeiten nanoskaliger Partikel in einen Werkstoff werden dessen Eigenschaften oftmals grundlegend verbessert oder sogar für eine bestimmte Funktion optimiert. So kann in Polymeren der Elastizitätsmodul erhöht werden, was zu einer verbesserten mechanischen Belastbarkeit führt. Festigkeit, Schlagzähigkeit und Bruchzähigkeit verbessern sich, oder nehmen zumindest nicht ab, wie dies bei konventionell gefüllten Mikrokompositen zu beobachten ist.

### Kleiner ist besser

Reduziert man den Durchmesser einer Kugel wird die Oberfläche im Verhältnis zum Volumen immer größer. Das bedeutet, dass bei gleichem Gewicht die Oberfläche zunimmt. Bei Partikeldurchmessern unter 100 nm nimmt die Oberfläche exponentiell zu (Abb 4 - rote Kurve).

In diesem Bereich werden die Eigenschaften eines Körpers von seiner Oberfläche dominiert. Die große Oberfläche ermöglicht z.B. eine sehr viel bessere Anbindung von Füllstoffen an Werkstoffe, denn diese findet ausschließlich über die Oberfläche statt.

Gleichzeitig steigt die Zahl der Teilchen pro Gramm Substanz erheblich an. Betrachtet man die relativen Teilchenzahlen bei einer Korngröße von

1000 nm (1  $\mu\text{m}$ ) und 25 nm sieht man, dass sich die Masse auf 60.000-mal mehr Teilchen verteilt (Abb 4 - blaue Kurve).

Die Partikel erhöhen nicht in gleichem Maße die Viskosität von Kompositen wie Mikrofüllstoffe. Das erleichtert die Verarbeitung und macht z.B. bei Beschichtungen hochgefüllte Formulierungen überhaupt erst möglich. Das wiederum ist eine Voraussetzung für hohe Abriebfestigkeit und geringe Reibwerte. In Bereichen in denen Transparenz gefragt ist, wie z.B. Klarlackierungen, bedingt die kleine Teilchengröße, dass gefüllte Systeme vollständig transparent sind.

Entscheidend für Glasfaser- und Kohlefaserkomposite ist, dass die kleinen Partikel in Faserverbundwerkstoffen nicht ausfiltriert werden, sondern das Gewebe vollständig durchdringen.

Wurden bisher hauptsächlich Fasern und Partikel im Größenbereich von Mikrometern eingesetzt, so scheinen die kleineren „Nano“-Füllstoffe eine noch vielversprechendere Wirkung auf das Leistungspotential des Verbundwerkstoffes zu besitzen, entweder indem sie alleine oder in Kombination mit konventionellen Mikropartikeln agieren. Zum Beispiel erfährt ein System aus Mikro-Korund ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) und Nano-Silica in Acrylat (PPTTA) -Filmen eine Verbesserung der Abriebbeständigkeit um 4000 %. [2]

### Schon in geringer Menge wirksam

In vielen Fällen ist zu beobachten, dass schon geringe Nanopartikelgehalte die gewünschte Verbesserung erzielen, denn Optima in den Eigenschaften (z.B. spezifische Verschleißrate, Reibungskoeffizienten, Schlagzähigkeit) ergeben sich häufig bei Gehalten kleiner als 10 Massen-%. So wird die Bruchzähigkeit von DGEBA (Epoxyharz) bei 4,0 Gew.-%  $\text{SiO}_2$ -Nanopartikel bereits um 27,5 % erhöht, bei 7,8 Gew.-% um 55 %. [3]

### Wirklich Nanotechnologie?

Vielen bisherigen Verfahren ist gemeinsam, dass die Partikel nicht vereinzelt in den Kompositen vorliegen. Pyrogene Kieselsäuren verfügen z.B. über eine Primärpartikelgröße und Oberfläche, die mit Nanopartikeln

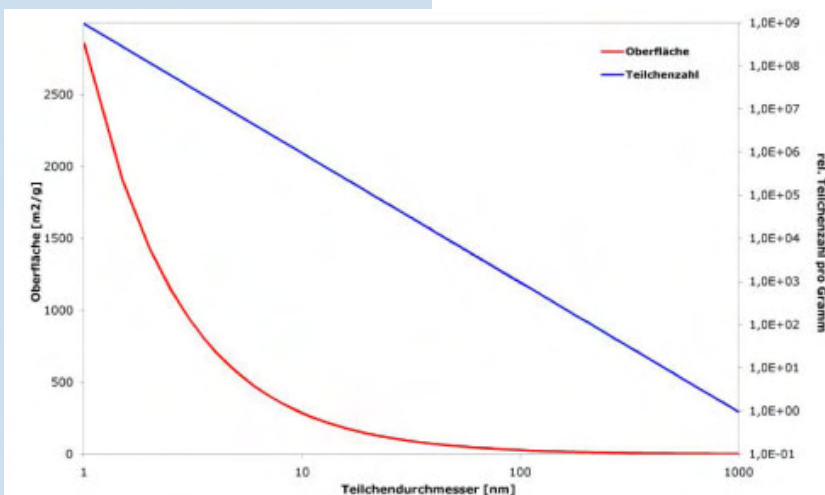


Abb. 4 - Oberfläche und relative Teilchenanzahl pro Gramm in Abhängigkeit vom Teilchendurchmesser.

vergleichbar ist. Die Primärpartikel liegen jedoch als Aggregate vor, d.h. jeweils einige hundert solcher Partikel sind zusammengeballt. Durch die Agglomeration gehen aber viele der Vorteile der Nanotechnologie verloren. Ein Hauptziel ist also die Erzeugung von Werkstoffkompositen, in denen die Partikel vereinzelt vorliegen.

### **nanoresins AG**

Die nanoresins AG ist ein global aktives Unternehmen, welches seit 1997 Erfahrung auf dem Gebiet der Nanotechnologie hat.

Mit verschiedenen Verfahren kann nanoresins sphärische SiO<sub>2</sub>-Nanopartikel für die Anwendung in so unterschiedlichen Werkstoffen wie (Meth)Acrylaten (Nanocryl®), Epoxidharzen (Nanopox®) und Silikonpolymeren (Nanocone®) im industriellen Maßstab herstellen. Kennzeichen dieser Produkte ist die völlige Abwesenheit von Agglomeraten, d.h. das gesamte Potential der Nanotechnologie kann mit diesen Kompositen ausgeschöpft werden.

### **Einsatz in Transportbändern**

Transportbänder stellen eine besondere Herausforderung dar. Zwar ist der Aufbau im Prinzip immer gleich. Es werden jedoch eine Vielzahl von Trägermaterialien eingesetzt, z.B. verschiedene Kautschuke. Hinzu kommt, dass bisherige Prozesse lösungsmittelbasiert sind. Zur Modifikation von Kautschuken sind diese Verfahren jedoch nur bedingt geeignet und der Einsatz von Lösungsmitteln aus Umweltschutzgründen auch nicht wünschenswert.

Im Zuge des Projekts wurden deshalb ebenfalls Silika-Nanopartikel erzeugt, die sich in Kautschukrohnmischungen dispergieren lassen. In Zusammenarbeit mit beteiligten Gurtherstellern ist es gelungen entsprechende Komposite herzustellen und zu untersuchen. Die Partikelverteilung, Mischbedingungen und Eigenschaften der vulkanisierten Proben sind derzeit Gegenstand weiterer Untersuchungen.

Ausblick

Durch die neuartigen Verfahren sind die faszinierenden Eigenschaften dieser Materialien erstmals im Bereich

der klassischen Kautschukmaterialien erreichbar.

Mit der Entwicklung neuer, eigenschaftsoptimierter Werkstoffe kann der deutliche technologische Vorsprung gegenüber internationalen Marktbeleitern ausgebaut werden.

Das Einsetzen neuer, angepasster Prüfverfahren ermöglicht es, diese Fortschritte so praxisnah wie möglich quantifizieren zu können.

### **Literatur**

- [1] Hintz, A.: Einfluss des Gurtaufbaus auf den Energieverbrauch von Gurtförderanlagen. Diss., Universität Hannover, (1993)
- [2] Hausinterne Ergebnisse bei Verwendung von Nanocryl C165 der nanoresins AG.
- [3] Blackman, B. R. K., Kinloch, A. J., Sohn Lee, J., Taylor, A. C., Agarwal, R., Schueneman, G., and Sprenger, S.: The fracture and fatigue behaviour of nano-modified epoxy polymers. *Journal of Materials Science* 42, 7049-7051 (2007)

## Germanium Nanoclusters for Memory Applications

R. Peibst, E. Bugiel, and K.R. Hofmann

Institut für Materialien und Bauelemente der Elektronik, Fachgebiet Bauelemente, Leibniz Universität Hannover, Appelstraße 11a, 30167 Hannover, Germany

### 1. Introduction

Conventional non-volatile memory devices (EEPROMs) consist of a MOS transistor with a poly Si floating gate embedded in the gate oxide. By Fowler-Nordheim tunnelling through the oxide between the substrate and the floating gate (tunnel oxide), charge carriers can be injected into the floating gate, yielding a threshold voltage shift which represents the storage state. Recently, this concept is facing crucial reliability problems due to the progressing downscaling of the devices, in particular, a decrease of the tunnel oxide thickness leading to an increase of the probability of charge loss due to defect mediated leakage currents.

The nanocluster or nanocrystal (NC) memory [1] is considered to be a promising concept to overcome these problems by replacing the continuous floating gate by a large number of isolated nanocrystals. The majority of NCs preserve their charge state in spite of a defect related discharge of a single or a few nanocrystals.

In the last decade, Si and Ge based NC memories have been studied intensively. Ge NCs are expected to exhibit better storage properties than Si nanocrystals due to the smaller band gap of Ge, which corresponds to a deeper potential well for the charge carriers.

However, many aspects are still not well understood so far, e.g., the role of traps at the cluster/oxide interface and the question whether electron or hole storage yield better write and retention characteristics. For applications, long retention times have to be combined with short writing times, preferentially for a direct tunneling charging mechanism.

### 2. Research in our group

In the framework of a research project funded by DFG, we have developed an innovative process for Ge nanocrystal preparation and we are investigating in detail the NC charging and discharging processes in order to evaluate their storage properties and to provide a deeper understanding of the physical mechanism involved.

Our approach to create Ge NC embedded in the gate oxide uses two basic steps. [2] First, a sandwich-like structure consisting of 3-4 nm thermally grown tunnel oxide ( $\text{SiO}_2$ ), an  $\alpha$ -Ge film with a thickness of 2-3 nm and a 12 nm control oxide ( $\text{SiO}_2$ ) is prepared on p- or n-Si(100) substrates using plasma-enhanced vapor deposition (PECVD). The second step is the transformation of the  $\alpha$ -Ge layer into isolated nanocrystals by thermal annealing. The self-organization processes involved depend on annealing temperature, on annealing time and on the initial layer thickness, and have been studied intensively.

Exploiting the compatibility of our Ge NC preparation method with a standard CMOS process, we have produced layers of nanocrystals in the gate oxide of long n- and p- channel MOSFETs.

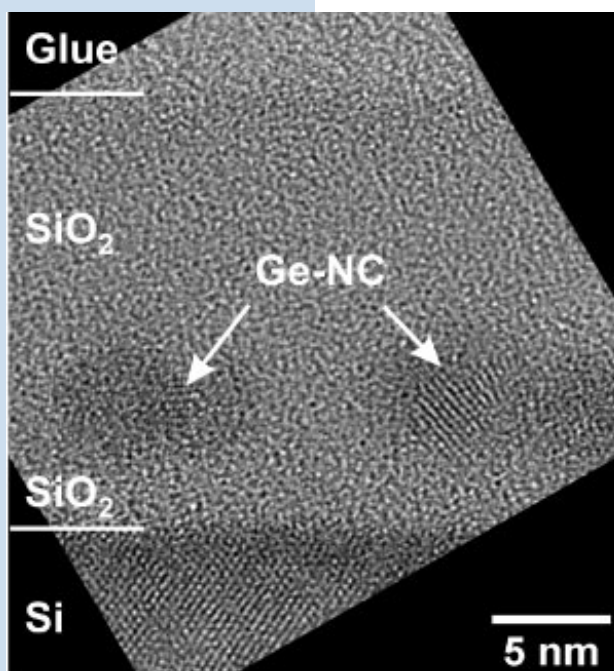


Figure 1: High-resolution TEM cross section image of Ge nanocrystals embedded in the gate oxide of long-channel MOSFETs.



The electrical characteristics of the MOS field-effect transistors with Ge nanocrystal floating gates were investigated by different methods. By measuring the transient drain current, the charging and retention characteristics of electrons and holes were studied with high time resolution without affecting the charge state by the measurement.

Temperature dependent measurements of the retention times in the range  $100\text{ K} < T < 600\text{ K}$  provides information about the influence of traps on the Ge NC/  $\text{SiO}_2$  interface on the storage behavior.

### References

- [1] S. Tiwari, F. Rana, H. Hanafi, E.F. Crabbe, K. Chan, *Appl. Phys. Lett.* 68 (1995) 1377.
- [2] T. Dürkop, E. Bugiel, I. Costina, A. Ott, R. Peibst, K.R. Hofmann, *Mat. Science Eng. B* 147 (2008) 213.

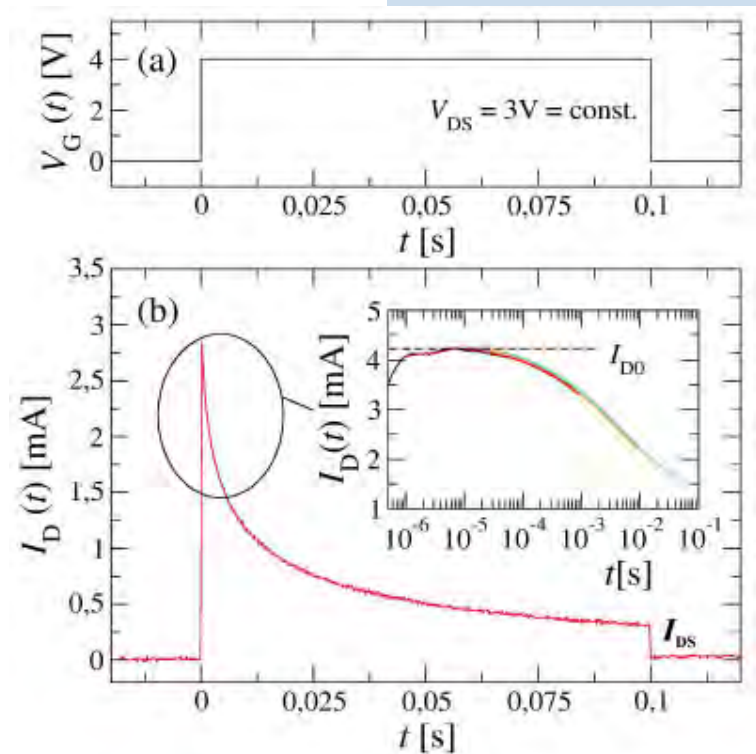


Figure 2: (a) Transient gate voltage  $V_G(t)$  and (b) drain current  $I_D(t)$  during charging of the NC with electrons from inversion. The inset in (b) shows  $I_D(t)$  for small charging times.

## Nanotechnologie zum Anfassen: Lichtinduzierte Superhydrophilie

Michaela Vormoor, Ralf Dillert und Detlef Bahnemann

Institut für Technische Chemie, Leibniz Universität Hannover, Callinstr. 3, 30167 Hannover

Quelle: *nanoworld* 01/2008

Nie wieder Fensterputzen, kein Scheibenwischer beim Autofahren, nie wieder beschlagene Brillengläser? Diese Vorstellungen scheinen mit superhydrophilen Beschichtungen auf Basis von Titandioxid möglich.

Titandioxid ist ein weißes, anorganisches Pulver, es ist chemisch und biologisch inert und in unserem täglichen Leben fast überall vertreten. Aufgrund seines Brechungsindex findet es als Weißpigment in Farben, Kunststoffen und Papier Anwendung. Da es als ungiftig gilt, wird es auch in der Kosmetikindustrie und in der Lebensmittelindustrie eingesetzt. Wird nanoskaliges Titandioxid als Beschichtung mit einer Schichtdicke kleiner 100 nm aufgebracht, so sind diese Schichten aufgrund der geringen Schichtdicke transparent und es treten keine optischen Beeinträchtigungen gegenüber unbeschichtetem Material auf.

Bei Belichten mit Sonnenlicht werden an Titandioxidschichten zwei Effekte beobachtet: Superhydrophilie und Photokatalyse. Durch die lichtinduzierte Superhydrophilie wird eine Tropfenbildung auf der Oberfläche verhindert; Wasser breitet sich als dünner Flüssigkeitsfilm über die gesamte Oberfläche aus (Abbildung 1).

Durch die sogenannte Photokatalyse wird organischer Schmutz auf der Oberfläche der Titandioxid-Schicht aktiv zerstört. Als Endprodukte der

vollständigen photokatalytischen Reaktion werden Kohlendioxid und Wasser gebildet.

Aber warum zeigt Titandioxid diese Eigenschaften? Aufgrund seiner Bandlücke von etwa 3,2 eV zählt Titandioxid zu den Halbleitern. Durch Bestrahlung mit Licht, dessen Energie größer ist als diese Bandlücke – also z. B. der ultravioletten Strahlungsanteil des Sonnenlichtes –, werden im Titandioxid Elektron-Loch-Paare gebildet. Diese wandern zur Oberfläche der Schicht und reagieren dort mit adsorbiertem Sauerstoff oder Wasser zu Hydroxyl-Radikalen. Diese Radikale als hochreaktive chemische Spezies sind in der Lage, organischen Schmutz anzugreifen und abzubauen. Die abgebaute Menge ist dabei allerdings sehr gering. So wird nicht beobachtet, dass durch die photokatalytische Titandioxid-Schicht ein Insekt vollständig abgebaut wird. Es sind vielmehr nur die unteren Schichten, die angegriffen werden, aber damit kann der Schmutz durch Wasser oder mechanisch wesentlich leichter entfernt werden. Der genaue Mechanismus der lichtinduzierten Superhydrophilie wird noch sehr kontrovers diskutiert. Die beiden populärsten Meinungen: (1) Die Hydrophilie ist eine Folge der Photokatalyse: Eine Titandioxid-Schicht ist von Natur aus hydrophil, aber durch organische Verunreinigungen wird diese hydrophile Schicht bedeckt und damit hydrophob. Erst nach dem photokatalytischen Abbau dieser Verschmutzungen bildet sich anstelle von Wassertropfen, wie es für eine hydrophobe Oberfläche charakteristisch ist, ein klarer Flüssigkeitsfilm auf der superhydrophilen Oberfläche aus.

(2) Die UV-Bestrahlung induziert eine Änderung der Oberflächenstruktur. Dadurch wird die Zahl von Hydroxylgruppen auf der Oberfläche erhöht. Es bildet sich also eine „wasserähnliche“ Umgebung aus, die zur Ausbreitung des Wassers beiträgt. Auch wenn der Mechanismus noch nicht endgültig geklärt ist, findet diese Technologie doch starkes Interesse

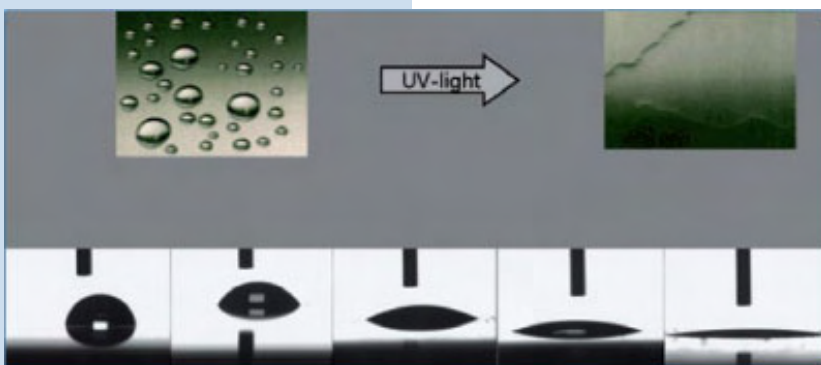


Abb. 1: Änderung des Kontaktwinkels einer Titandioxidschicht unter Belichtung mit ultraviolettem Licht. (Abbildung: M. Vormoor)

und erste Produkte sind schon auf dem Markt. So kann der Traum jeder Hausfrau – nie wieder Fensterputzen – bereits Wirklichkeit werden. Verschiedene Hersteller bieten „selbstreinigendes“ Fensterglas an. Dieses mit einer transparenten Titandioxidschicht überzogene Glas zeigt nach längerem Lagern im Dunkeln keine Superhydrophilie, d. h. Wasser bildet auf dieser Oberfläche Tropfen mit einem Kontaktwinkel von etwa  $70^\circ$ . Wird das Fensterglas aber einige Zeit dem Sonnenlicht ausgesetzt, so nimmt der Kontaktwinkel bis auf Werte kleiner  $10^\circ$  ab (vgl. Abbildung 1). Die lichtinduzierte Superhydrophilie verhindert eine Tropfenbildung des Wassers auf der Oberfläche, wodurch eine klare Sicht durch das Glas gewährleistet ist. Zusätzlich läuft das Wasser als Film an dem Glas entlang und kann somit Verschmutzungen mitnehmen und unterstützt damit noch die Selbstreinigung.

Besonders bei Hochhäusern und schwer zugänglichen Fensterflächen werden die Eigenschaften der Titandioxidschichten optimal genutzt. Durch die täglich verfügbare Sonnenstrahlung werden organische Schmutze auf der Oberfläche angegriffen, die Oberfläche wird hydrophil und der Regen entfernt lose anhaftende Schmutzpartikel. Aber auch die Automobilbranche untersucht derzeit das Potential der superhydrophilen Beschichtungen. Aufgrund von steigender Mobilität und damit verbundener Fahrzeugdichte kommt der Erhöhung der Sicherheit von Fahrzeugen eine immer größere Bedeutung zu. Saubere Autoscheiben, Scheinwerfer- und Sensoroberflächen senken die Anzahl von Unfällen deutlich und erhöhen somit die Sicherheit in Kraftfahrzeugen. Insbesondere bei schlechter Witterung gewährleistet eine schmutzfreie Oberfläche die Funktionssicherheit von Sensoren. Gleichzeitig wird durch saubere, blendfreie Scheiben und Spiegel eine klare Sicht des Fahrers auf die Straße ermöglicht.

So sind auch bei uns inzwischen die in Japan schon seit längerer Zeit eingesetzten hydrophilen Außenspiegel erhältlich. Besonders an trüben Herbsttagen verhindert das nanoskalige Titandioxid das Beschlagen der Scheiben, und das morgendliche Putzen der Spiegel entfällt. Aber auch

während einer Regenfahrt zeigt das Titandioxid seine Wirkung, so wird die Tropfenbildung auf dem Spiegel verhindert und die ungestörte Sicht auf den rückwärtigen Verkehr gewährleistet (Abbildung 2).

Neben den Außenspiegeln bietet sich der Transfer dieser Technologie auch auf weitere Bauteile, wie z. B. die Windschutzscheibe, Leuchten, lackierte Außenhaut etc. an. Hierzu läuft bereits seit zwei Jahren ein vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) gefördertes Forschungsprojekt mit zwei Automobilkonzernen, einigen Zulieferern, wissenschaftlichen Forschungseinrichtungen und dem Institut für Technische Chemie der Leibniz Universität Hannover, in dem das Potential der Photokatalyse in automobilen Anwendungen bewertet und mögliche Anwendungen entwickelt werden.

Zusätzlich zu den dargestellten Anwendungsgebieten werden die Herstellung superhydrophiler Beschichtungen auf Keramik, Kunststoffplanen und anderen polymeren Werkstoffen, sowie auf Baustoffen am genannten Institut der Leibniz Universität Hannover intensiv untersucht. Allerdings beschränkt sich die Anwendung dieser Nanobeschichtungen aufgrund der Notwendigkeit, Titandioxid durch UV-Licht zu aktivieren, derzeit noch auf den Außenbereich. Daher wird die Modifikation der Titandioxid-Nanopartikel mit dem Ziel ihrer Aktivierung mit dem sichtbaren Anteil des Tageslichtes bereits sehr intensiv am Institut für Technische Chemie verfolgt, so dass wir dem Traum des „selbstreinigenden“ Hauses sicherlich schon bald näher sind.



Abb. 2: Ein superhydrophiler Aussenspiegel (rechts) im Vergleich zu herkömmlichen Spiegeln. (Abbildung: M. Vormoor)

## Abbildung von Metallgitterschwingungen mit atomarer Auflösung

Heiko Gawronski und Karina Morgenstern

Institut für Festkörperphysik, Abteilung Oberflächen, Leibniz Universität Hannover, Appelstraße 4, 30167 Hannover, Germany

Analog zu Wassermolekülen in einer Welle, können die Atome einer Metalloberfläche schwingen. Diese kollektiven Schwingungen der Atome auf ihren Metallgitterplätzen bezeichnet man als Phononen.

### Details:

Mit einem selbst konstruierten, sehr stabilen Tieftemperatur-Rastertunnelmikroskop (RTM) ist es uns gelungen, Phononen anzuregen und ihre Anregungswahrscheinlichkeit erstmals auf der Ebene einzelner Atome abzubilden.

In sogenannten „Schwingungskarten“ ist die Variation der Anregungswahrscheinlichkeit der Gitterschwingungen mit Einzelatomauflösung zu erkennen (vgl. Abbildung 1). Diese atomare Auflösung in RTM-Bildern ist insofern neuartig, da sie allein durch die Anregung von Schwingungen verursacht

wird und somit nicht mit der wohlbekannteren, „elektronisch“ bedingten, atomaren Auflösung vergleichbar ist.

Durch die Verwendung einer speziell strukturierten Oberfläche sowie durch zusätzliche Moleküle auf der Metalloberfläche war es uns zudem möglich die Streuung von stehenden Phononenwellen an Defekten, wie beispielsweise einer Domänengrenze oder auch Adsorbaten, nachzuweisen. Die Ursache der Streuung ist hierbei durch die Annahme von Schwingungsspektren auf den verschiedenen Bereichen der rekonstruierten Au(111) Oberfläche identifiziert worden. Die in Abbildung 2 zu erkennende Energieverschiebung bei Aufnahme eines Spektrums auf der Domänengrenze im Vergleich zu den beiden Domänen unterschiedlich Stapelfolge kennzeichnet die Domänengrenze als Streuzentrum.

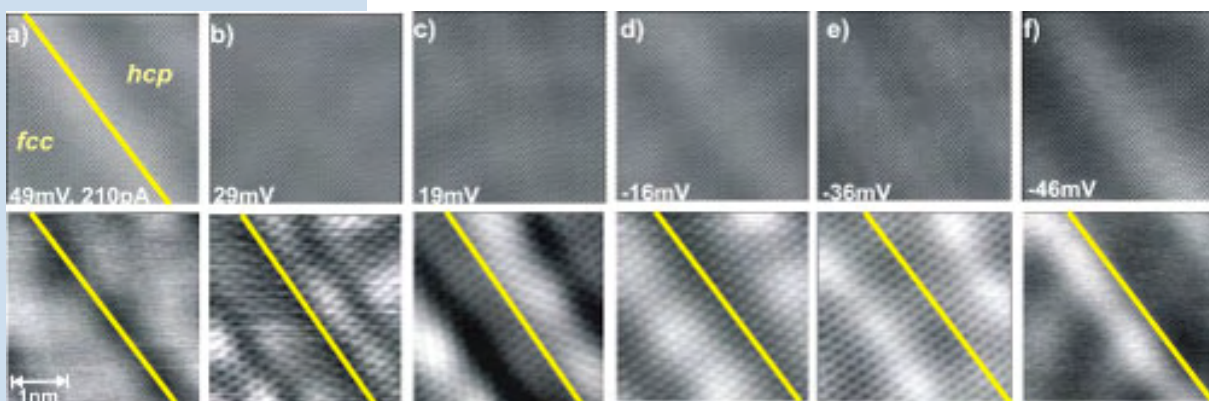


Abbildung 1: Schwingungskarten der reinen Gold(111)-Oberfläche. Die Aufnahmen wurden bei verschiedenen, in den Bildern gekennzeichneten Tunnelspannung und einem Tunnelstrom von 0,21 nA aufgenommen. Die obere Reihe zeigt die topografischen I/V-Bilder, die untere Reihe die gleichzeitig aufgezeichneten Schwingungskarten ( $d^2I/dV^2$ -Karten). Die diagonal verlaufende, gelbe Linie markiert die Domänengrenze der rekonstruierten Oberfläche. Diese trennt Bereiche mit fcc Stapelfolge von Bereichen mit hcp-Stapelfolge.

### Perspektiven:

In nächster Zukunft eröffnet die Untersuchung der Schwingungsanregung mit atomarer Präzision neue Experimente beispielsweise zur Untersuchung der Kopplung von Molekülschwingungen an Schwingungen der Oberflächenatome. Zudem ist es erstmals möglich den Einfluss der exakten Oberflächenbeschaffenheit auf die energetische Lage von Phononen in Experimenten mit „Lehrbuchcharakter“ zugänglich.

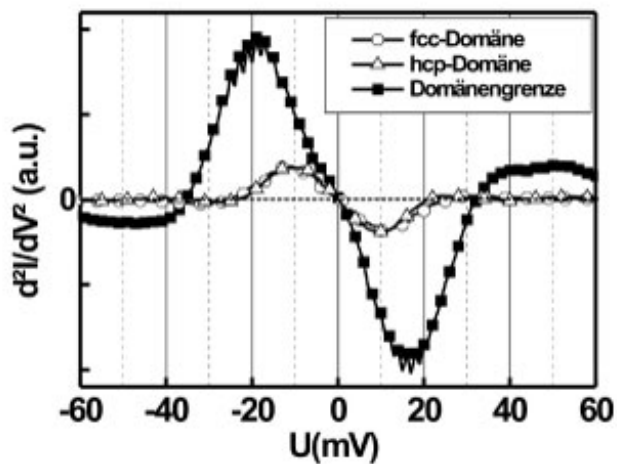


Abbildung 2: Schwingungsspektren: aufgenommen auf den verschiedenen Bereichen der rekonstruierten Oberfläche. Die unterschiedlichen Amplituden der Signale sind hierbei zurückzuführen auf unterschiedliche Tunnelströme. Entscheidend ist jedoch die Verschiebung der Lage der Intensitätsmaxima um etwa 10 mV bei Aufnahme eines Spektrums auf der Domänengrenze.

## Radio frequency association of heteronuclear Feshbach molecules

C. Klempt, T. Henninger, O. Topic, M. Scherer, L. Kattner, E. Tiemann, W. Ertmer, and J. J. Arlt

Institut für Quantenoptik, Leibniz Universität Hannover, Welfengarten 1, D-30167 Hannover, Germany

This is an abbreviated version of the scientific results. A detailed description is given in: [Klempt et al. arXiv:0809.0340v2](#)

### Abstract

We present a detailed analysis of the production efficiency of weakly bound heteronuclear  $^{40}\text{K}^{87}\text{Rb}$  Feshbach molecules using radio frequency association in a harmonic trap. The efficiency was measured in a wide range of temperatures, binding energies and radio frequencies. A comprehensive analytical model is presented, explaining the observed asymmetric spectra and achieving good quantitative agreement with the measured production rates. This model provides a deep understanding of the molecule association process and paves the way for future experiments which rely on Feshbach molecules e.g. for the production of deeply bound molecules.

The creation and investigation of ultracold, trapped, deeply bound molecules has been a major research goal for a number of years. In particular polar molecules with long range dipolar interaction [1] offer a number of fascinating experimental avenues such as the investigation of quantum phases [2], methods for quantum computation [3] or precision measurements of fundamental constants [4]. Recently, a number of approaches have made significant progress towards that goal. Polar molecules have been slowed down and trapped using Stark deceleration in spatially modulated electric fields [5–7]. Other approaches are provided by cooling ground state molecules with a buffer gas [8] and by photoassociation in magneto-optical traps, where the lowest vibrational level in ultracold  $\text{K}_2$  [9],  $\text{KRb}$  [10],  $\text{RbCs}$  [11],  $\text{Cs}_2$  [12], and  $\text{LiCs}$  [13] has been reached. However, these approaches only offer limited state control or temperatures in the mK regime. On the other hand, the understanding and control of interactions in ultracold gases has made dramatic progress in the past few years. The cooling procedure for two atomic species as well as the heteronuclear interaction potentials have been studied in detail [14–17], especially in the case of  $^{40}\text{K}$ - and  $^{87}\text{Rb}$ -mixtures [18–21]. This development now allows for the association of weakly bound heteronuclear molecules in well defined quantum states using magnetically tunable Feshbach resonances [22–24]. A detailed understanding of the association process of these molecules is of central importance. These Feshbach molecules provide an ideal starting point for a further transfer into deeply bound states [25–27]. Recently, the de-excitation of these molecules to the rovibrational ground state has also been demonstrated [28].

So far, the association of homonuclear molecules has been described

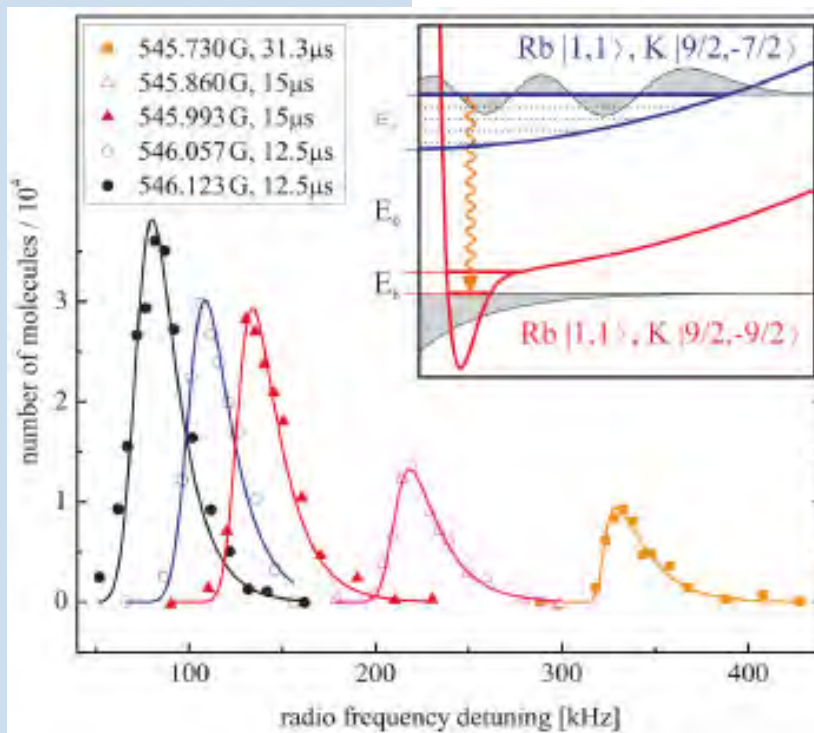


FIG. 1: Number of associated molecules versus radio frequency for various binding energies. The solid lines show the theoretical model. All measurements were taken at a temperature of 730 nK. The duration of the radio frequency pulses is indicated in the legend. The inset illustrates the association process including the relevant energies and the wave functions of molecule and atom pair.

with a semi-classical numerical model [29], which does not predict absolute conversion rates. The model assumes adiabatic conversion of selected atom pairs to molecules. It has also been applied to heteronuclear mixtures [23, 24]. However, in this case the approach is only valid if the conversion speed is small enough to assure adiabaticity, while it has to be large enough such that the atom pairs do not drift apart. Further theoretical studies focus on the use of modulated magnetic fields for the production of molecules [30, 31].

In this paper, we present a complementary analytical model for radio frequency association which yields absolute molecular production rates. The model is compared to radio frequency association spectra obtained in an ultracold mixture of  $^{87}\text{Rb}$  and  $^{40}\text{K}$  atoms. It explains the measured asymmetric molecular association spectra depending on the energy distribution of the atoms in the trap and thus provides a deep understanding of the molecule association process.

In our approach, the number of molecules is calculated by time dependent perturbation theory assuming a Gaussian time dependence of the coupling term. The treatment is analogous to the derivation of Fermi's Golden Rule, which has been successfully used to describe radio frequency dissociation [32, 33]. In the case of radio frequency association, the number of colliding pairs per energy interval  $h(\epsilon_r)$  has to be included, where  $r$  is the energy of the relative motion. In the limit of small depletion, the perturbative approach for short radio frequency pulses with a Gaussian shaped amplitude of duration  $\tau$  yields the number of molecules.

$$N_{mol} = \frac{\pi}{2} \Omega^2 \tau^2 *$$

$$\int_0^\infty h(\epsilon_r) e^{-\frac{(E_{rf} - E_b - E_0 - \epsilon_r)^2 \tau^2}{\hbar^2}} F_f(\epsilon_r) d\epsilon_r$$

Here,  $E_{rf} = \hbar\nu$  is the energy corresponding to the radio frequency  $\nu$  and  $\Omega$  is the Rabi frequency of the atomic transition with energy  $E_0$  (see inset of Fig. 1).  $E_b$  denotes the molecular binding energy and

$$F_f(\epsilon_r) = \left| \int \Psi_{\epsilon_r}^*(r) \Phi_m(r) dr \right|^2$$

is the Franck-Condon factor between the wave function  $\Psi_{\epsilon_r}(r)$  of the colliding atom pair and the bound molecular wave function  $\Phi_m(r)$ .

In the following, we directly fit the theoretical prediction to our experimental data, allowing only two free parameters: The binding energy  $E_b$  and a scale factor  $\lambda$  to quantify deviations from our model. For the atom pair scattering length, the values  $a_{bg} = 9.88 \text{ nm}$ ,  $a = 9.10 \text{ nm}$  and  $\Delta\mu = 2.32 \mu_B$  are adopted from a coupled channel calculation [21, 34].

We used the following experimental sequence to produce heteronuclear  $^{40}\text{K}$ - $^{87}\text{Rb}$ -molecules close to a Feshbach resonance located at 547 G and to measure their production efficiency. First, a mixture of  $2 \times 10^6$   $^{40}\text{K}$ -Atoms and  $1 \times 10^6$   $^{87}\text{Rb}$ -atoms at a temperature of  $2 \mu\text{K}$  is prepared in a crossed beam optical dipole trap at a wavelength of 1064 nm. We employ rapid adiabatic passages to transfer the  $^{87}\text{Rb}$  atoms to the  $|1, 1\rangle$  state and the  $^{40}\text{K}$  atoms to the  $|9/2, -7/2\rangle$  state at homogeneous magnetic fields of 10 G and 20 G. Then the magnetic field is increased to values below the Feshbach resonance. The sum of magnetic field noise, field inhomogeneity and shot-to-shot fluctuations is less than 16 mG, accomplished by a mechanical transport to the geometric center of the Feshbach coils [35]. The power of the dipole trap is lowered to mean trapping frequencies of 244 Hz (335 Hz) for  $^{87}\text{Rb}$  ( $^{40}\text{K}$ ), yielding samples of  $5 \times 10^5$   $^{40}\text{K}$  atoms and  $2.5 \times 10^5$   $^{87}\text{Rb}$  atoms at a temperature of 730 nK. Finally, we apply a Gaussian shaped radio frequency pulse with a width of  $\tau = 12.5$  to 31.25 ms and a peak atomic Rabi frequency of  $\Omega = 2\pi \cdot 45 \text{ kHz}$  to produce up to  $5 \times 10^4$  weakly bound molecules (see inset of Fig. 1). The duration of the radio frequency pulse is chosen short enough to ensure that the production efficiency is still in the linear regime, i.e. the loss of molecules due to interaction with residual atoms can be neglected [36].

In a first set of experiments, we have studied the efficiency of molecule production for six magnetic fields between 545.73 G and 546.19 G. For each magnetic field, the atomic transition frequency of the  $^{40}\text{K}$  atoms was

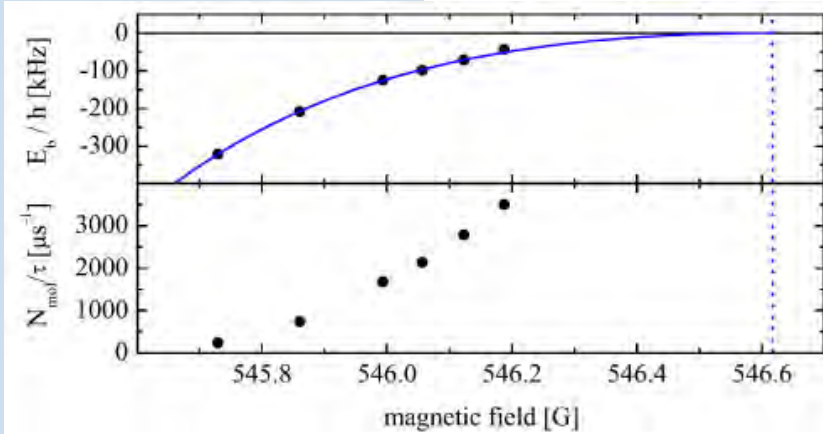


FIG. 2: The molecular binding energies as a function of magnetic field are shown in the top frame. A value of  $B_0 = 546.618(6)$  G is obtained for the position of the resonance (dotted line). The bottom shows the obtained number of molecules per pulse length.

measured as a reference for the association spectra. Figure 1 shows the absolute number of KRb molecules versus radio frequency detuning for various magnetic fields. The asymmetry of the association spectra is clearly visible and reflects the relative kinetic energy distribution of the associated atom pairs. The shape of the spectra is very well reproduced by the model described above, where only the binding energy  $E_b$  and the scaling factor  $I$  were used as fit parameters.

In Figure 2, the extracted binding energies and molecule production rates are plotted as a function of the magnetic field strength. A fit to the data yields  $B_0 = 546.618(6)$  G (calibration uncertainty 5 mG) for the position and  $\Delta B = 3.04(2)$  G for the width of

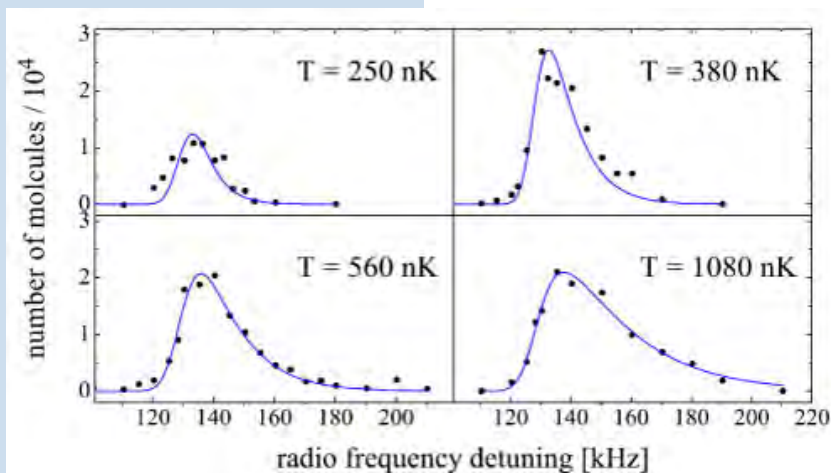


FIG. 3: Number of associated molecules versus radio frequency for various temperatures. The solid lines show the theoretical model. All measurements were taken at a fixed magnetic field of 545.994 G.

the resonance. This combination of experimental measurement and theoretical analysis represents the most precise characterization of a heteronuclear resonance in an optical dipole trap, consistent with Ref. [37].

In a second set of experiments, we have investigated the dependence of the molecule production on the temperature of the atomic mixture. By lowering the intensity of the two trapping beams,  $^{40}\text{K}$ - $^{87}\text{Rb}$ -mixtures in a temperature range from 1.1 mK down to 250 nK with corresponding mean trapping frequencies of 240 to 170 Hz (340 to 230 Hz) for  $^{87}\text{Rb}$  ( $^{40}\text{K}$ ) were produced. The association spectra are shown in Fig. 3 with theoretical fits to the data, again using only binding energy  $E_b$  and the scaling factor  $\lambda$  as free parameters. Once more, the theoretical distribution functions match the experimental findings very well. Since the magnetic field is kept constant at 545.994 G, the resulting binding energies of all independent fits yield a value of 127.6(6) kHz, as expected.

In conclusion, we have measured the production efficiency of heteronuclear Feshbach molecules in a wide parameter range of temperatures, binding energies and radio frequencies. A comprehensive analytical model is shown to provide a detailed understanding of the observed spectra and a good quantitative estimate of the absolute production rates. It is of particular relevance for ongoing experiments with heteronuclear Fermi-Fermi mixtures [16, 17]. This work thus paves the way for further experiments using heteronuclear molecules as a starting point for the production of ultracold polar samples.

## References

- [1] L. Santos, G. V. Shlyapnikov, P. Zoller, and M. Lewenstein, *Phys. Rev. Lett.* 85, 1791 (2000).
- [2] K. Góral, L. Santos, and M. Lewenstein, *Phys. Rev. Lett.* 88, 170406 (2002).
- [3] D. DeMille, *Phys. Rev. Lett.* 88, 067901 (2002).
- [4] E. R. Hudson, H. J. Lewandowski, B. C. Sawyer, and J. Ye, *Phys. Rev. Lett.* 96, 143004 (2006).
- [5] F. M. H. Crompvoets, H. L. Beth-



- lem, R. T. Jongma, and G. Meijer, *Nature* 411, 174 (2001).
- [6] B. C. Sawyer et al., *Phys. Rev. Lett.* 98, 253002 (2007).
- [7] O. Bucicov et al., *Eur. Phys. J. D* 46, 463 (2008).
- [8] J. D. Weinstein et al., *Nature* 395, 148 (1998).
- [9] A. N. Nikolov et al., *Phys. Rev. Lett.* 84, 246 (2000).
- [10] M.W. Mancini et al., *Phys. Rev. Lett.* 92, 133203 (2004).
- [11] J. M. Sage, S. Sainis, T. Bergeman, and D. DeMille, *Phys. Rev. Lett.* 94, 203001 (2005).
- [12] M. Viteau et al., *Science* 321, 232 (2008).
- [13] J. Deiglmayr et al., <http://arxiv.org/abs/0807.3272> (2008).
- [14] C. A. Stan et al., *Phys. Rev. Lett.* 93, 143001 (2004).
- [15] A. Simoni et al., *Phys. Rev. A* 77, 052705 (2008).
- [16] M. Taglieber et al., *Phys. Rev. Lett.* 100, 010401 (2008).
- [17] E. Wille et al., *Phys. Rev. Lett.* 100, 053201 (2008).
- [18] S. Inouye et al., *Phys. Rev. Lett.* 93, 183201 (2004).
- [19] F. Ferlaino et al., *Phys. Rev. A* 73, 040702(R) (2006).
- [20] S. Ospelkaus et al., *Phys. Rev. Lett.* 97, 120403 (2006).
- [21] C. Klempt et al., *Phys. Rev. A* 76, 020701(R) (2007).
- [22] C. Ospelkaus et al., *Phys. Rev. Lett.* 97, 120402 (2006).
- [23] S. B. Papp and C. E. Wieman, *Phys. Rev. Lett.* 97, 180404 (2006).
- [24] J. J. Zirbel et al., *Phys. Rev. A* 78, 013416 (2008).
- [25] K. Winkler et al., *Phys. Rev. Lett.* 98, 043201 (2007).
- [26] S. Ospelkaus et al., *Nature (Physics)* (2008).
- [27] J. G. Danzl et al., *Science* 321, 1062 (2008).
- [28] K.-K. Ni et al., <http://arxiv.org/abs/0808.2963> (2008).
- [29] E. Hodby et al., *Phys. Rev. Lett.* 94, 120402 (2005).
- [30] T. M. Hanna, T. Köhler, and K. Burnett, *Phys. Rev. A* 75, 013606 (2007).
- [31] J. F. Bertelsen and K. Molmer, *Phys. Rev. A* 76, 043615 (2007).
- [32] C. Chin et al., *Science* 305, 1128 (2004).
- [33] C. Chin and P. S. Julienne, *Phys. Rev. A* 71, 012713 (2005).
- [34] A. Pashov et al., *Phys. Rev. A* 76, 022511 (2007).
- [35] C. Klempt et al., *Eur. Phys. J. D* 48, 121 (2008).
- [36] J. J. Zirbel et al., *Phys. Rev. Lett.* 100, 143201 (2008).
- [37] F. Deuretzbacher et al., *Phys. Rev. A* 77, 032726 (2008).

## Switching dimensionality of conductance by a reversible phase transition: Pb nanowires on vicinal Si(111)

C. Tegenkamp and H. Pfnür

Institut für Festkörperphysik, Leibniz Universität Hannover

Confinement effects give rise to fundamental changes in the electronic structure and transport properties in low dimensional systems. Enhanced correlations between electrons and phonons result in the formation of new quasiparticles, e.g., holons and spinons [1,2]. As physical model systems in two dimensions, many examples from surface science have been reported in recent years that use, in particular, semiconductor surfaces as templates for the growth of metallic overlayers. In general, this approach allows the control of morphology, of electronic structure, and the manipulation by, e.g., coadsorption experiments. Characteristic interactions between the adsorbates and the surface reveal the development of metallic surface states. Low dopant concentrations and formation of Schottky barriers at the surface spatially and electronically separate the surface from any bulk and space charge layer contributions. The growth of atomic wires as typical one-dimensional (1d) systems has been found for a variety of materials, e.g., in mono- or sub-monolayers of In, Au, Ag, Pt on Si and Ge surfaces with different orientations and vicinalities [3-7]. They were gen-

erated by processes of self-organization. The 1D character for these systems has been proven by scanning tunneling microscopy (STM) in combination with spectroscopy, revealing a dispersion only along the atomic wires. By use of vicinal substrates, even the interchain interaction is tunable and transitions from one- to two-dimensional (2D) properties can be studied. Inherent to such low-dimensional systems are instabilities, however, which lead to metal-insulator transitions for the electronic properties, as, e.g., in Pt/Ge(100) [7,8]. These are coupled with structural changes, e.g. with period doubling in the simplest case [9]. There are, however, more complicated situations, and the structural nature of transition in low-dimensional systems has been clarified only for very few examples.

The Pb system on vicinal Si(557) is an example for such a transition, which allows insight into an interesting physical scenario responsible for conductance switching from two to one dimensions. The adsorption of Pb on this surface with a concentration close to a physical monolayer leads to a coverage dependent change in step

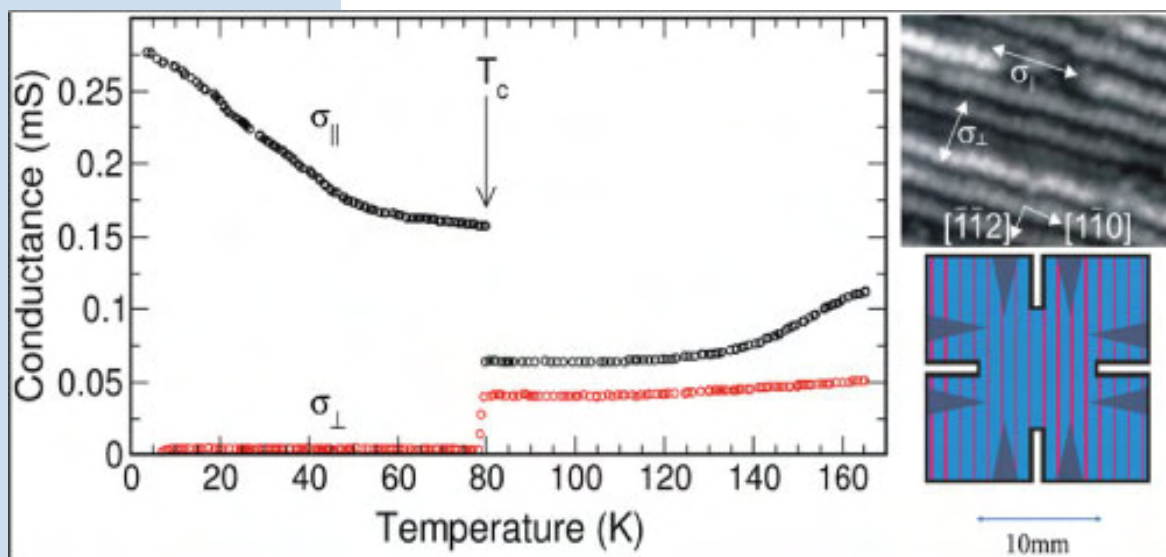


Fig. 1: Conductance curve obtained for 1.3 ML Pb on Si(557) after subsequent annealing to 640 K. The modified eight-point contact geometry as depicted on the lower right allows us to measure independently the conductance along ( $\sigma_{\parallel}$ ) and across ( $\sigma_{\perp}$ ) the wires (see STM picture on the upper right). The wire structure with an interchain distance of 1.55 nm belongs to a (223) facet at temperatures below 78K.

densities coupled with the formation of small Pb covered miniterraces that can be considered as atomic wires [14]. The annealed coverage of 1.3 ML Pb is particularly interesting because electrical conductance in this system reversibly switches from a 2D transport regime into a 1D regime below  $T_c = 78$  K (see Fig.1). Below  $T_c$ , only along the wires conductance can be measured, while in the perpendicular direction a metal-insulator transition is seen [15,16]. This Pb concentration stabilizes the (223) facet orientation, which corresponds to formation of atomic wires that are four atoms wide with a mesoscopic interchain distance of 1.55 nm [14,15,17,18]. Furthermore, the wires themselves are modulated due to Pb reconstructions on mini-(111) terraces.

A clear signature for a phase transition has been found not only by transport measurements but also by angle resolved photoemission spectroscopy (ARPES) experiments. Interestingly, ARPES has shown that these wires, contrary to, e.g., Au/Si(557), are two dimensionally coupled and the 1D transport regime is caused by perfect nesting of the Fermi surface at temperatures below  $T_c = 78$  K rather than by confinement effects [19]. Due to this strong coupling, it is obvious that any structural change will have drastic consequences toward the electronic properties, but the temperature-driven structural transition has not been identified yet.

The abrupt switching in conductance to a weakly anisotropic two-dimensional system at higher temperature is due to a temperature-driven structural change, as revealed by latest LEED investigations [21]. The relevant results are summarized in fig. 2 for the  $[\bar{1}\bar{1}2]$  direction, i.e. across the wire direction, where the insulator-metal transition appears in transport. As mentioned above, this structure belongs at low temperatures to a (223) facet. The temperature-induced change of the spot splitting can be seen best by line scans taken along the  $[\bar{1}\bar{1}2]$  direction (see fig. 2(a)). Note that the Pb-induced (223) facet structure of the initial (557) oriented surface can be either compensated by facets of the opposite inclination or by larger (111) facets, which were generated here randomly during the high anneal-

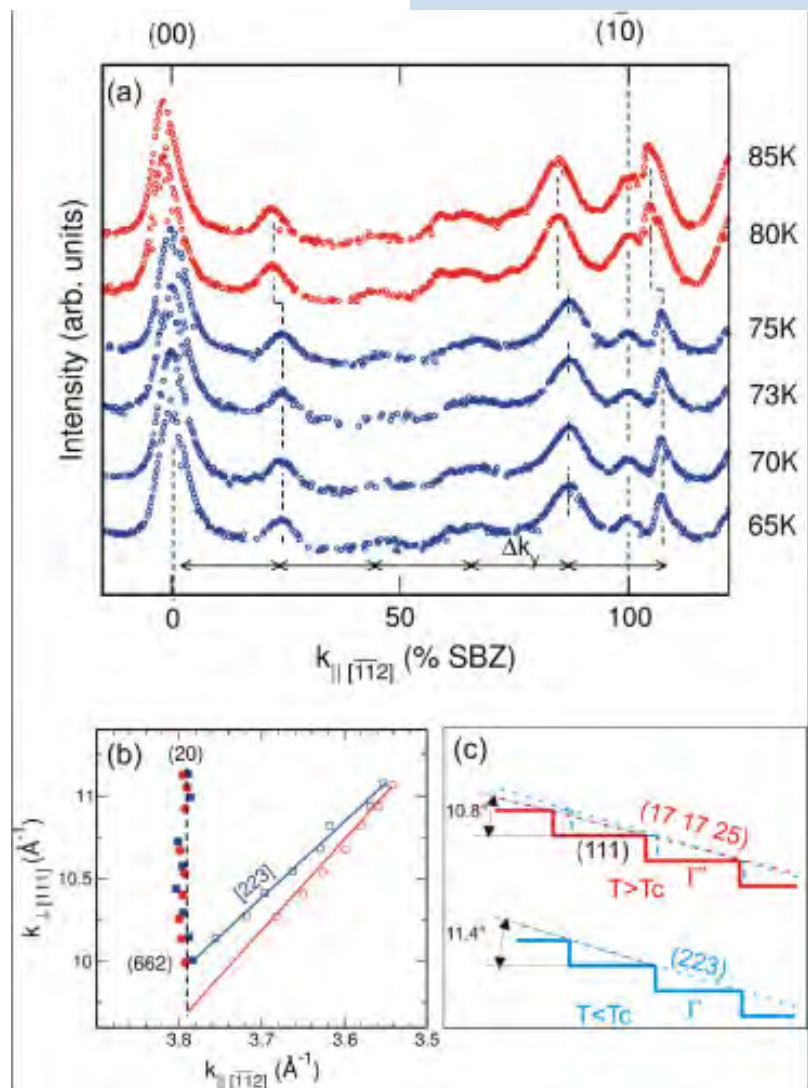


Figure 2: (a) Line scans along the  $[-1-12]$  direction taken below and above the transition temperature ( $E = 96$  eV). The temperature-driven changes in the spots are due to a refaceting process. (b)  $(k_{\perp}, k_{\parallel})$  plot around the (662) Bragg point, showing the transition from a (223) facet structure to a (17 17 25) facet structure. The change of the inclination angle is depicted schematically in (c).

ing steps of the sample preparation. However, the (10) spot of these (111) facets can be conveniently used to determine exactly the facet orientation by plotting the spot positions as a function of scattering phase. Figure 2(b) shows such a  $(k_{\perp}, k_{\parallel})$  plot taken around the (662) Bragg point. For the measurement at 40 K the angle in between the rods is  $\theta = 11.4^\circ \pm 0.3^\circ$ , in almost perfect agreement with a (223) facet. At 80 K, this angle changes to  $10.5^\circ \pm 0.3^\circ$ , which is within error bars compatible with a (17 17 25) orientation. This proves the temperature-dependent reorientation of the whole surface and excludes demixing of different facet orientations on the surface. More details about this temperature-induced refacetting orientation

can be found in [21].

*The switching in conductance to a weakly anisotropic two-dimensional system at a higher temperature is due to a breakdown of the perfect nesting condition, which has its origin in these structural changes upon annealing. The destruction of the perfect Fermi nesting is confirmed by ARPES, showing a loss of intensity at EF at the nesting points defined by the modulated Pb wire structure.*

### References

- [1] J. Voit, *Rep. Prog. Phys.* 58, 977 (1995).
- [2] S. Roth and C. Caroll, *One Dimensional Metals* \_Wiley-VCH, Weinheim, 2004.
- [3] J. R. Ahn, H. W. Yeom, H. S. Yoon, and I.-W. Lyo, *Phys. Rev. Lett.* 91, 196403 (2003).
- [4] J. N. Crain, A. Kirakosian, K. N. Altmann, et.al., *Phys. Rev. Lett.* 90, 176805 (2003).
- [5] J. N. Crain and F. J. Himpsel, *Appl. Phys. A: Mater. Sci. Process.* 82, 431 (2006).
- [6] U. Schwingenschlögl and C. Schuster, *Europhys. Lett.* 81, 26001 (2008).
- [7] O. Gurlu, O. A. O. Adam, H. J. W. Zandvliet, and B. Poelsema, *Appl. Phys. Lett.* 83, 4610 (2003).
- [8]. N. Oncel, A. van Houselt, J. Huijben, A.-S. Hallbäck, et.al., *Phys. Rev. Lett.* 95, 116801 (2005).
- [9] E. Peierls, *Quantum Theory of Solids* \_Clarendon, Oxford, 1955, p. 108.
- [10] H. W. Yeom, S. Takeda, E. Rotenberg, et.al., *Phys. Rev. Lett.* 82, 4898 (1999).
- [11] J. R. Ahn, J. H. Byun, H. Koh, et.al., *Phys. Rev. Lett.* 93, 106401 (2004).
- [12] Y. Nakamura, H. Kawai, and M. Nakayama, *Phys. Rev. B* 55, 10549 (1997).
- [13] J. M. Carpinelli, H. H. Weitering, E. W. Plummer, and R. Stumpf, *Nature* \_London\_ 381, 398 (1996).
- [14] M. Czubanowski, A. Schuster, S. Akbari, H. Pfnür, and C. Tegenkamp, *New J. Phys.* 9, 338 (2007).
- [15] C. Tegenkamp, Z. Kallassy, H. Pfnür, et.al., *Phys. Rev. Lett.* 95, 176804 (2005).
- [16] C. Tegenkamp, Z. Kallassy, H.-L. Guenter, V. Zielasek, and H. Pfnür, *Eur. Phys. J. B* 43, 557 (2005).
- [17] H. Morikawa, K. S. Kim, D. Y. Jung, and H. W. Yeom, *Phys. Rev. B* 76, 165406 (2007).
- [18] C. Tegenkamp and H. Pfnür, *Surf. Sci.* 601, 2641 (2007).
- [19] C. Tegenkamp, T. Ohta, J. L. McChesney, et.al., *Phys. Rev. Lett.* 100, 076802 (2008).
- [20] M. Czubanowski, A. Schuster, H. Pfnür H, C.Tegenkamp, *Phys. Rev. B* 77, 174108 (2008).

## Tunable Graphene System with Two Decoupled Monolayers

H. Schmidt<sup>1</sup>, T. Lüdtkke<sup>1</sup>, P. Barthold<sup>1</sup>, E. McCann<sup>2</sup>, V. I. Fal'ko<sup>2</sup>, and R. J. Haug<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Institut für Festkörperphysik, Leibniz Universität Hannover, Appelstr. 2, 30167 Hannover, Germany

<sup>2</sup> Department of Physics, Lancaster University, Lancaster LA1 4YB, United Kingdom

The development of the micromechanical cleavage technique for manufacturing ultra-thin graphitic films has made it possible to produce monolayers of carbon, called graphene, and to study their electronic properties [1,2,3,4]. Graphene has a peculiar Dirac-type spectrum of charge carriers and, since it is an gapless semiconductor, its carrier concentration can be tuned continuously from holes to electrons up to values of  $7 \cdot 10^{16}$  per  $\text{m}^2$  using an applied back-gate voltage. The use of these truly two-dimensional monolayer systems as current-carrying components in field-effect transistors (FET) gives access to new types of nanoelectronic devices. Also bilayers of graphene are often produced and normally exhibit crystalline ordering with a characteristic AB stacking [5,6], later referred to as single-crystal (SC). While the individual carrier density in such layers is usually beyond experimental control, we report on the development of graphene-based FETs containing two decoupled monolayers manufactured from a single one folded during the exfoliation process. The transport characteristics of these devices differ markedly from those manufactured from a mono- or SC bilayer and the carrier densities in both monolayers can be tuned independently using top and bottom gates, despite them lying only a few Angstroms apart.

The nanostructures were prepared by peeling off pieces from natural bulk graphite [7] and placing them on a silicon wafer covered with  $\text{SiO}_2$ . At the intermediate stage of the utilized deposition process, the flake flips over, thus producing two misoriented graphene layers lying on top of each other (Fig. 1a sketches the top-view of such a stacking). Then, this material is processed into Hall-bar samples using plasma etching (Fig. 1b) and contacted (to both layers) by evaporating chromium and gold electrodes. Scanning the structure with an atomic force microscope (AFM) reveals a

double step at the etched edges due to the two layers (arrows in Fig. 1c).

To distinguish the designed device from monolayers or SC bilayers we performed transport measurements, applying magnetic fields up to 13 T at temperatures down to 1.5 K. We used a broad range of back-gate voltage applied between the substrate of n-Si and graphene. Positive back-gate voltage induces electrons, negative holes. Figure 2a shows the typical field effect of graphene demonstrating the operation of the device as an FET [1]. The measured maximum resistivity at the approximate neutrality condition for the graphene layers,  $\rho_{\text{max}} \approx 3.3 \text{ k}\Omega$  at 1.5 K, is about half of the earlier-reported typical values for monolayers [2,4], which is in line with the assumption that the device consists of two monolayers conducting in parallel.

Most importantly, the layer structure can be characterized by analyzing the Shubnikov-de Haas (SdH) oscillations appearing in the resistance  $R(B)$  of the flake while sweeping a perpen-

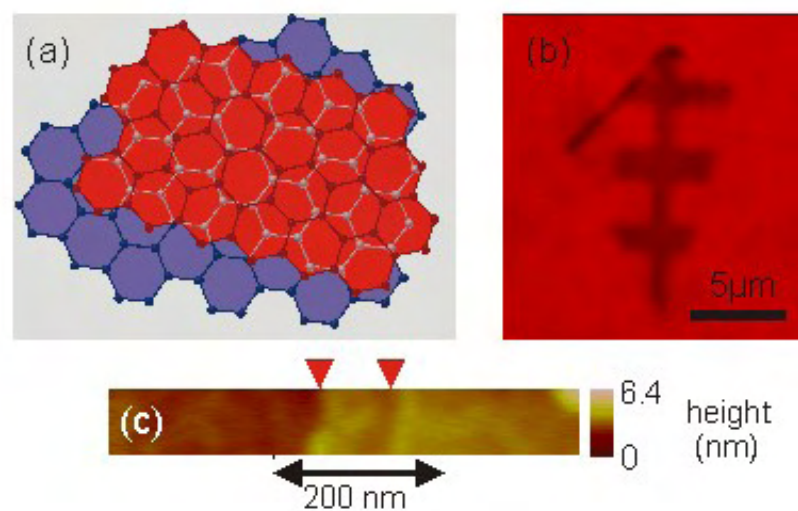


Fig. 1: Sketch of two graphene monolayers lying on top of each other with a rotational fault. b) Optical image of a two layer graphene Hall-bar device. c) AFM scan of an edge of the two layer system showing two steps.

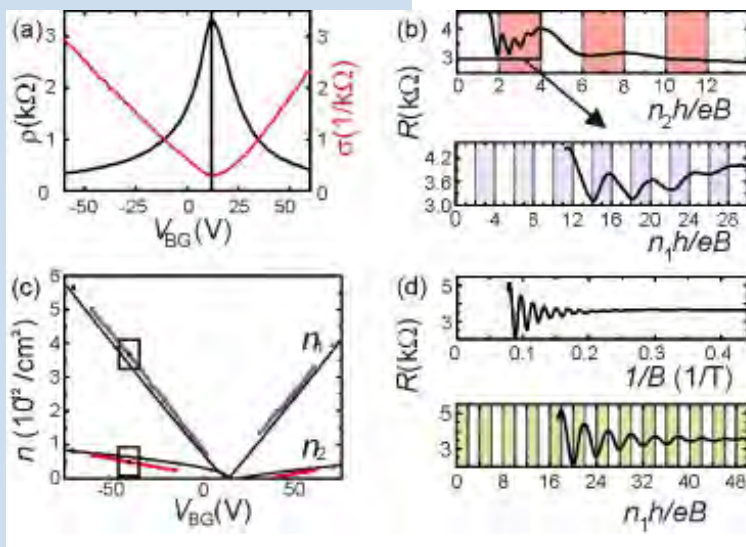


Fig. 2: The characteristic field effect of graphene. b) SdH oscillations of a device with two decoupled monolayers at a fixed back-gate voltage of  $-40$  V. c) Carrier concentrations of this two layer system in dependence of the applied back-gate voltage. d) SdHO's of a coupled bilayer system measured at  $100$  V back-gate voltage.

dicular magnetic field  $B$ . The Berry's phase  $\pi$  characteristic of electrons in monolayer graphene is directly related to a shift in the SdH oscillations minima in contrast to SC bilayer graphene [6]. When studied at a fixed back-gate voltage (Fig. 2b), the magnetoresistance measured in the two-layer device and plotted versus  $1/B$  exhibits two important features. First,

two oscillations with very different periods can be seen, manifesting the co-existence of two carrier densities,  $n_1$  and  $n_2$ , in the sample. Second, at all the studied voltage values, the minima of both fast (lower panel) and slow (upper panel)  $1/B$ -oscillations show the phase shift typical for monolayer graphene. To highlight this behavior, in the top/bottom panels of Figure 2b the  $1/B$  intervals with the rising parts of the corresponding oscillations are colored in red/blue, starting with a white area at zero. For comparison, Figure 2d shows the results of a similar study performed for a SC bilayer, where the position of the SdH oscillations minima is not shifted (first area is colored) and coincides with the earlier observed [5] behaviour. Finally, the observed carrier densities in the two-layer device and their dependence on back-gate voltage presented in Figure 3c can be compared to a theoretical calculation plotted as black lines. This calculation takes into account the electrostatics of the device containing two monolayers at distance of  $1.5$  nm from each other lying on top of the  $\text{SiO}_2$  dielectric layer and additional doping charge, due to deposits left on top of the upper layer in the course of the manufacturing process.

To tune the carrier densities independently on the two parallel layers, we fabricated a two-layer sample with an additional top gate (Fig. 3a,b). A  $60$  nm thick isolating layer of polymethylmethacrylat (PMMA) was spun onto a Hall-bar device and covered by a local top gate using standard electron beam lithography. Measuring the field effect at a fixed top-gate voltage, the longitudinal resistance now contains two pronounced peaks (marked by arrows in Fig. 3c) indicating the difference between the carrier concentrations in the top-gated and free parts of the device. The back-gate voltage interval between the two peaks corresponds to the bipolar transistor regime, with a p-n-p junction [8] formed underneath the top gate [9,10]. The tunability of the device using the top gate is demonstrated in Figure 3d. Here, the back-gate voltage was kept fixed and the top-gate voltage,  $V_{\text{TG}}$  was varied. Several sets of oscillations are observed. The oscillations which are almost independent of the top-gate voltage originate from the ar-

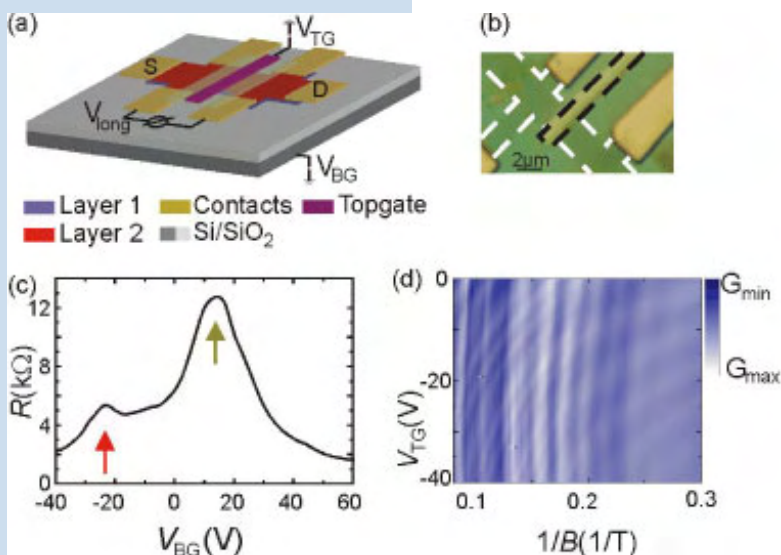


Fig. 3: Schematic drawing of the second sample. The graphene layers (red/blue) and the top-gate metallic plate are separated via a PMMA Layer. b) Image of the sample showing the etched flake (white lines), the contacts and the top gate (black line). c) Longitudinal resistance versus back-gate voltage for  $V_{\text{TG}} = 15$  V. The maxima correspond to the  $t$  neutrality points underneath (red) and outside the gated region (green) are marked. d) 2D-plot showing  $dR/dB$  versus the inverse magnetic field ( $B^{-1}$ ) and the top-gate voltage at  $V_{\text{BG}} = -40$  V.

eas outside the top-gated region. The oscillations with a strong  $V_{TG}$  dependence characterize the layers underneath the top gate. This demonstrates not only that the different carrier densities on the two closely laid graphene layers can be detected, but also that those densities can be independently controlled and tuned using a combination of top/backgates.

### Outlook

When operated in a broad voltage range, such a device could be employed in a search for the recently predicted superfluidity [11] in the 'excitonic insulator' state expected to form in a pair of graphene layers with opposite polarity. Also, the technique of layer folding offers a promising method for making devices with separately contacted pairs of monolayers acting as atomically-thin optically-transparent electrodes [12,13].

A detailed description of the scientific results is given in: [H. Schmidt et al., Appl. Phys. Lett. 93, 172108 \(2008\)](#)

### References

- [1] K. S. Novoselov, A. K. Geim, S. V. Morozov, D. Jiang, Y. Zhang, S. V. Dubonos, I. V. Grigorieva, and A. A. Firsov, *Science* 306, 666 (2004).
- [2] K. S. Novoselov, A. K. Geim, S. V. Morozov, D. Jiang, M. I. Katsnelson, I. V. Grigorieva, S. V. Dubonos, and A. A. Firsov, *Nature* 438, 197 (2005).
- [3] Y. Zhang, Y. W. Tan, H. L. Stormer, and P. Kim, *Nature* 438, 201 (2005).
- [4] A. K. Geim and K. S. Novoselov, *Nature Materials* 6, 183 (2007).
- [5] K. S. Novoselov, E. McCann, S. V. Morozov, V. I. Fal'ko, M. I. Katsnelson, U. Zeitler, D. Jiang, F. Schedin, and A. K. Geim, *Nature Physics* 2, 177-180 (2006).
- [6] E. McCann and V. I. Fal'ko, *Physical Review Letters* 96, 086805 (2006).
- [7] NGS Naturgraphit GmbH.
- [8] V. V. Cheianov and V. I. Fal'ko, *Physical Review B* 74, 041403 (2006).
- [9] B. Oezylmaz, P. Jarillo-Herrero, D. Efetov, D. A. Abanin, L. S. Levitov, and P. Kim, *Physical Review Letters* 99, 166804 (2007).
- [10] J. R. Williams, L. DiCarlo, and C. M. Marcus, *Science* 317, 638 (2007).
- [11] H. Min, R. Bistritzer, J.-J. Su, and A. H. MacDonald, *arXiv:0802.3462v1* (2008).
- [12] D. Abergel, A. Russell, and V. I. Fal'ko, *Applied Physics Letters* 91, 063125 (2007).
- [13] R. R. Nair, P. Blake, A. N. Grigorenko, K. S. Novoselov, T. J. Booth, T. Stauber, N. M. R. Peres, and A. K. Geim, *Science* 320, 1308 (2008).

## Virtual Institute “Nanotechnology in Polymer Composites”

A. Kempe and R. Rolfes

Institut für Statik und Dynamik, Leibniz Universität Hannover, Appelstr. 9A, 30167 Hannover, Germany

*The Virtual Institute „Nanotechnology in Polymer Composites“ is a new research network funded by the Helmholtz Association of German Research Centres (HGF).*

*Under the guidance of the DLR Institute of Composite Structures and Adaptive Systems an interdisciplinary group of chemists, material scientists, process engineers and structural engineers investigates the influence of nanoparticles on low viscous, injectable polymer matrices and therewith the mechanical properties of the corresponding fibre composites. Main focus of the future research project is the development of special nanoparticles to improve the reaction behaviour of resins in CFRP-composites.*

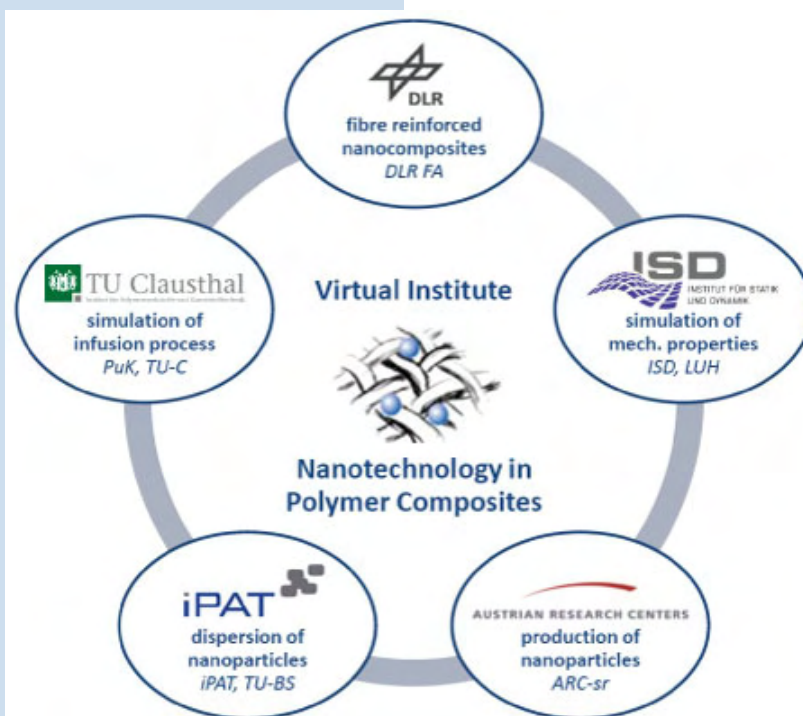
*The Virtual Institute „Nanotechnology in Polymer Composites“ consists of 5 research institutions: the DLR Institute of Composite Structures and Adaptive Systems in Braunschweig, the Institute for Particle Technology (TU Braunschweig), the Institute of Polymer Materials and Plastics Engineering (TU Clausthal), the Institute for Structural Analysis (Leibniz Universität Hannover) as well as the Austrian Research Centers Seibersdorf.*

### Goals of the Virtual Institute

*For the near future, the European aircraft industry demands reduction of the structure weight by 30 % and cost savings for the manufacturing process by 40 %. These goals can be reached by the development of novel high-performance composites manufactured by liquid composite moulding (LCM) technologies (RTM, VAP, SLI) instead of prepreg technique used today (cf. fig 1). The properties of high-performance composites produced by the injection technique have not yet reached the level of the prepreg composites due to the polymer system. The shrinkage of liquid resins induces residual stresses that deteriorate the material performance. Traditional fillers (usual share < 40 %) eliminate these effects at the expense of viscosity and processability. Using fillers of nano scaled particles abolish this drawback. Moreover, the mechanical properties of the polymers are significantly improved by low volume fraction (1-5 %) of nanoparticles due to their high specific surface.*

*The challenge is to optimise the particle content, size, shape and spatial distribution. New design criteria are needed to utilise these new composites for fabrication of aircraft components.*

*The virtual institute basically focuses on the development of the complete process chain of structures made of fibre reinforced nanocomposites. The chain comprises the particle development, particle dispersion, development and optimisation of methods to produce fibre reinforced nanocomposites, the characterisation of the flow and curing behaviour, composite characterisation, tool for material design, material process simulation, structural design manufacturing and testing. Materials design covers surface modified nanoparticles and various hard core nanoparticles aiming at increased compression strength (+ 20 %), impact resistance (+ 20 %) and reduced matrix shrinkage (- 50 %) of carbon fibre reinforced*





polymers. In order to prove the anticipated improvements, the influence on the injection techniques has to be investigated. For a particular design of nanoparticles, the mechanical properties are predicted using the developed simulation tools and verified by testing. Curved stiffened panels serve as examples that demonstrate and validate the successful transfer into structural components. The correlations between nanoparticle-type, size, modification, its share as constituent part of the composite and the results gained by the experimental part are expected to generate fundamental knowledge for further nanoparticle-applications to a selective challenges in different advanced structures. The objectives are improved composite structures, optimised structural design criteria, understanding of curing characteristics and fail-safe features while facilitating processing and reducing component weight. Results are expected to be of great importance for other branches as well (e.g. automotive engineering).

In detail, the objectives of the virtual institute can be summarized as follows:

- novel tailored nanoparticles by highly-efficient design and manufacturing in order to enhance at low content levels ( $\leq 5\%$ ) substantially the mechanical performance of the matrix (higher impact resistance; reduced resin shrinkage) in comparison to state of the art resins,
- generation of new lightweight fibre reinforced nanocomposites by different injection techniques (RTM, VAP, SLI) with some order of magnitudes higher mechanical performance in comparison to state of the art CFRP (compression strength: plus 20 %; impact resistance/damage tolerance: plus 20 %; matrix shrinkage: minus 50 %),
- reduction of structure weight of 20 % by higher material usage, lower safety factors and lower matrix density when compared to conventional equivalent CFRP components,
- description of the flow and curing characteristics of the resin, influenced by the nanoparticles,
- design and implementation of numerical simulation tools for highly-efficient processing of advanced fibre reinforced nanocomposites by injection technique and of tailored tools for mechanical performance predictions,
- optimised manufacturing of thick-walled laminates by reduced resin shrinkage and improved thermal conductivity (no overheating),
- real lightweight demonstrators i.e. flat and curved stiffened panels and lug elements for aircraft industry representing the transferability of the nanocomposite concept to real CFRP structures.

### Research at the Institute for Structural Analysis, Leibniz Universität Hannover

Modelling and simulation of nanoparticle's effectiveness on mechanical properties (Poisson's ratio, stiffness, strength)

The objective of modelling and simulation of nanoparticle's effectiveness is to provide directions for the design of optimal nanoparticles. Therefore the atomic structure of the resin and the nanoparticles must be dissolved. A detailed compilation of the most important simulation methods for computer oriented nano mechanics is given by Liu, Karpov, Zhang and Park [1]. Amongst them are so-called ab-initio methods, semiempirical methods and classical molecular dynamics and continuum mechanics approaches. While ab-initio methods do not require any empirical input data but only natural constants they can currently only be used for systems up to 10 electrons. Semi-empirical methods are suited for simulating chemical reactions. Since movement of the atomic nucleus is assumed to be quasi-static as compared to the electron's movement it can be described by the principals of classical mechanics. Molecules of up to 100 atoms can be handled. In classical molecular dynamics atoms are assumed to be mass points only. Thus arrangements of several thousand molecules can be simulated. Existing molecular dynamic codes are working similar to codes for multibody dynamics. Mostly, the objective of such simulations is to calculate the state of equilibrium with minimum energy. Since molecules are over-determined systems the equilib-

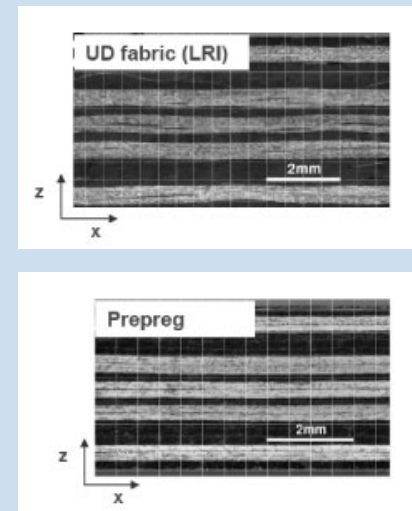


Figure 1: comparison of fabrication techniques: top: liquid resin injection yields good layer quality (= good mechanical properties); below: prepregs exhibit very good layer quality (=very good mechanical properties);

rium bond lengths and angles differ from the “natural” values which were initially assumed. However, such simulations do not regard the mechanical behaviour of molecules under external loading, which is the focus of the present project. For that purpose special molecular dynamic finite elements (MDFEM) have been developed, which – like classical molecular dynamics - are based on force fields (or potential functions) [2]. The force fields are either derived from quantum mechanical analyses of some representative model configurations with subsequent force matching or by adaptation to spectroscopic measurement data. Different force fields exist which are applicable to specific configurations. Careful selection of the appropriate force field is of utmost importance for achieving reliable results. The special family of finite elements has the advantage over standard beam, bar or shell elements that it does not use any rotational degrees of freedom. Atoms as mass points do not have rotational degrees of freedom as well. Using standard finite element can create unphysical restraints in adjacent molecule groups if e.g. a beam element is bent.

The new family of finite elements has been successfully applied to simulating the inelastic behaviour of elastomer materials [3,4]. It also allows for developing multi-scale approaches, where for the continuum part standard continuum mechanics elements and algorithms can be applied. Such multi-scale analyses are very important for efficient calculation of the mechanical behaviour of nanocomposites.

Within the virtual institute, a tool based on MDFEM is being developed that can predict the mechanical properties (Poisson’s ratio, stiffness, strength) of nanoparticle reinforced matrix material. In the beginning a model of the pure matrix material will be established. Input data to be provided are the chemical structure as well as material parameters of the bondings. Then nanoparticles will be embedded into the model with a corresponding representative volume element. Secondly, based on homogenisation of the nanoparticle reinforced matrix, the aspect of the CFRP will be added and therefore continuum finite element

methods will be applied for simulating microbuckling, which is the failure mode for compression in fibre direction. Finally, validation of the tools will be performed by comparison with experimental data.

## References

- [1] W. K. Liu, E. G. Karpov, S. Zhang, H. S. Park.: An introduction to computational nanomechanics and materials. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* 193, pp.1529-1578 (2004)
- [2] L. Nasdala, G. Ernst.: Development of a 4-node finite element for the computation of nano-structured materials. *Computational Materials Science* 33, pp. 443-458 (2005)
- [3] L. Nasdala, M. Kaliske, Y. Wei: Simulation of inelastic rubber material using a force field based FE approach. In: P.-E. Austrell, L. Kari.: *Constitutive Models for Rubber IV*, London, A.A. Balkema, pp. 179-184 (2005)
- [4] Nasdala, L.; Rolfes, R.: Berechnung von Nanostrukturen mit der molekuldynamischen Finite-Elemente-Methode unter Verwendung von User-Elementroutinen, *Proceedings ABAQUS-Anwenderkonferenz* (2008)

# Impresum/Imprint

## Herausgeber/Editor

Laboratorium für Nano- und Quanten-  
engineering (LNQE)  
Leibniz Universität Hannover  
Schneiderberg 32  
30167 Hannover  
Germany  
www.LNQE.uni-hannover.de



## Redaktion/Edited by:

### Sprecher des Vorstandes/ Speaker of the executive board

Prof. Dr. Rolf J. Haug  
Institut für Festkörperphysik  
Abteilung Nanostrukturen  
Leibniz Universität Hannover  
Appelstr. 2  
D-30167 Hannover  
Phone: +49 (0)511 762 2901  
Fax: +49 (0)511 762 2904  
haug@nano.uni-hannover.de  
www.nano.uni-hannover.de




### Geschäftsführer/Chief Oper- ating Officer

Dr. Fritz Schulze Wischeler  
Laboratorium für Nano- und Quanten-  
engineering  
Leibniz Universität Hannover  
Schneiderberg 32  
D-30167 Hannover  
Phone: +49 (0)511 762 5031  
Fax: +49 (0)511 762 5051  
Schulze-Wischeler@lnqe.uni-hanno-  
ver.de  
www.lnqe.uni-hannover.de



## Druckerei/Print shop

DruckTeam Druckgesellschaft mbH,  
Hannover



Laboratorium für Nano- und Quantenengineering  
Leibniz Universität Hannover  
Schneiderberg 32  
30167 Hannover  
Germany

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