



10 Jahre

Zentrum für Mikrostrukturforschung



Am 9. Februar 1996 wurde das Hamburger Zentrum für Mikrostrukturforschung MARCH (Microstructure Advanced Research Center Hamburg) nach einer Bauzeit von 15 Monaten offiziell eröffnet. Die beteiligten Hamburger Wissenschaftler können mittlerweile auf ein erfolgreiches Jahrzehnt in der internationalen Spitzenforschung zurückblicken.

Die baulichen Maßnahmen für das Zentrum umfassten unter anderem einen Reinraum für die Halbleitertechnologie und speziell ausgestattete Labore mit separaten Fundamenten und Schallschutzwänden für die Rastersondenmikroskopie.

Ziele des MARCH waren von Beginn an die gezielte Herstellung, Charakterisierung und Erforschung von neuartigen Mikro- und Nanostrukturen sowie die enge Verzahnung von Forschung und Lehre in diesem modernen und spannenden Gebiet der Wissenschaft.

Die Forschungsthemen konzentrieren sich dabei sowohl auf die Grundlagen als auch auf Anwendungen von Mikro- und Nanostrukturen in den Bereichen der Informations- und Kommunikationstechnik sowie der Medizintechnik.

150 Wissenschaftler forschen am Zentrum unter anderem an Halbleiter- und magnetischen Materialien für die Anwendung in neuen elektronischen und magnetischen Bauelementen, an hochempfindlichen magnetischen Sensoren und an der Entwicklung neuer Analysemethoden für die Nanotechnologie.

Das Forschungszentrum hat sich inzwischen einen hervorragenden internationalen Ruf erworben. Jedes Jahr werden die Hamburger Physiker auf zahlreiche nationale und internationale Tagungen eingeladen, um über ihre aktuellen Arbeiten zu berichten. 12 Wissenschaftler des MARCH wurden bisher für ihre Forschungsarbeiten mit Preisen ausgezeichnet. In den vergangenen 10 Jahren haben die Wissenschaftler des MARCH für Forschungsprojekte achtmal so viel Geld eingeworben, wie die Freie und Hansestadt Hamburg für den Bau des Zentrums investiert hat.

Bereits im Jahr der Eröffnung des Zentrums (1996) konnte ein Graduiertenkolleg der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) zum Thema „Physik nanostrukturierter Festkörper“ eingeworben werden. Der Fokus dieses Graduiertenkollegs, welches über die Laufzeit von 9 Jahren gefördert wurde, lag auf dem Wachstum und der Charakterisierung nanostrukturierter Festkörper, wobei halbleitende, magnetische und supraleitende Materialien untersucht wurden.

Ein Jahr später, 1997, wurde ein DFG-Sonderforschungsbereich mit dem Titel „Quantenmaterialien: laterale Strukturen, hybride Systeme und Cluster“ federführend durch das Zentrum in Hamburg etabliert. Dieser Sonderforschungsbereich konzentriert sich auf die Untersuchung von Quantenphänomenen in lateral strukturierten III-V-Halbleitern, in hybriden Halbleiter-Ferromagnet-Systemen sowie in nanoskaligen Halbleiterclustern, die durch nasschemische Methoden präpariert werden.

Im Jahr 1998 konnte im Rahmen eines bundesweiten Wettbewerbs des Bundesministeriums für Bildung und Forschung ein nationales Nanotechnologie-Kompetenzzentrum mit dem Schwerpunkt „Nanoanalytik“ eingeworben werden, welches seit 2003 durch ein regional ausgerichtetes Kompetenzzentrum „HanseNanoTec“ ergänzt wurde.

1999 beteiligte sich das Zentrum an der Einrichtung eines weiteren DFG-Graduiertenkollegs des Fachbereichs Physik im Themenfeld „Spektroskopie an lokalisierten atomaren Systemen“. Zwei Jahre später erfolgte die Beteiligung an dem DFG-Graduiertenkolleg „Design und Charakterisierung funktionaler Materialien“ unter der Federführung des Fachbereichs Chemie.

Im selben Jahr (2001) war das Zentrum - wiederum im Rahmen eines nationalen Wettbewerbs - erfolgreich bei der Einwerbung einer „Forschungsdozentur“ vom Stifterver-

band für die Deutsche Wissenschaft. Ferner übernahmen Wissenschaftler des MARCH die Federführung bei der wissenschaftlichen Konzeption und Ausgestaltung des neuen „Interdisziplinären Nanowissenschafts-Centrums Hamburg“ (INCH), dessen Realisierung im Jahr 2005 von der Freien und Hansestadt Hamburg beschlossen wurde.

Seit Beginn des Jahres 2006 konnte ebenfalls unter Federführung des MARCH ein zweiter DFG-Sonderforschungsbereich mit dem Titel „Magnetismus vom Einzelatom zur Nanostruktur“ in Hamburg etabliert werden. Dieser Sonderforschungsbereich beschäftigt sich mit der Herstellung und Charakterisierung kleinster magnetischer Teilchen (Atome, Moleküle, Nanopartikel) im Hinblick auf zukünftige Anwendungen in der Magnetspeichertechnik.

Schließlich wird 2006 ein weiteres DFG-Graduiertenkolleg zum Thema „Maßgeschneiderte Metall-Halbleiter-Hybridssysteme“ starten, welches die Erfolge des Zentrums in der Doktorandenausbildung fortsetzen wird.

Darüber hinaus war und ist das Zentrum im Rahmen zahlreicher europäischer und internationaler Forschungsprogramme aktiv. Es bietet Wissenschaftlern aus derzeit 10 verschiedenen Nationen beste Forschungsmöglichkeiten auf höchstem internationalen Niveau.



Die Fortschritte auf dem Gebiet der Nanotechnologie basieren auf der Entwicklung geeigneter Werkzeuge, welche eine gezielte Analyse und Manipulation von Nanostrukturen ermöglichen. Den Durchbruch in diesem Bereich markiert das im Jahr 1982 erfundene Rastertunnelmikroskop. Dieses Gerät bildet Nanostrukturen bis in den atomaren Bereich ab und ermöglicht gleichzeitig den gezielten Zusammenbau von Atomen und Molekülen zu neuen, künstlich hergestellten Nanostrukturen. Damit lassen sich Prototypen von kleinsten funktionalen Bauelementen realisieren. Die Weiterentwicklung dieser Schlüsseltechnologie wird auch in Zukunft maßgebend sein für das Tempo, mit dem neues Wissen über Nanostrukturen gewonnen und neue Anwendungen identifiziert werden.

Mit dem Rastertunnelmikroskop begann die Entwicklung einer ganzen Reihe von Rastersondenmikroskopen, welche allesamt auf dem gleichen Grundprinzip funktionieren:

einer zeilenweisen Abtastung der Probenoberfläche mit einem mikroskopisch kleinen Sensor. Der Sensor misst eine charakteristische Wechselwirkung, welche vom Abstand zwischen dem Sensor und der Probe abhängt. Aus der bekannten Position des Sensors und der damit gemessenen Signalstärke lässt sich im Computer ein Abbild der Oberflächentopographie gewinnen. Durch die Wahl des geeigneten Sensors kann man neben der Topographie eine Vielzahl von Probeneigenschaften hoch aufgelöst bestimmen, z. B. die elektronische und magnetische Struktur, Oberflächenreibung, Elastizität oder Reaktivität auf mikroskopischer Skala.

Die Forschungsgruppe Rastersondenmethoden untersucht die physikalischen Effekte nanostrukturierter Materialien, deren Zugang erst durch die Rastersondenmikroskopie möglich wurde. Im Fokus der Forschung stehen magnetische und elektronische Eigenschaften von verschiedensten Materialien wie z. B. Metallen, Halbleitern,

Isolatoren, Supraleitern, magnetischen Nanostrukturen, organischen Filmen oder biologischen Proben.

Die Forschungsarbeiten zu magnetischen und elektronischen Eigenschaften von Nanostrukturen sind von besonderem industriellem Interesse im Hinblick auf die Entwicklung von neuen magnetischen Speichermedien mit vielfach höherer Speicherdichte und den langfristigen Übergang von der Mikro- zur Nanoelektronik. In der Forschungsgruppe werden z. B. die elektronischen Eigenschaften von Kohlenstoff-Nanoröhren untersucht. Diese Röhren mit einem Durchmesser im Nanometerbereich können sowohl halbleitend als auch metallisch sein. Aus ihnen könnten die "Nanotransistoren" der Zukunft aufgebaut werden. Einen weiteren Forschungsschwerpunkt bilden die Weiterentwicklung von Rastersondenmikroskopen und die Etablierung neuer Messmethoden. Die Forschungsgruppe ist international führend im Bau von Mikroskopen, die in eine Ultrahoch-

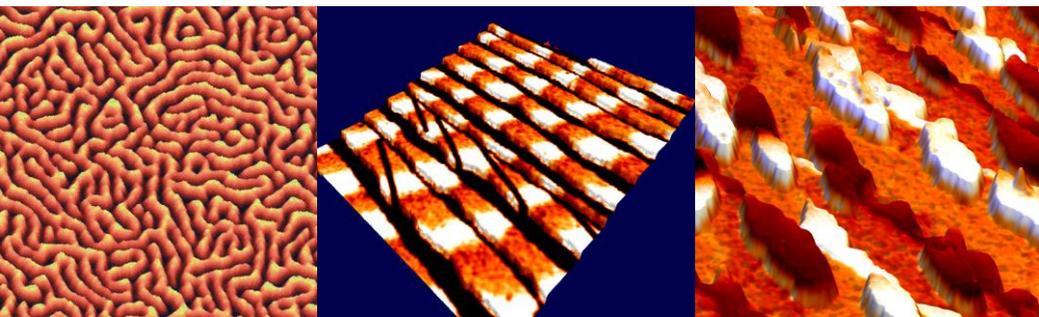
vakuum-, Tieftemperatur- und Hochmagnetfeldumgebung integriert sind.

Der herausragendste Erfolg ist die Entwicklung der spinsensitiven Rastertunnelmikroskopie. Dies ist die weltweit höchstauflösendste Methode zur Messung der magnetischen Struktur von Proben, mit der es gelingt, sogar Magnetisierungsunterschiede einzelner Atome abzubilden. Für diese Leistung wurde der Philip Morris Forschungspreis 2003 an Prof. Dr. Roland Wiesendanger und Dr. Matthias Bode verliehen.

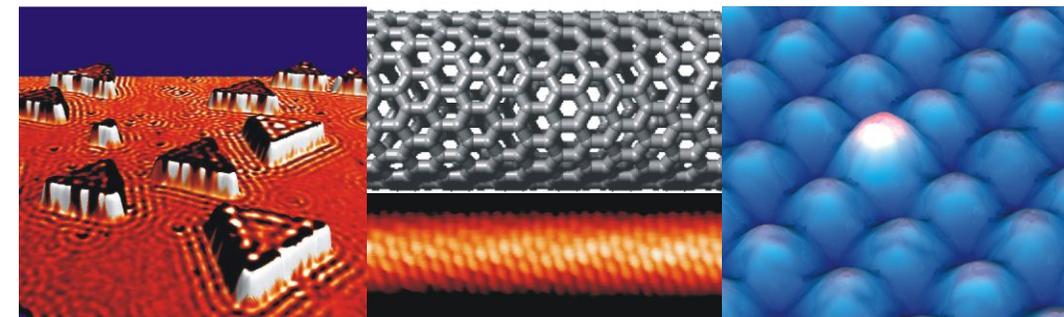
Kontakt:

Prof. Dr. Roland Wiesendanger
Universität Hamburg
Institut für Angewandte Physik
FG Rastersondenmethoden
Jungiusstr. 11
20355 Hamburg

Tel.: (040) 4 28 38 - 52 44
wiesendanger@physnet.uni-hamburg.de
www.nanoscience.de



Links: Magnetische Bereichsstruktur einer dünnen $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$ -Schicht - gemessen mit magnetischer Rasterkraftmikroskopie bei tiefen Temperaturen. *Mitte/Rechts:* Nanoskalige magnetische Eisendrähte und -inseln auf einer gestuften Wolfram-Oberfläche. Die Magnetisierungsrichtung ist farbkodiert und wurde mit spinsensitiver Rastertunnelmikroskopie bestimmt.



Links: Kobaltinseln mit einer Höhe von zwei atomaren Lagen auf einem Kupfersubstrat. Die wellenartigen Muster sind Interferenzen der Elektronenwellen, welche an den Kobaltinseln und anderen Defekten im Kristall gestreut werden. *Mitte:* Modell und atomar aufgelöste Rastertunnelmikroskopie-Abbildung einer Kohlenstoff-Nanoröhre. *Rechts:* Atomar aufgelöste Rasterkraftmikroskopie-Aufnahme einer Verunreinigung in einem Nickeloxid-Kristall.

Die Forschung der Gruppe Nanostrukturphysik konzentriert sich auf Halbleiter, hybride Halbleiter-Metall-Strukturen und Ferromagnete in der Größenordnung von Mikro- und Nanometern.

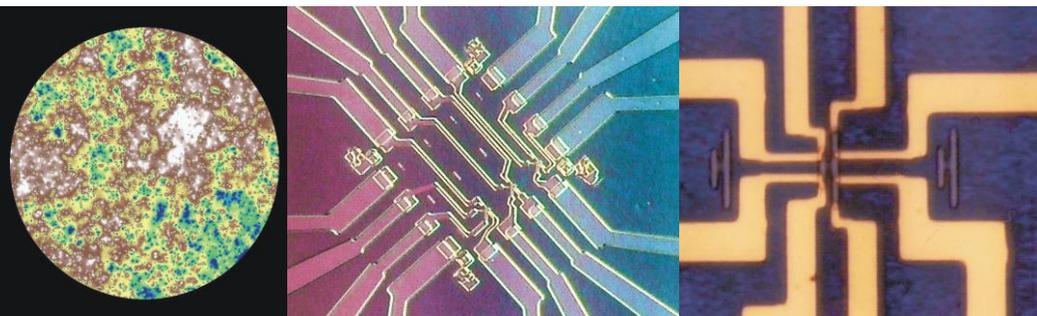
Im Bereich der Halbleiterforschung werden Experimente zum Magnetotransport bei niedrigen Temperaturen an zweidimensionalen Elektronensystemen von Be- δ -dotierten GaAs/GaAlAs-Heterostrukturen durchgeführt, um den Einfluss von Unordnung auf den Quantum-Hall-Effekt zu untersuchen und die Natur des Metall-Isolator-Übergangs in hohen magnetischen Feldern aufzuzeigen. In hybriden Halbleiter-Metall-Strukturen wird ein niedrigdimensionales Elektronensystem in einem Halbleiterkanal durch die unmittelbare Nähe eines Supraleiters wie Niob oder eines Ferromagneten wie Permalloy „supraleitend“ oder „magnetisch“ gemacht. Diese Metalle dienen als „Source“- und „Drain“-Kontakte für Andreev-reflektierte oder spinpolarisierte Ladungsträger. Unmittelbare Nähe bedeutet dabei, dass beide Halbleiter-Metall-Grenzflächen von extrem hoher Qualität sein und hohe Elektronendurchlässigkeit und Spininjektionsraten aufweisen müssen. Ferner benötigt man kurze Kanallängen, die kleiner sind als die Kohärenzlängen des Supraleiters

oder des Spinsystems. Da InAs keine Schottky-Barrieren in Kontakt mit Metallen ausbildet, ist dies der bevorzugte Halbleiter. Transistoren mit hoher Elektronenbeweglichkeit, die auf InAs basieren, werden von der Forschungsgruppe „Epitaktische Nanostrukturen“ erhalten. Die schmalen Kanäle zwischen den „Source“- und „Drain“-Kontakten werden mittels Elektronenstrahl-Lithographie und „Lift-off“-Techniken hergestellt, während die größeren Strukturen durch konventionelle Photolithographie definiert werden. Basierend auf den hybriden Quantenstrukturen werden Josephson-Feldeffekt-Transistor- und Spin-Transistor-Strukturen präpariert und untersucht. Die gleichzeitige Kontrolle des Elektronenspins und der Elektronenladung steckt noch in den Kinderschuhen, und es müssen noch einige Hindernisse bis zu einer industriellen Anwendung überwunden werden. Im Bereich der „Spinelektronik“ liegt unser Fokus auf dem Maßschneidern von ferromagnetischen Domänen, der Dynamik von Ummagnetisierungsprozessen und dem Elektronentransport in ferromagnetischen Nanostrukturen. Die Ergebnisse von Magnetkraftmikroskopie-Experimenten werden mit mikromagne-

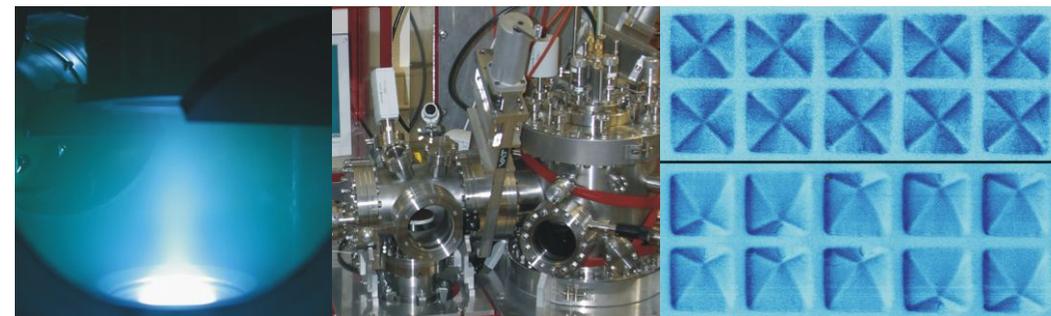
tischen Simulationen verglichen. Die Gruppe Nanostrukturphysik ist verantwortlich für den allgemeinen Betrieb des Reinraums und dessen Geräteausstattung, die mit den anderen Forschungsgruppen geteilt wird. Insbesondere betreut die Gruppe Nanostrukturphysik die Systeme für optische Masken und die Elektronenstrahl-Lithographie, welche im Reinraum aufgebaut sind. Ferner haben wir zwei Ultrahochvakuum-Systeme für Magnetron-Sputtering und für die in-situ Reinigung von Oberflächen aufgebaut. Ein System wird für die Deposition des Supraleiters Niob eingesetzt, während das zweite System für die Abscheidung der Ferromagnete Eisen und Permalloy verwendet wird. Hochwertige Niobfilme und saubere Grenzflächen zu dem quasi zwei-dimensionalen Elektronensystem des InAs ergeben Josephson-Feldeffekt-Transistoren von herausragender Qualität. Eisen- und Permalloy-Elektroden dienen als spinpolarisierte „Source“- und „Drain“-Kontakte in Spin-Transistor- und Spin-Ventil-Bauelementen. Oxidierte Aluminiumschichten werden in Tunnelstrukturen als Barrieren eingesetzt. Mit Hilfe von thermischer Verdampfung erreichen wir strukturell geordnete, stöchi-

ometrische Filme der Heusler-Legierung Ni₂MnIn. Dieser halbmetallische Ferromagnet soll sein volles spinpolarisiertes Elektronensystem bei epitaktischem Wachstum auf InAs beibehalten. Die Topographie, Morphologie, Gitterstruktur und chemische Zusammensetzung von dünnen Filmen und lateral strukturierten Systemen werden mit analytischen Methoden wie Rasterkraft- und Magnetkraft-Mikroskopie, Raster- und Transmissionselektronenmikroskopie, Röntgen- und Elektronenbeugung sowie energiedispersiver Röntgenanalyse untersucht. Die Spinpolarisation von ferromagnetischen dünnen Filmen wird mittels Punktkontakt-Andreev-Spektroskopie bestimmt.

Kontakt:
 Prof. Dr. Ulrich Merkt
 Universität Hamburg
 Institut für Angewandte Physik
 FG Nanostrukturphysik
 Jungiusstr. 11
 20355 Hamburg
 Tel.: (040) 4 28 38 - 4685
 merkt@physik.uni-hamburg.de
 www.physnet.uni-hamburg.de/institute/IAP/
 Group_N/



Links: Berechnete Potentiallandschaft mit positiv und negativ geladenen Streuatomen in der Ebene eines zweidimensionalen Elektronensystems. *Mitte:* Zwölf Spin-Transistor-Strukturen mit Permalloy-„Source“- und „Drain“-Kontakten. Drei davon sind verdrahtet. *Rechts:* Neun Spin-Ventile auf einer InAs/GaAs-Heterostruktur. Sie bestehen aus Permalloy-Paaren, wobei eines davon kontaktiert ist.



Links: Blick in die Magnetron-Sputtering-Kammer. Ein Argonplasma leuchtet über einem Permalloy-Target. *Mitte:* Magnetron-Sputtering-Anlage für Ferromagnete, Aluminium und Kupfer. *Rechts:* Symmetrische Landau-Magnetisierungsstruktur in Permalloy-Quadraten (obere Hälfte) und Veränderung dieser Struktur in einem externen Magnetfeld (untere Hälfte).

Die Forschungsgruppe Halbleiterphysik beschäftigt sich intensiv mit III-V-Halbleitersystemen für die Grundlagenforschung und für Anwendungen. Die Molekularstrahl-Epitaxie (Molecular Beam Epitaxy, MBE) ermöglicht das alternierende Wachstum von verschiedenen Schichten, beispielsweise von GaAs und AlGaAs, mit kontrollierter Dicke. Eine dünne GaAs-Schicht zwischen zwei AlGaAs-Schichten bildet eine Potentialvertiefung mit quantisierten Energieniveaus sowohl für Elektronen als auch für Löcher. In diesen Potentialvertiefungen können sich Elektronen innerhalb der Schichten noch frei bewegen und werden daher „zwei-dimensionale Elektronensysteme“ genannt (2DES). Das Ziel der Halbleitergruppe ist es, sich noch niedrigeren Dimensionen zu widmen und 1DES und 0DES zu realisieren.

Unter Nutzung hoch entwickelter Technologien ist es möglich, sehr schmale Quantendrähte mit einer Breite unter 100 nm herzustellen. Hier können sich die Elektronen nur in einer Richtung frei bewegen. Schließlich können auch Quantenpunkte präpariert werden, in denen die Elektronen vollständig in allen drei Raumdimensionen quantisiert werden, was zu diskreten Energien führt, analog zu atomaren Energieniveaus. Unter Ausnutzung der sogenannten Coulomb-Blockade können wir den Transfer von einzelnen Elektronen in den Quantenpunkt genau kontrollieren. Dies ermöglicht es uns, eine Art Atomspektroskopie an diesen künstlich erzeugten Atomen durchzuführen. Der interessanteste Aspekt dieser

Halbleiter-Mikrostrukturen ist die Möglichkeit, die physikalischen Eigenschaften der Bauelemente durch die Präparation maßzuschneidern und sie durch externe elektrische und magnetische Felder zu kontrollieren. Auf diese Weise kann man sehr spezielle Systeme herstellen und verschiedene Arten der Wechselwirkung zwischen Elektronen sowie neue physikalische Phänomene untersuchen. In den letzten Jahren haben wir unsere Forschung auf magnetische Halbleiter und metallische ferromagnetische Nanostrukturen ausgedehnt. Die Kombination von Halbleitern und Ferromagneten öffnet das Feld der „Spintronik“, das heißt die direkte Kontrolle des Spins in elektronischen Bauelementen.

Ein wesentlicher Aspekt ist, dass sowohl die Präparation als auch die Experimente innerhalb der Gruppe durchgeführt werden können. Wenn möglich, wird eine Probe vom selben Diplomanden oder Doktoranden präpariert und experimentell untersucht. Die unmittelbare Rückkopplung zwischen Präparation und Experiment ermöglicht die Optimierung dieser neuartigen nanostrukturierten Systeme, welche die vorderste Front der modernen Halbleiter-Forschung darstellen. Die lateralen Nanostrukturen werden ausgehend von AlGaAs- oder InAs-Heterostrukturscheiben präpariert. Wir stellen Masken mit Elektronenstrahl-, AFM- oder holographischer Lithographie her. Letztere Methode ermöglicht es, große Felder von bis

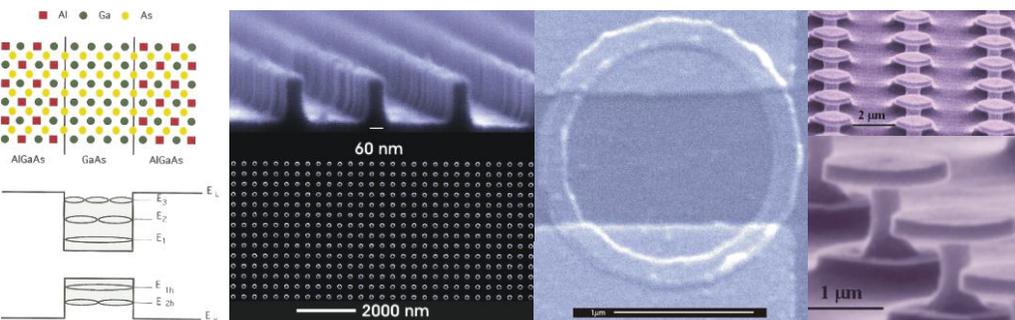
zu 10.000 Quantendrähten oder 100 Millionen Quantenpunkten mit exzellenter Homogenität zu realisieren. Die Maskenvorlage kann mit Hilfe von Ätzverfahren in die Halbleiter übertragen werden. Schnelle Fourier-Spektrometer decken den Frequenzbereich vom Ferninfrarot- (FIR) bis zum sichtbaren Spektralbereich ab. Durch FIR-Spektroskopie können die Energieniveaus in Quantensystemen direkt gemessen werden. Des Weiteren haben wir die hochsensible Technik der FIR-Photoleitfähigkeit eingeführt, die uns ermöglicht, kombinierte Spin-Zyklotron-Resonanzen zu untersuchen und die Spin-Zustandsdichte abzubilden. Ein ergänzendes Experiment ist die Raman-Spektroskopie. Andere wichtige Messverfahren sind die statische und die zeitaufgelöste Photolumineszenz (PL). Für dotierte Systeme erhalten wir Informationen über die Zustandsdichte und können somit geladene Exzitonen untersuchen. Ein Mikro-PL-System ermöglicht die Spektroskopie einzelner Quantenpunkte. Wir untersuchen auch den Transport und die Magnetisierung in halbleitenden, supraleitenden und ferromagnetischen Nanostrukturen. Ferner haben wir mikromechanische Cantilever-Magnetometer entwickelt, um die magnetischen Eigenschaften von niedrigdimensionalen Elektronensystemen mit hoher Sensitivität zu studieren. Die Dynamik in ferromagnetischen Nanostrukturen wird im Frequenzbereich bis 80 GHz und im Zeitbereich bis hinab zu Pikosekunden untersucht.

Halbleitende Nanostrukturen haben großes Potential für neuartige Bauelemente, welche die maßgeschneiderten und einstellbaren Energieniveaus und die spezielle Form der elektronischen Zustandsdichte in 1D- und 0D-Systemen nutzen. Elektrooptische Bauelemente, wie zum Beispiel Laser, die auf Quantenpunktstrukturen basieren, sind bereits in Gebrauch und eröffnen vielversprechende Anwendungen in der Zukunft. Unsere FIR-Photoleitfähigkeits-Messungen und unsere Forschungsarbeiten zur Spin-Bahn-Wechselwirkung sind wichtig für das neue Feld der „Spinelektronik“. Die Photoleitfähigkeit von Quanten-Hall-Zuständen sowie von Quantendrähten und -punkten sind die Basis für infrarote Photodetektoren. Die Untersuchung von Nanomagneten und ihrer Dynamik ist sehr wichtig für neuartige, nichtflüchtige magnetische Datenspeicher und ultraschnelle Archivierung.

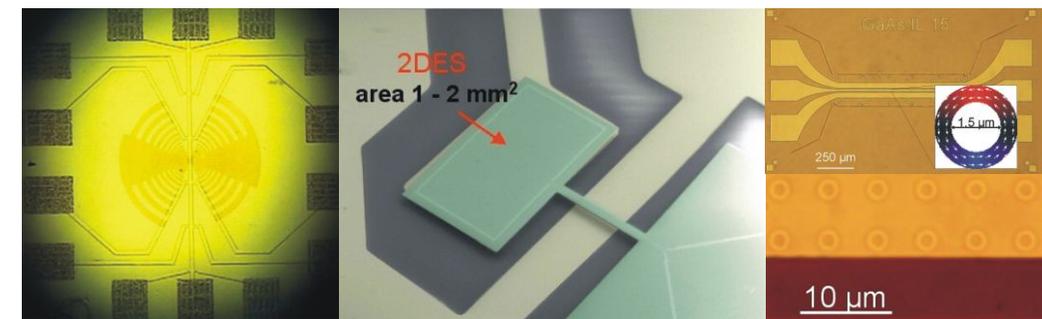
Kontakt:

Prof. Dr. Detlef Heitmann
Universität Hamburg
Institut für Angewandte Physik
FG Halbleiterphysik
Jungiusstr. 11
20355 Hamburg

Tel.: (040) 4 28 38 - 5672
heitmann@physik.uni-hamburg.de
www.physnet.uni-hamburg.de/iap/group_h/



Links: Ein AlGaAs-GaAs-AlGaAs Schichtsystem quantisiert die Energieniveaus der Elektronen und Löcher. Innen links: Quantendrähte und -punkte präpariert mittels holographischer Lithographie und Trockenätzverfahren. Innen rechts: Ferromagnetischer Ring mit Kontakten. Rechts: GaAs-Mikroscheiben, die auf dünnen Säulen stehen, zeigen optisch gepumptes Laserverhalten.



Links: Antennenstruktur zur Fokussierung von Ferninfrarotlicht auf einen einzelnen Quantendraht für Photoströmspektroskopie-Messungen. Mitte: Mikromechanischer Cantilever mit integriertem 2D-Elektronensystem, getragen von einem 5 μm dünnen und 100 μm breiten Steg. Rechts: Koplanarer Wellenleiter, der ferromagnetische Nanoringe für die Untersuchung der Magnetisierungsdynamik enthält.

Die aktuelle Informations- und Datenverarbeitungstechnologie basiert auf Halbleitern. Diese Materialklasse zeichnet sich dadurch aus, dass durch gezielt eingebrachte Fremdatome, die sogenannte Dotierung, die elektrischen und durch die Wahl der Zusammensetzung auch die optischen Eigenschaften in einem weiten Bereich maßgeschneidert werden können. Die Halbleiterepitaxie bietet die Möglichkeit, Vielschichtstrukturen aus nur wenigen Nanometer dünnen Halbleiterschichten unterschiedlicher Dotierung und Zusammensetzung zu komponieren. Derartige Schichtstrukturen, sogenannte Heterostrukturen, erweitern die Möglichkeiten der Abstimmung und Optimierung für spezielle Anwendungen, wie zum Beispiel für optische Bauelemente und für Bauelemente mit sehr hohen Grenzfrequenzen bzw. geringem Leistungsbedarf. In der Forschungsgruppe „Epitaktische Nanostrukturen“ werden derartige Heterostrukturen hergestellt und ihre elektronischen Eigenschaften studiert.

Das verwendete Verfahren zur Deposition von einkristallinen Heteroschichten ist die Molekularstrahlepitaxie (Molecular Beam

Epitaxy, MBE). In diesem Verfahren werden bei extrem niedrigem Hintergrunddruck im Bereich von 10^{-12} mbar Molekular Dampfstrahlen auf ein beheiztes Substrat gerichtet. Unter sehr genau kontrollierten Bedingungen wachsen einkristalline Halbleiterschichten auf dem Substrat, deren Zusammensetzung und Dicke mit atomarer Präzision anhand des relativen Drucks im Molekular Dampfstrahl eingestellt werden können. Dieses Verfahren bietet beste Kontrollmöglichkeiten über die Schichtqualität während des Schichtwachstums durch Elektronenbeugung oder optische Methoden. Weiterhin können mit diesem Verfahren die reinsten Schichten hergestellt werden, wie sie zum Beispiel in der Grundlagenforschung benötigt werden.

In den beiden Wachstumskammern der Forschungsgruppe werden ausschließlich Verbindungshalbleiter der III-V-Materialklasse auf GaAs- oder InP-Substraten hergestellt, weil diese Materialklasse insbesondere für optische Bauelemente und in der Grundlagenforschung herausragende Bedeutung hat. Der zentrale Aspekt der Forschungsaktivitäten ist die Herstellung und Untersuchung von Halbleiternanostrukturen,

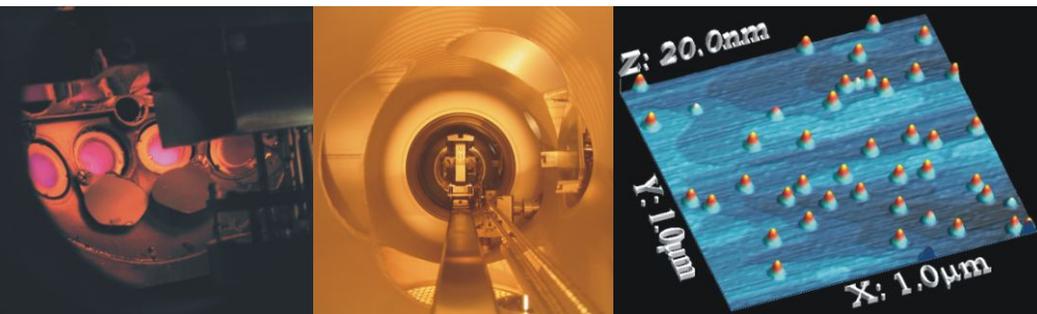
deren elektronische Eigenschaften wesentlich von Quanteneffekten bestimmt werden. Relativ einfach ist dabei die Kontrolle der nur wenige Nanometer betragenden Dicke von Heteroschichten. Elektronen in derart dünnen Halbleiterschichten sind Quanteneffekten unterworfen, die sehr gut bekannt und bereits in Halbleiterlasern ausgenutzt werden. In der Arbeitsgruppe werden derzeit Verfahren erforscht, die Schichten in der Schichtebene weiter zu strukturieren. Die Strukturierung von Schichten zu wenige Nanometer breiten Streifen, sogenannten Quantendrähten, oder zu Quantenpunkten eröffnet weitere Freiheitsgrade für die Kontrolle maßgeschneiderter Bauelementeigenschaften. Für die Strukturierung in der Schichtebene können bewährte Methoden der Halbleitertechnologie unter Verwendung von lithographischen Masken eingesetzt werden. In der Arbeitsgruppe werden aber auch neuartige Verfahren erforscht, die mit der Molekularstrahlepitaxie kompatibel sind. So werden beispielsweise durch Ausnutzen "natürlicher", selbstorganisierter Wachstumsmechanismen Quantenpunkte mit exzellenten optischen Eigenschaften hergestellt. Im Fall von Quantenpunkten kann man ein

Periodensystem künstlicher "Atome" schaffen. Die Eigenschaften derartiger Quantenstrukturen sind für die Grundlagenforschung von großem Interesse, da sie als Modellsysteme für die Erforschung dimensionsabhängiger Eigenschaften dienen. Die elektronischen Eigenschaften der Quantenstrukturen werden von uns mit diversen Methoden wie zum Beispiel temperaturabhängigen Magnetowiderstands- und Hallmessungen, Kapazitäts-Spannungs-Profilung und transients Kapazitätsspektroskopie untersucht.

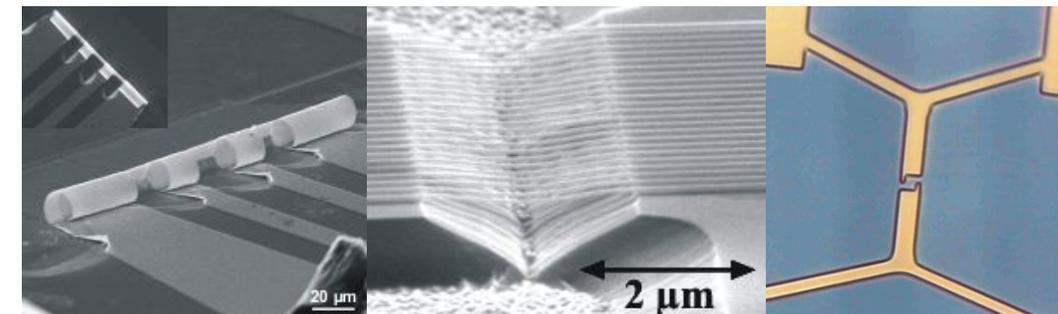
Kontakt:

Prof. Dr. Wolfgang Hansen
Universität Hamburg
Institut für Angewandte Physik
FG Epitaktische Nanostrukturen
Jungiusstr. 11
20355 Hamburg

Tel.: (040) 4 28 38 - 3267
hansen@physnet.uni-hamburg.de
www.physnet.uni-hamburg.de/institute/IAP/
Group_W/



Links: Blick in eine MBE-Wachstumskammer. Gut sichtbar sind die glühenden Tiegel in den Heizöfen, die das elementare Epitaxiematerial enthalten. Mitte: Blick in eine UHV-Transferkammer des MBE-Clusters. Sie enthält ein Transportsystem, um Proben von einer Kammer des Clusters in eine andere transportieren zu können. Rechts: AFM-Bild von MBE-gewachsenen selbstorganisierten InAs-Quantenpunkten auf einer GaAs(100) Kristalloberfläche.



Links: Hellgraue Streifen sind Metallflächen, die elektrische Kontakte an das Elektronensystem heranführen. Mitte: Freistehende Drahtbrücken, die Gateelektroden eines Bauelementes für hochempfindliche Kapazitätsmessungen kontaktieren. Rechts: GalnAs-Heterostrukturbauelement, das ein Elektronenbillard mit $1 \mu\text{m}$ Durchmesser zwischen zwei zweidimensionalen Elektronensystemen enthält.

„Magnetism goes Nano“, dieser Titel einer *Ferienschule* charakterisiert *knapp und präzise* den Trend der Forschung auf dem Gebiet des Magnetismus. Um die magnetischen Speicherdichten deutlich zu erhöhen, müssen neue Wege beschritten werden. Die Konzepte basieren darauf, dass die neuen Speicher aus vielen Nanomagneten aufgebaut sind, wobei ein Bit einer einzelnen Nanostruktur zugeordnet wird. Dadurch vermeidet man, dass Domänen und Domänenwände entstehen. Letztere beschränken in kontinuierlichen Medien die maximal erreichbare Speicherdichte. Zukünftig soll der Magnetisierungszustand von mehrlagigen Nanostrukturen mittels Widerstandsmessungen ausgelesen werden. Dieses neueste Speicherkonzept mit hohem technologischem Potential ist als *magnetic random access memory (MRAM)* bekannt.

Die neuen Konzepte für magnetische Speichermedien, die auf nanoskaligen Magneten beruhen, setzen heute die

Maßstäbe in den Forschungs- und Entwicklungslabors. Es bedarf Herstellungsmethoden und Analyseverfahren mit entsprechender lateraler Auflösung, um Forschung auf diesem Arbeitsfeld betreiben zu können.

Die Forschungsgruppe Grenz- und Oberflächenphysik beschäftigt sich mit der Herstellung und Untersuchung von Nanomagneten, basierend auf ultradünnen Schichtsystemen. Ultradünne Filme und/oder Vielfachschichten bieten die Möglichkeit, über Wachstumsmanipulation magnetische Eigenschaften in weitem Rahmen zu bestimmen.

Zur Herstellung und Analyse werden spezielle lateral hochauflösende Techniken in der Forschergruppe entwickelt und benutzt. In den letzten Jahren wurde ein neues Mikroskop zur hochauflösenden Abbildung magnetischer Strukturen aufgebaut. Dieses besteht aus einem Rasterelektronenmikroskop (SEM), das mit einer Spinpolarisationsanalyse kombiniert ist (auch SEMPA

genannt). Damit können mit einer lateralen Auflösung von < 10 nm magnetische Feinstrukturen in Ferromagneten abgebildet werden. Der Vorteil dieser Technik liegt darin, dass die lokale Magnetisierung der Probe direkt abgebildet wird. In den letzten Jahren wurden präparative Prozesse entwickelt, die es heute möglich machen, die Methode zur Analyse von beliebigen Ferromagneten verwenden zu können.

Das Mikroskop ist zusätzlich mit einem Auger-Analysator ausgerüstet, der eine chemische Analyse mit hoher lateraler Auflösung erlaubt. Diese als Scanning Auger Microscopy (SAM) bekannte Technik erfasst jedoch ausschließlich die Bereiche nahe der Oberfläche (Informationstiefe von wenigen Atomlagen).

Die Strukturierung auf einer Skala von wenigen 10 Nanometern erfolgt mittels eines hochfokussierten Ionenstrahls (Focused Ion Beam, FIB). Durch Beschuss mit Ionen kann mit diesem Gerät lokal Material abgetragen werden. Strukturen und Formen werden

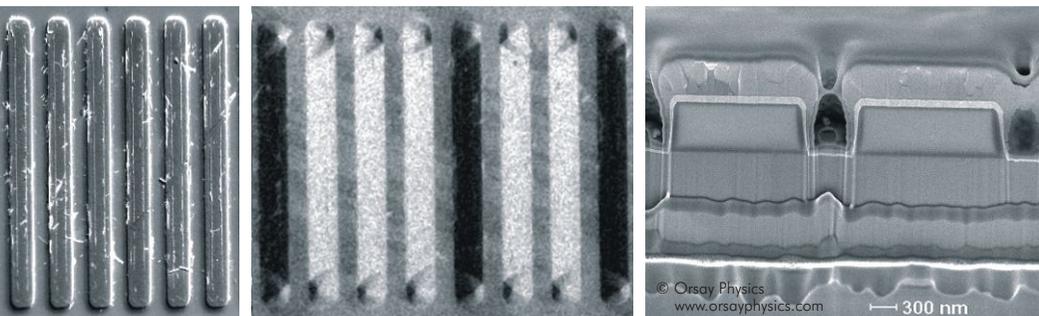
ähnlich wie beim Fräsen in Oberflächen oder Filme eingätzt. Die Stärke bzw. die Tiefe des Materialabtrags wird durch die Ionendosis festgelegt und erlaubt damit in gewissen Grenzen eine dreidimensionale Strukturierung.

Die Kombination dieser Herstellungstechnik mit den oben beschriebenen Analysemethoden gestattet eine kontrollierte Bearbeitung unterschiedlichster Materialien und Materialkombinationen.

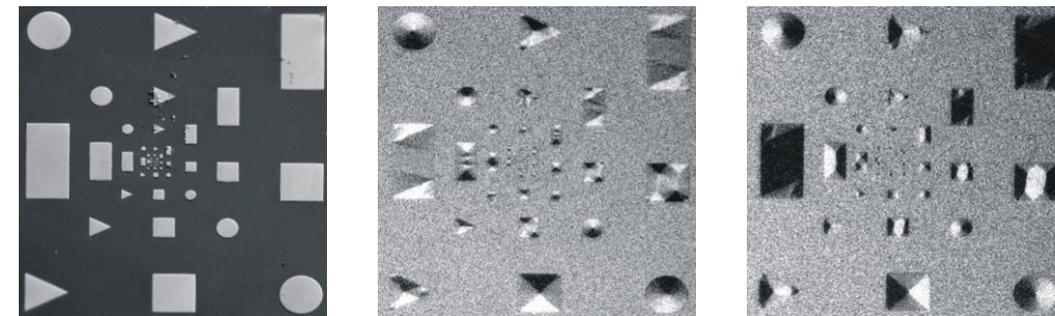
Kontakt:

Prof. Dr. Hans Peter Oepen
Universität Hamburg
Institut für Angewandte Physik
FG Grenz- und Oberflächenphysik
Jungiusstr. 11
20355 Hamburg

Tel.: (040) 4 28 38 - 2030
oepen@physik.uni-hamburg.de
www.physnet.uni-hamburg.de/iap/
group_g/



Links: SEM- und SEMPA-Aufnahme von Permalloy-Strukturen auf Siliziumdioxid. Das Bild entspricht einer konventionellen Rasterelektronenmikroskopie-Aufnahme. *Mitte:* Das Bild zeigt die Magnetisierungsverteilung des gleichen Probenausschnitt wie im linken Bild. Weiss/schwarz bedeutet, dass die Magnetisierung nach oben/unten zeigt. *Rechts:* SEM-Aufnahme eines Querschnitts durch eine integrierte Schaltung. Der Schnitt wurde mittels FIB erzeugt.



Topographie (*links*) und Domänenmuster (*mitte und rechts*) in Permalloy-Mikrostrukturen, aufgenommen mit SEMPA. Die Domänenbilder zeigen die Magnetisierungsverteilung in zwei senkrechten Polarisierungskomponenten. Alle drei Bilder wurden gleichzeitig aufgenommen. Die Permalloy-Strukturen sind 50 nm dick und wurden auf oxidiertem Silizium gewachsen.



Wie erreichen Sie uns?

Mit dem Flugzeug

Nehmen Sie am Flughafen den Bus 110 nach Ohlsdorf, von dort aus weiter mit der U-Bahn U1 in Richtung Großhansdorf bis Haltestelle Stephansplatz. Von der Haltestelle Stephansplatz benötigen Sie zu Fuß ca. 10 Minuten bis zum Zentrum für Mikrostrukturforschung. Insgesamt ist das ein Weg von ca. 45 Minuten.
Ein Taxi vom Flughafen zur Jungiusstraße kostet ungefähr 20 €.

Mit der Bahn

Fahren Sie mit der Bahn bis zum Bahnhof Hamburg-Dammtor. Vom Dammtor benötigen Sie zu Fuß ca. 10 Minuten bis zum Zentrum für Mikrostrukturforschung.

Mit dem PKW

Folgen Sie der Ausschilderung Messe und CCH. Ein paar wenige Parkplätze befinden sich auf den

Straßen: Jungiusstraße, Bei den Kirchhöfen und St. Petersburger Straße. Weitere Parkmöglichkeiten finden Sie in der Tiefgarage des CCH.

Weitere öffentliche Verkehrsmittel

Die folgenden Haltestellen sind vom Zentrum für Mikrostrukturforschung innerhalb von 10 Minuten erreichbar:

- S-Bahn: Bahnhof Dammtor - S11 / S21 / S31
- U-Bahn: Stephansplatz - U1, Gänsemarkt oder Messehallen - U2
- Bus: Hamburg Messe, Eingang Ost - Linie 35, Sievekingplatz - Linie 3, Stephansplatz - Linie 4 / 5 / 109 / 112

Wir danken unseren Geldgebern und Sponsoren:



Freie und Hansestadt Hamburg



Bundesministerium für Bildung und Forschung

Bundesministerium für Bildung und Forschung

Deutsche Forschungsgemeinschaft

Deutsche Forschungsgemeinschaft DFG



VolkswagenStiftung

Volkswagen Stiftung



Europäische Union

German-Israeli Foundation



New Energy and Industrial Technology Development Organization



Beiersdorf

Beiersdorf AG

Herausgeber: Kompetenzzentrum HanseNanoTec
Jungiusstr. 11, 20355 Hamburg

Redaktion: Prof. Dr. Roland Wiesendanger
Konzept & Design: Dipl.-Chem. Heiko Fuchs