

Fakultät für

Physik

Department of Physics

Universität Regensburg



Vorwort
Schalten mit kohärenten Spinstrukturen <i>Christian Back, Dieter Weiss, Joe Zweck</i>
Quanteninterferenz von Elektronen in Nanostrukturen <i>Christoph Strunk</i>
Rasterkraft- und Rastertunnelmikroskopie <i>Franz J. Gießibl, Jascha Repp</i>
Halbleiter-Nanostrukturen (Herstellung-Charakterisierung-Anwendungen) <i>Werner Wegscheider</i>
Kurzzeitspektroskopie an Halbleiter-Heterostrukturen <i>Christian Schüller</i>
Terahertz-Physik <i>Sergey Ganichev</i>
Lineare und nichtlineare zeitaufgelöste optische Spektroskopie <i>Alfons Penzkofer</i>
Quantentransport und Spintronik <i>Milena Grifoni, John Schliemann</i>
Komplexe Quantensysteme und Spinelektronik <i>Klaus Richter, Jaroslav Fabian</i>
Quantenchromodynamik - die Theorie der Quarks und Gluonen <i>Gunnar Bali, Vladimir Braun, Andreas Schäfer, Tilo Wettig</i>
Physikdidaktik <i>Josef Reisinger</i>
Mechanikwerkstatt <i>Norbert Sommer, Johann Deinhart</i>

1	Preface
2	Switching with Coherent Spin Structures <i>Christian Back, Dieter Weiss, Joe Zweck</i>
5	Quantum Interference of Electrons in Nanostructures <i>Christoph Strunk</i>
6	Atomic Force Microscopy and Scanning Tunneling Microscopy <i>Franz J. Gießibl, Jascha Repp</i>
8	Semiconductor-Nanostructures (Epitaxy-Characterization-Application) <i>Werner Wegscheider</i>
9	Time-Resolved Spectroscopy of Semiconductor Heterostructures <i>Christian Schüller</i>
10	Terahertz-Physics <i>Sergey Ganichev</i>
11	Linear and Nonlinear Optical Time-resolved Spectroscopy <i>Alfons Penzkofer</i>
12	Quantum Transport and Spintronics <i>Milena Grifoni, John Schliemann</i>
14	Complex Quantum Systems and Spin Electronics <i>Klaus Richter, Jaroslav Fabian</i>
16	Quantum Chromodynamics - The Theory of Quarks und Gluons <i>Gunnar Bali, Vladimir Braun, Andreas Schäfer, Tilo Wettig</i>
18	Didactics of Physics <i>Josef Reisinger</i>
20	Mechanical Workshop <i>Norbert Sommer, Johann Deinhart</i>

Die Naturwissenschaftliche Fakultät II - Physik

Die Naturwissenschaftliche Fakultät II -- Physik nahm im Wintersemester 1970/71 den Lehr- und Forschungsbetrieb an der Universität Regensburg auf. Mittlerweile sind 22 Professorinnen und Professoren und acht Privatdozenten an der Fakultät tätig und bilden rund 500 Studierende im Diplomstudiengang und etwa 350 für das Lehramt an staatlichen Schulen aus. Im Zuge der europäischen Standardisierung wird zum Wintersemester 2007/08 der Diplomstudiengang auf Bachelor-/Master umgestellt. Weitere zusätzliche neue Master-Studiengänge („Master of Computational Science“, „Master of Nano Science“), die das wissenschaftliche Profil der Fakultät stärker in die Lehre abbilden sollen, sind in Planung. Besonders leistungsfähigen Studierenden steht nach dem 3. Semester die Aufnahme in einen Hochbegabtenstudiengang mit integriertem Doktorandenkolleg im 'Elitenetzwerk Bayern' offen, deren Mitglieder mittels eines besonders zügigen Studiums in etwa sechs Jahren zur Promotion geführt werden. Die besonders gute Betreuung der Studierenden in den verschiedenen Studiengängen wurde mehrfach durch das Centrum für Hochschulentwicklung („CHE-Ranking“) ausgezeichnet.

Die Forschung der Arbeitsgruppen der Fakultät für Physik gruppiert sich um zwei Hauptgebiete, die Kondensierte Materie mit dem Schwerpunkt „Physik der Nanostrukturen / NanoScience“, sowie die theoretische Teilchenphysik mit dem Schwerpunkt auf „Quantenchromodynamik“. Die konsequente Schwerpunktbildung der letzten zehn Jahre und die damit erworbene Forschungsexpertise und internationale Reputation spiegeln sich in einer Vielzahl von drittmittelfinanzierten Verbundprojekten wider. Neben dem Regensburger Sonderforschungsbereich „Spinphänomene in reduzierten Dimensionen“ der Deutschen Forschungsgemeinschaft unterstreichen weitere gemeinsame Forschungsaktivitäten der Fakultät in der Forschergruppe „Gitter-Hadronen-Phänomenologie“, in den beiden interdisziplinär ausgelegten Graduiertenkollegs, „Nichtlinearität und Nichtgleichgewicht in kondensierter Materie“ und „Sensorische Photorezeptoren“, sowie die Regensburger Beteiligung am Sonderforschungsbereich „Festkörperbasierte Quanteninformationsverarbeitung“ die Forschungsstärke der Fakultät.

Etwa alle drei Jahre lädt die Fakultät für Physik zur Frühjahrstagung der Sektion Kondensierte Materie der Deutschen Physikalischen Gesellschaft (DPG) nach Regensburg ein. Mit 4000 - 5000 Teilnehmerinnen und Teilnehmern hat sich diese Konferenz inzwischen zur größten europäischen Physikertagung entwickelt.

Zahlreiche Kooperationen der Fakultät für Physik mit anderen Forschungseinrichtungen im In- und Ausland und der Industrie schaffen Synergieeffekte und gewährleisten den Transfer von

Know-How zwischen Hochschule und Wirtschaft. Dieser ermöglicht in einigen Feldern die Realisierung neuer Erkenntnisse physikalischer Grundlagenforschung. Stetig steigende Drittmittelannahmen der Fakultät basieren teilweise auf dieser fruchtbaren Zusammenarbeit. Regelmäßige Industrieexkursionen und Vortragsreihen, in denen Physikerinnen und Physiker aus der Industrie ihre Unternehmen und persönlichen Werdegänge darstellen, unterstützen die Absolventinnen und Absolventen in ihrer Berufswahl und erleichtern die erste Kontaktaufnahme mit der Wirtschaft.

Stadt und Universität

Die Naturwissenschaftliche Fakultät II - Physik gliedert sich als eine von vier naturwissenschaftlichen Fakultäten (Mathematik, Physik, Biologie, Chemie und Pharmazie) in die Universität Regensburg ein. 1962 im Landtag als vierte Volluniversität in Bayern beschlossen nahm die Universität zum Wintersemester 1967/68 mit drei Fakultäten den Lehrbetrieb auf. Inzwischen offerieren 12 Fakultäten auf dem Campus und das eingebundene Universitätsklinikum ein breites Spektrum an Studienfächern. Eine hervorragend ausgestattete Bibliothek stellt mehr als 3 Millionen Bände Studierenden und Lehrenden zur freien Verfügung. Darüber hinaus dienen in 33 Computerräumen mehr als 650 hochmoderne PCs Studierenden und Bediensteten der Universität Regensburg für Lehre und Studium.

Zahlreiche fakultätsübergreifende Angebote der Universität verhelfen den mehr als 17000 Nachwuchs-Akademikern über das Fachstudium hinaus zu zusätzlichen berufsrelevanten Kompetenzen: das Rechenzentrum der Universität bietet in enger Kooperation mit den Fakultäten ein qualifiziertes Kursangebot zur Vermittlung von Kenntnissen und Methoden der Informations- und Kommunikationstechnik an, das gerade von den Studierenden der Naturwissenschaften stark nachgefragt wird. Desweiteren ermöglicht das Zentrum für Sprache und Kommunikation nicht nur die Fortbildung in zahlreichen Fremdsprachen, sondern beispielsweise auch in Rhetorik und Moderation.

Neben den ausgezeichneten Studienbedingungen der Universität trägt auch die Stadt Regensburg zur Attraktivität des Studienstandortes bei. Als „Nördlichste Stadt Italiens“ bezaubert Regensburgs Flair Studierende wie Einheimische. Die wunderschöne Altstadt mit den Wahrzeichen der Steinernen Brücke und des Doms St. Peter wurde 2006 in die Welterbeliste der UNESCO aufgenommen. Ein vielseitiges kulturelles Angebot und die Ansiedlung zahlreicher Hightech-Unternehmen zeichnen die alte Römerstadt als lebendige Studentenstadt in einer aufstrebenden Wirtschaftsregion aus.

Schalten mit kohärenten Spinstrukturen

Prof. Dr. Christian Back, Prof. Dr. Dieter Weiss, Prof. Dr. Josef Zweck



Prof. Dr. Christian Back
Lehrstuhl für Magnetismus
und Magnetoelektronik

Kontakt:
Tel.: ++49 (0)941 943 2621
Email: christian.back
@physik.uni-regensburg.de

Einführung

Die Datenspeicherung mit Hilfe ferromagnetischer Schichten sowie das Auslesen magnetischer Information über den Riesenmagnetowiderstandseffekt oder den Tunnelmagnetowiderstandseffekt ist heute Stand der Technik. Letztere Effekte werden auch genutzt um nichtflüchtige Speichermedien zu realisieren. Diese Bauelemente benötigen für ihre Schaltfunktion ferromagnetische Kontakte mit Abmessungen im Submikrometerbereich. Die Entwicklung hin zu immer kleiner werdenden magnetischen Speichern und Schaltelementen mit extrem kurzen Schaltzeiten verlangt die Nutzung grundlegend neuer physikalischer Phänomene auf reduzierten Längen- und Zeitskalen. Bei weiterer Reduktion der Abmessungen bieten sich hier ferromagnetische Systeme mit kohärenter Spinstruktur wie Wirbel- oder Eindomänenstruktur an.

Magnetische Nanoscheiben : Wirbel statt Domänen

Magnetische Scheiben aus Permalloy (einer NiFe Legierung) zerfallen nicht mehr in unterschiedlich magnetisierte Domänen sondern weisen, abhängig von ihrer Größe, eine kohärente Ordnung

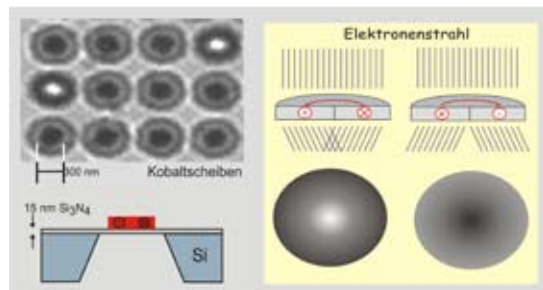


Abb. 1: Experimenteller Nachweis von 'in-plane' Magnetwirbeln in Kobalt Nanostrukturen mittel Lorentzmikroskopie. Die Scheiben, die auf einer 15 nm dünnen Membran mit Hilfe von Elektronenstrahl-lithographie und anderen Nanostrukturtechniken platziert wurden (siehe Bild unten links), werden von einem parallelen Elektronenstrahl in einem Transmissionselektronenmikroskop durchstrahlt. Im Falle eines magnetischen Wirbels wird der Elektronenstrahl, wie im rechten Bild gezeigt, aufgrund der Lorentzkraft so abgelenkt, dass – abhängig vom Drehsinn des Wirbels – ein heller oder dunkler Bereich im Zentrum der Abbildung entsteht. Diese Struktur findet sich im Experiment wieder und beweist die Existenz von 'in-plane' Wirbeln in Nanoscheiben.

der magnetischen Momente auf: Sie sind entlang konzentrischer Kreise, mit Nord- und Südpol in der Scheibenebene, angeordnet; nur im Zentrum der Scheibe stehen die magnetischen Momente senkrecht zur Scheibe. Dieser magnetische Grundzustand wurde in Regensburg - und unabhängig und gleichzeitig – von einer japanischen Gruppe gefunden. Die experimentelle Information über die Struktur der magnetischen Nanowirbel wurde mit Hilfe der Lorentzmikroskopie (siehe Abbildung 1)

und der Magnetkraftmikroskopie gewonnen. Um nun das magnetische Schalten individueller Nanoscheiben in einem von außen angelegten Magnetfeld im Experiment zu untersuchen bietet sich die Mikro-Hall-Magnetometrie an.

Miro-Hall-Magnetometrie: Scheiben und 'durchlöcherte' Scheiben

Das Prinzip der Mikro-Hall Magnetometrie ist in Abbildung 2 gezeigt. Mittels Nanostrukturierung wird die zu untersuchende Nanoscheibe auf ein Kreuz das unter der Oberfläche ein zweidimensionales Elektronengas enthält, platziert. Das magne-

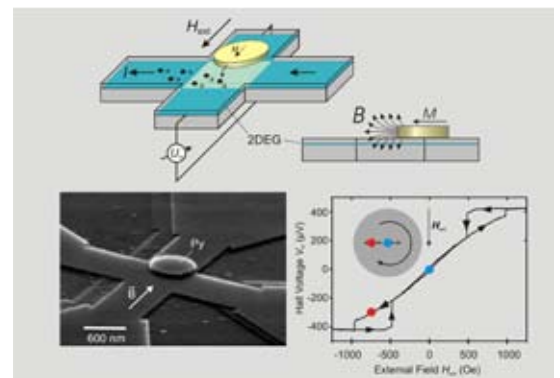


Abb. 2: Prinzip der Mikro-Hall-Magnetometrie. Das zu untersuchende Objekt (hier eine Scheibe) wird mittels Nanostrukturierung auf einer Kreuzstruktur, die unterhalb der Oberfläche ein zweidimensionales Elektronengas (2DEG) enthält, platziert. (Prinzipsskizze oben, elektronenmikroskopische Aufnahme unten links). Die von der ferromagnetischen Scheibe ausgehende, zum 2DEG senkrechte Komponente des magnetischen Streufeldes, wird über den Halleffekt elektrisch gemessen. Die Hallspannung – gemessen als Funktion des angelegten in-plane Magnetfeldes H_x (unten rechts) – spiegelt die Hysteresekurve einer individuellen Nanoscheibe wider.

tische Streufeld der Scheibe kann mittels des Hall-Effekts als Funktion des Magnetfeldes bestimmt werden. Als Ergebnis erhält man Hysteresekurven, die detaillierte Informationen über den Ummagnetisierungsvorgang liefern. Schaltvorgänge wurden für verschiedenen Scheibengrößen und verschiedene künstlich eingebrachte Defekte sowohl experimentell als auch theoretisch untersucht. Es zeigte sich, dass die Schaltfelder sehr präzise einstellbar sind und dass bei Einbringen mehrerer Defekte ein mehrwertiges Ausgangssignal erreicht werden kann.

Mikromagnetische Charakterisierung einzelner Nanoteilchen im Transmissionselektronenmikroskop

Da sowohl aus technologischen als auch aus physikalischen Gründen die untersuchten kohärenten Spinstrukturen kleiner als etwa $1\ \mu\text{m}$ sein müssen, ist es notwendig, Untersuchungsverfahren zu verwenden, die in diesen Größenbereichen aussagekräftige Messungen zulassen. Diese Messungen können mit Hilfe der Lorentz-Transmissionselektronenmikroskopie durchgeführt werden. Dabei wird einerseits ausgenutzt, dass ein Transmissionselektronenmikroskop in der Lage ist, kleine Teilchen mit hoher Vergrößerung und Auflösung abzubilden, andererseits übt die magnetische Probe auf die Strahlelektronen des Beleuchtungssystems eine ablenkende Kraft – die so genannte Lorentzkraft – aus. Die Stärke der Lorentzkraft hängt wiederum von der Stärke und Richtung der Probenmagnetisierung ab. Ein einfaches Beispiel hierzu ist in Abbildung 1 zu sehen: Die im Querschnitt gezeichneten Scheiben weisen magnetische Wirbel auf, die sich jedoch bezüglich ihres Drehsinns unterscheiden.

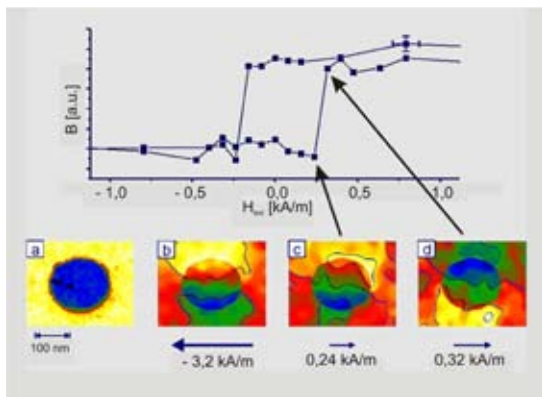


Abb. 3: In der oberen Bildhälfte wird die magnetische Induktion B (entspricht etwa dem Begriff der „Magnetisierung“) in Abhängigkeit von einem äußeren Magnetfeld dargestellt. Wichtig sind die sehr steilen Schaltflanken, die im rechten Ast der Hysteresekurve mit Pfeilen gekennzeichnet sind. Diese steilen Flanken zeigen, dass beim Umschaltvorgang des Teilchens keine Zwischenzustände eingenommen werden, es liegt also eindomäniges Schalten vor. In der unteren Bildhälfte ist in Teilbild a) die geometrische Struktur der untersuchten Proben gezeigt. Daneben werden elektronenstrahlholografisch gewonnene Bilder der gleichen Probe gezeigt, bei denen aus der Abfolge der unterschiedlichen Farben ersichtlich ist, dass die Induktion der Probe im Inneren der Probe stets homogen, also eindomänig ist. Die Teilbilder c) und d) unterscheiden sich durch die Abfolge der Farben. Hier schaltet das Teilchen komplett um und verursacht so die mit Pfeilen gekennzeichnete steile Flanke in der Hysteresekurve.

den. Dies führt dazu, dass ein parallel einfallender Elektronenstrahl nach den Proben entweder konvergent oder divergent aus der Probe austritt, was in einer kleinen Distanz unterhalb der Probe zu einer Erhöhung (hell) bzw. einer Verringerung (dunkel) der Elektronenintensität führt. So lässt sich aus entsprechenden Lorentzaufnahmen sehr einfach der Drehsinn der magnetischen Wirbel be-

stimmen. Mit der Methode des differentiellen Phasenkontrasts und der Elektronenstrahl-Holografie lassen sich mikromagnetische Strukturen detailliert abbilden, mit einem einfachen Rechenverfahren ist es sogar möglich, Hysteresekurven einzelner Partikel zu bestimmen. Dies ist in Abbildung 3 gezeigt: In der Hysteresekurve ist ein wohl definiertes Schaltfeld ersichtlich, bei dem das Teilchen die Magnetisierungsrichtung ändert. In der unteren Bildreihe ist ersichtlich, dass die Magnetisierungsverteilung innerhalb von Teilchen mit ca. $150\ \text{nm}$ Durchmesser direkt messbar ist. So ist ersichtlich, dass zwischen den mit c) und d) gekennzeichneten Messungen die Magnetisierung des Teilchens sich ohne Zwischenzustände schlagartig um 180° geändert hat.

Zeitaufgelöste Kerrmikroskopie: Die Dynamik des magnetischen Vortexzustands

Von großem Interesse ist das dynamische Schaltverhalten einfacher mikromagnetischer Strukturen. Diese prototypischen Strukturen sollen Aufschluss geben über die möglichen magnetischen Anregungen und das komplexe Schaltverhalten kleinster magnetischer Speicherzellen. Besonders interessant ist in diesem Zusammenhang die Möglichkeit, zwei stabile magnetische Zustände über die sogenannte Präzessionsbewegung der Magnetisierung zu schalten. Mittlerweile ist es im Labor möglich, Schaltprozesse auf kurzen Zeitskalen zu untersuchen. Grundlage hierfür ist die zeitaufgelöste magnetische Kerrmikroskopie. Der magneto-optische Kerr Effekt beschreibt die Wechselwirkung von Licht mit magnetischem Material. Wird ein polarisierter Laserstrahl an einer magnetischen Oberfläche reflektiert, so kann aus der Analyse der Drehung der Polarisationsrichtung des Lichts eine Aussage über den Magnetisierungszustand gewonnen werden. In der zeitaufgelösten Kerrmikroskopie werden gepulste Laserquellen auf magnetische Elemente fokussiert. Um magnetische Anregungen auf der Pikosekunden-Zeitskala zu untersuchen muss nun noch ein anregender magnetischer Feldpuls mit dem Abfrage-laserpuls synchronisiert werden. Dazu verwendet man einen Teil des Laserpulses, der einen optischen Schalter schließt und so in einem Mikrowellenleiter oder einer Mikropule einen Strompuls induziert, der am Ort der Probe einen Magnetfeldpuls hervorruft (siehe Abbildung 4). Die Zeitaufauflösung erhält man in diesem stroboskopischen Experiment durch die Verschiebung einer optischen Verzögerungsstrecke. Durch die Veränderung dieser Verzögerungsstrecke erhält man nun magnetische Filme mit einer räumlichen Auflösung von $300\ \text{nm}$ und einer Bildrate bis zu einer Pikosekunde (Abbildung 4). Die magnetische Scheibe in Abbildung 4 erhält sich ähnlich wie die Membran einer Trommel: Stört man den Grundzustand durch einen Pauken-

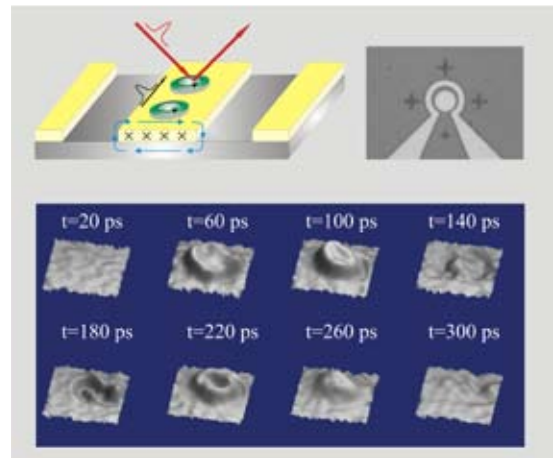


Prof. Dr. Josef Zweck

Kontakt:
Tel.: ++49 (0)941 943 2590
Email: josef.zweck
@physik.uni-regensburg.de

schlag, so bilden sich bei gewissen Frequenzen - also Tönen - Schwingungsmoden aus, die Eigenfrequenzen der Trommelmembran entsprechen. In zukünftigen Experimenten soll jetzt das Einfangen des Vortex in den strukturierten Defekten dynamisch untersucht werden.

Abb. 4: Zeitaufgelöste Kerrmikroskopie: Magnetische Scheiben mit Wirbelstruktur werden mit lithographischen Methoden auf einem Mikrowellenleiter platziert (oben links). Ein kurzer Strompuls (schwarz) erzeugt in der Ebene der Elemente einen kurzen Magnetfeldpuls, der die Magnetisierung angeregt (blau). Zeitverzögert fragt ein Laserpuls den Zustand der Magnetisierung an einem Ort auf der Probe ab (rot). Oben rechts ist eine mikroskopische Aufnahme einer magnetischen Scheibe in einer Mikrospele gezeigt. In dieser Spule ist der Feldpuls senkrecht zur Probenoberfläche ausgerichtet. Die Bildsequenz (unten) zeigt die Evolution der senkrechten Magnetisierungs-komponente einer Kobaltscheibe mit Vortexstruktur nach Anregung durch einen senkrechten Magnetfeldpuls als Film.



Prof. Dr. Dieter Weiss
Lehrstuhl für Physik der
Mikro- und Nanostrukturen

Kontakt:
Tel.: ++49 (0)941 943 3197
Email: dieter.weiss
@physik.uni-regensburg.de

Die Forschungsinteressen der Arbeitsgruppe Weiss liegen ganz allgemein auf dem Gebiet nanostrukturierter Halbleiter, Ferromagnete und Supraleiter.

Neben Transportuntersuchungen an niederdimensionalen elektronischen Systemen (Quanten-Hall-Systeme) liegt der Schwerpunkt derzeit auf dem Gebiet der Spintronik. Hier untersuchen wir z.B. spinabhängigen elektrischen Transport durch epitaktische gewachsene Eisen-GaAs Heterostrukturen. Eine hoch auflösende Transmissions-elektronenmikroskopieaufnahme in Abb. 5b zeigt die Atomreihen des GaAs und die Netzebenen eines unserer Fe/GaAs Einkristalle. Die typische Probengeometrie mit Fe/GaAs Grenzfläche, an der der Widerstand in Abhängigkeit von der Magnetisierungsrichtung des Eisens untersucht wird, ist

in der Abb. 5 a gezeigt. Ein anderes interessantes Forschungsthema sind ferromagnetische Halbleiter wie z.B. GaMnAs. Vor allem phasenkohärenter elektrischer Transport, der durch die Interferenz der Ladungsträger verursacht wird, ist derzeit ein hochaktuelles Thema. Eine entsprechende Probe mit 25 parallel geschalteten GaMnAs Drähten mit nur ~ 40 nm 'Dicke', an denen wir nach der sog. schwachen Lokalisierung suchen, ist in Abb. 6 gezeigt. Modernste Reinraumausrüstung sowie ein Tiefsttemperaturlabor, in dem Materie unter extremsten Bedingungen untersucht werden kann, erlauben Forschung auf internationalem Niveau. Unsere Arbeiten sind zum Großteil in den von der DFG geförderten Sonderforschungsbereich 'Spinphänomene in reduzierten Dimensionen' eingebunden.

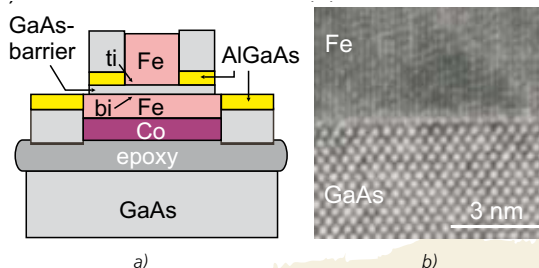


Abb. 5: (a) Schematische Probenstruktur zur Messung des Tunnelmagnetowiderstandes an Fe/GaAs/Fe/Co Schichtsystemen. Der Widerstand der durch diese Schicht gemessen wird, hängt von der relativen Ausrichtung der Magnetisierung in den beiden Eisenschichten ab. Von entscheidender Bedeutung ist hierbei die Qualität der Eisen/GaAs Grenzfläche. Die Transmissionselektronenmikroskopieaufnahme in (b) zeigt einen epitaktischen Fe/GaAs Übergang. Deutlich sind die Atomsäulen des GaAs sowie die vertikalen Netzebenen der Eisenschicht zu sehen. Der Übergang erfolgt innerhalb einer atomaren Lage.

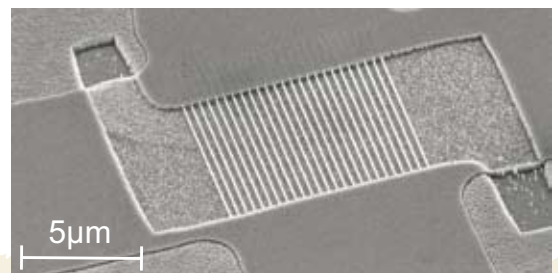


Abb. 6: Im Zentrum des Bildes sind 25 parallel geschaltete Nano-drähte zu sehen, die aus dem ferromagnetischen Halbleitermaterial GaMnAs mittels höchstauflösender Lithographieverfahren heraus präpariert wurden. Die Breite eines Drahtes beträgt nur etwa 40 Nanometer. In Transportmessungen, die bei wenigen tausendstel Grad über dem absoluten Nullpunkt durchgeführt werden, beobachtet man im Widerstand des ferromagnetischen Drahtarrays quantenmechanische Korrekturen zum Widerstand (die sog. „Schwache Lokalisierung“). Dieser Effekt gibt z.B. Aufschluss über die Strecken, welche die Ladungsträger in diesem Material ohne Verlust der Phaseninformation der quantenmechanischen Wellenfunktion zurücklegen können.

Quanteninterferenz von Elektronen in Nanostrukturen

Prof. Christoph Strunk

Die moderne Elektronik basiert überwiegend auf den Eigenschaften von Elektronen als klassische Teilchen. Die andere Seite der Elektronen – ihr Wellencharakter – ist bei Zimmertemperatur meist nicht zu beobachten, weil die Kohärenz der Elektronenwellen durch die thermische Bewegung des Kristallgitters gestört wird. Um die unbekannte Seite der Elektronen zu beobachten – und später einmal vielleicht auch nützlich zu machen – müssen Experimente bei so tiefen Temperaturen und in so kleinen Interferometern durchgeführt werden, dass die Phasenkohärenz-Zeit der Elektronen ausreicht, um das Interferometer ungestört zu durchlaufen.

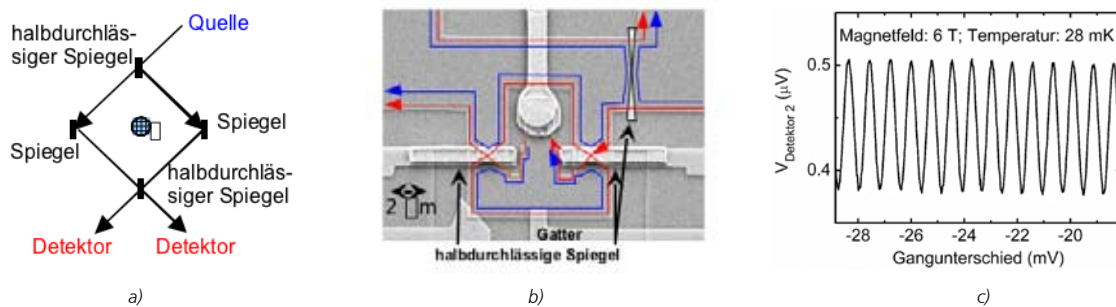


Abb. 1:
a) Schema eines elektronischen Mach-Zehnder Interferometers.
b) Elektronenmikroskopisches Bild einer GaAs/AlGaAs-Halbleiterstruktur, in der bei einem angelegten Magnetfeld von 6 Tesla zwei getrennte Randkanäle (Wellenleiter) existieren. Die halbdurchlässigen Spiegel wurden durch Quantenpunktkontakte realisiert sind, deren Transmissionswahrscheinlichkeit für den einen Randkanal (rot) auf 50% eingestellt wurde, während der andere vollständig reflektiert wird (blau).
c) Elektroneninterferogramm, bei dem der Gangunterschied zwischen den Elektronenwellen mittels einer Gatterelektrode (unten in b) verändert wurde. Die gemessene Detektorspannung ist eine Maß für den Strom in den nach links auslaufenden Randkanal (rot).

Interferometer in Halbleiter-Nanostrukturen

Mittels Halbleiter-Epitaxie hergestellte ultrareine Kristalle eignen sich besonders, um Elektronen-Interferometer herzustellen. Unser Ziel ist hier zunächst die Zweistrahl-Interferenz von Elektronen zu realisieren, deren Wellenlänge der Elektronen etwa 10-mal kürzer als die von Licht ist. Um Elektronen auf definierten Bahnen zu führen, sind Wellenleiter (analog den optischen Glasfaserkabeln) erforderlich. Eine besonders elegante Methode um solche Wellenleiter zu realisieren, ergibt sich in hohen Magnetfeldern, wo sich die Elektronen aufgrund der Lorentzkraft am Rand des Interferometers entlang laufen müssen, ohne gestreut werden zu können. Dies ist das Regime des Quanten-Halleffekts, das sich (unter anderem) dadurch auszeichnet, dass sich am Rand eines zwei-dimensionalen Elektronensystems Wellenleiter für Elektronen ausbilden, deren Zahl umgekehrt proportional zur Stärke des Magnetfeldes ist.

Elektroneninterferenzen in Supraleitern

Abbildung 2 zeigt ein weiteres Beispiel, bei dem die Interferenz in einem supraleitenden Ring stattfindet. Ähnlich wie in Atomen, sind nur bestimmte Ringströme möglich, die durch diskrete magnetische Quantenzahlen, nämlich die Zahl von magnetischen Flußquanten $\Phi_0 = h/2e$ im Ring beschrieben werden können. Das magnetische Moment des Rings wird über den klassischen Halleffekt in einem unter dem Ring liegenden Hallkrenz aus einer GaAs/AlGaAs Heterostruktur gemessen. Der Ring aus supraleitendem Niob hat einen Durchmesser von 10 μm und enthält eine



Prof. Dr. Christoph Strunk

Kontakt:
Tel.: ++49 (0)941 943 3199
Email: christoph.strunk
@physik.uni-regensburg.de

‘Schwachstelle’ aus normalleitenden Silber, die den kritischen Strom bestimmt. Solche Ringe lassen sich zwischen zwei Zuständen mit verschiedenen Zahlen von Flußquanten hin- und herschalten und daher auch als ‘Bits’ im Sinne der Informationstechnologie nutzbar. Insbesondere sind sie auch für Quanten-Bits geeignet, bei denen mit quantenmechanischen Überlagerungen von Zuständen mit verschiedenen Quantenzahlen gearbeitet wird.

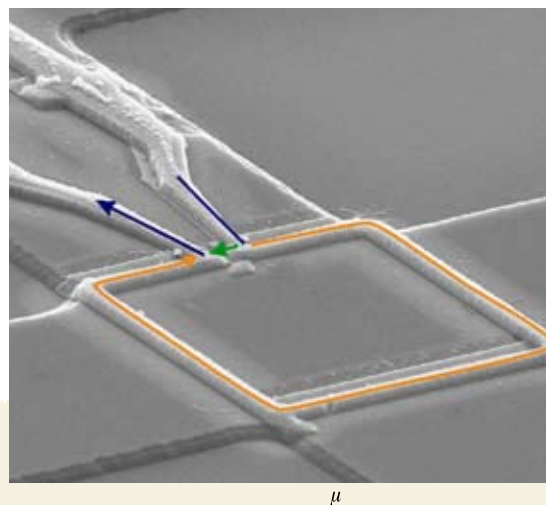


Abb. 2: Niobring (Durchmesser von 10 μm) mit einer 500 nm langen Mikrobrücke auf einer GaAs/AlGaAs-Heterostruktur als lokales Magnetometer.

Rasterkraft- und Rastertunnelmikroskopie

Prof. Dr. Franz J. Gießibl

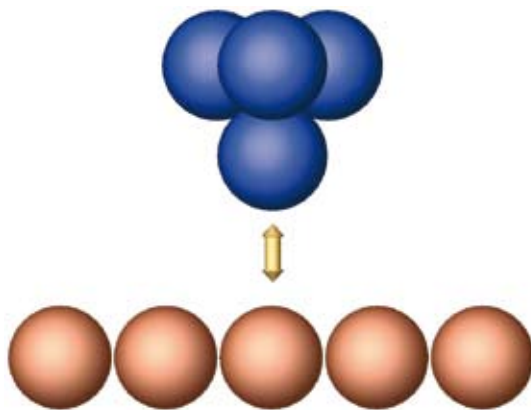


Prof. Dr. Franz J. Gießibl
Lehrstuhl für Experimentelle Nanophysik

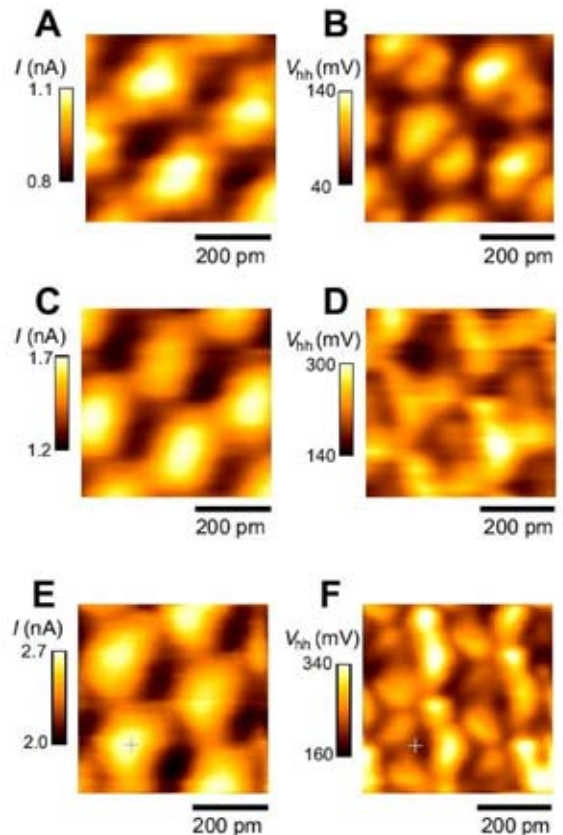
Kontakt:
Tel.: ++49 (0)941 943 2105
Email: franz.giessibl@physik.uni-regensburg.de

Die Erfolge im Verständnis der Physik des festen Körpers und die sich daraus ergebenden Anwendungen (wie z.B. Transistoren, integrierte Schaltkreise, Computer, Laser, Handys etc.) lassen sich zu einem großen Teil darauf zurückführen, dass Festkörper meist kristallin sind, sich also durch die quasi unendliche periodische Fortsetzung einer Elementarzelle aufbauen lassen. Trotzdem bestehen die Proben, an denen die Eigenschaften der Festkörper experimentell bestimmt werden meist aus sehr vielen (in der Größenordnung von 10^{23}) einzelnen Atomen. Durch die zunehmende Miniaturisierung von Bauelementen, aber auch durch das Interesse an den elektronischen und mechanischen Eigenschaften einzelner Moleküle ist ein experimenteller Zugang zur Welt einzelner Atome nötig. Dieser Zugang wird durch die Rastertunnel- und die Rasterkraftmikroskopie geschaffen.

Im Gegensatz zur optischen Mikroskopie oder zur Elektronenmikroskopie wird die Oberfläche im Falle der Rastersondenmikroskopie nicht durch Photonen oder Elektronen, sondern durch das Frontatom einer scharfen Spitze abgebildet, wie es im folgenden Bild gezeigt ist. Bei der Tun-



nelmikroskopie wird dabei der quantenmechanische Tunnelstrom, bei der Kraftmikroskopie die chemische Bindungskraft zwischen Spitze und Oberfläche gemessen. Die Tunnelmikroskopie war der Kraftmikroskopie lange Zeit in der Ortsauflösung überlegen. Dies hat sich mittlerweile geändert. Das nächste Bild (aus *Science* **305**, 380, 2004) zeigt simultan aufgenommene Tunnelstrom- (linke Spalte) und Kraftbilder (rechte Spalte), wobei eine Graphitoberfläche mit einer Wolframspitze abgebildet wurde. Die subatomaren Symmetrien im Kraftkanal kommen durch die Winkelabhängigkeit chemischer Kräfte zwischen dem Frontatom und der Oberfläche zu Stande. Der Tunnelstrom und die wirkende Kraft bilden komplementäre Informationen über die elektronische und chemische Struktur von Festkörpern auf atomarer Skala. Moderne Sensoren erlauben es, diese Informationen simultan zu gewinnen.



Ein Arbeitsgebiet des Lehrstuhls ist es, die Kraftsensorik weiter zu verbessern und Sensoren mit chemisch und kristallographisch definierten Spitzen herzustellen. Dazu werden Mikroskope für drei verschiedenen Umgebungen eingesetzt: Umgebungsbedingungen (also Raumtemperatur, Luft), Vakuum und Vakuum plus tiefe Temperaturen. Bisher wurden die höchsten Ortsauflösungen nur im Vakuum und bei tiefen Temperaturen erreicht. Deshalb wird am Lehrstuhl versucht, die dabei entwickelten Techniken auch bei Raumtemperatur in natürlicher Umgebung einzusetzen. Es befindet sich aber auch ein Mikroskop für Tieftemperatur-Vakuumanwendungen im Aufbau, und es bestehen Kooperationen mit der Universität Augsburg (Prof. Dr. Jochen Mannhart) und dem Tieftemperaturlabor der IBM Research Division am Almaden Research Center in Kalifornien (Dr. Andreas Heinrich und Mitarbeiter).

Die Arbeitsgruppe wurde im März 2007 durch die Berufung von Jascha Repp auf eine von der Volkswagenstiftung geförderte Lichtenberg-Professur ins Leben gerufen und befindet sich im Aufbau.

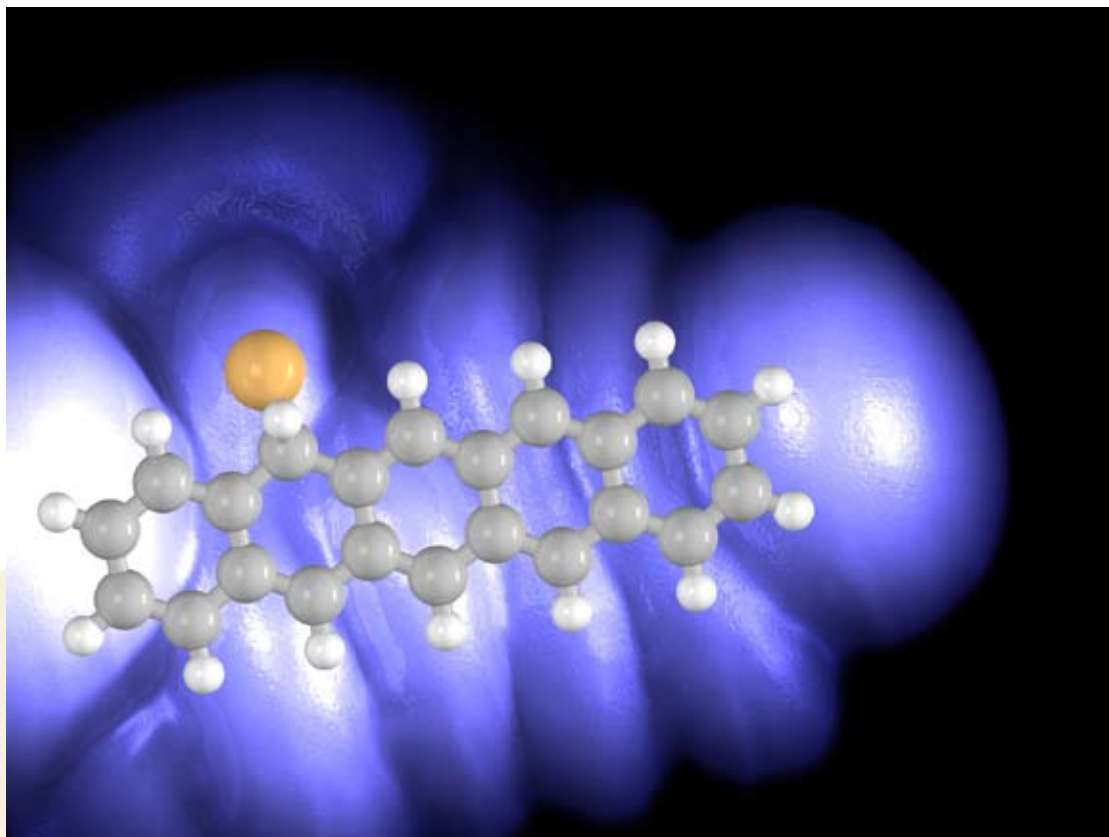
Ziel der Arbeitsgruppe ist es, die physikalischen und chemischen Eigenschaften einzelner Adsorbate und Adsorbatstrukturen auf Isolatoren auf atomarer Skala zu untersuchen. Dazu wird Tieftemperatur-Rastertunnelmikroskopie (RTM) angewendet, die in der Vergangenheit äußerst erfolgreich in Studien auf Metall- und Halbleiteroberflächen eingesetzt wurde. Ähnliche Studien auf Isolatoren gibt es noch wenige, diese sind aber sehr viel versprechend. Wichtig dabei ist, dass viele physikalische und chemische Eigenschaften auf Isolatoren nicht nur quantitativ sondern auch qualitativ anders sind als auf (halb-)leitenden Oberflächen. Daher ist es von äußerster Wichtigkeit für die Bereiche der Wissenschaft, die in den atomaren Längenbereich vorstoßen, Isolatormaterialien mit einzubeziehen. Neue experimentelle Möglichkeiten, die untersucht werden sollen, beinhalten zum Beispiel (meta-)stabile Umladungsprozesse einzelner Adsorbate und RTM-induzierte Einzelmolekülche-

mie auf Isolatoren. Außerdem sollen diese Studien neue Forschungsmöglichkeiten in der molekularen Elektronik eröffnen, da sie folgende zwei Elemente miteinander verbinden: Die elektronische Entkopplung durch den Isolator und die Möglichkeit der Rastertunnelmikroskopie, die Struktur eines Moleküls mitsamt seiner Umgebung auf atomarer Skala zu bestimmen, um dann diese einzelne, wohldefinierte Adsorbatstruktur elektronisch zu charakterisieren. Damit ist es möglich, den Elektronentransport durch einzelne Adsorbate sowie Adsorbatstrukturen in vielerlei Hinsicht zu studieren, wobei die atomistische Struktur einschließlich der Kontaktierung exakt bekannt ist. Es ist geplant, zwei Tieftemperatur-Rastertunnelmikroskope im Ultrahochvakuum aufzubauen. Zunächst soll eines aufgebaut werden, das bei 5 Kelvin arbeitet. In späteren Jahren soll ein zweites entstehen, das Messungen bei noch tieferen Temperaturen (0.3 Kelvin) und in einem starken Magnetfeld (ca. 14 Tesla) erlaubt.

Kooperationen existieren mit der experimentellen Arbeitsgruppe von Gerhard Meyer (IBM Zurich Research Laboratory) sowie bezüglich Theorie mit Mats Persson (University Liverpool) und seinen Mitarbeitern.



Prof. Dr. Jascha Repp
Kontakt:
Tel.: ++49 (0)941 943 4201
Email: jascha.repp@physik.uni-regensburg.de



Strukturmodell (Vordergrund) und gemessene Elektronenverteilung (Hintergrund) eines einzelnen Moleküls

Halbleiter-Nanostrukturen (Herstellung-Charakterisierung-Anwendungen)

Prof. Dr. Werner Wegscheider



Prof. Dr. Werner Wegscheider
Lehrstuhl für Halbleiter-
Nanostrukturen:
Herstellung - Charakterisie-
rung - Anwendung

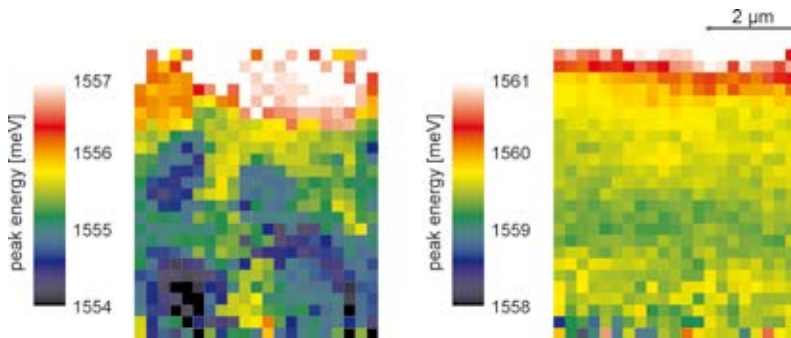
Kontakt:
Tel.: ++49 (0)941 943 2081
Email: werner.wegscheider
@physik.uni-regensburg.de

Epitaxie von Halbleiter-Heterostrukturen

Die Epitaxie von Halbleiter-Heterostrukturen ist eine der Kernkompetenzen am Lehrstuhl Wegscheider. Dabei liegt der Schwerpunkt auf der Molekularstrahl-Epitaxie (MBE) von III-V Halbleiter-Heterostrukturen und hier insbesondere von Materialien, die auf dem Materialsystem GaAs-AlGaAs basieren. Für die Epitaxie dieser Strukturen stehen zwei Wachstumskammern zur Verfügung, die über einen Ultra - Hoch - Vakuum - Transferkanal miteinander verbunden sind. Während eine der beiden Kammern speziell für das Wachstum höchst beweglicher Elektronen- und Lochsysteme ausgelegt ist, enthält die zweite Kammer zusätzlich eine Mn-Quelle, um ferromagnetische Halbleiter auf GaMnAs-Basis für Spintronik-Anwendungen herzustellen. Da in beiden MBE-Kammern auch in-situ erzeugte Spaltflächen überwachen werden können (Cleaved Edge Overgrowth, CEO),

ten – z.B. Ladungsträgerdichte und Beweglichkeit bei höchstbeweglichen Ladungsträgersystemen oder Schichtdicken und Schichtqualität bei Quantenfilmen, Quantendrähten oder Quantenpunkten für optische Experimente - der hergestellten Halbleiter-Heterostrukturen, ist damit auch die weitere Untersuchung physikalischer Fragestellungen möglich. Aktuell ist hierbei zur Zeit sowohl die Frage nach den Spin-Eigenschaften in den reduzierten Dimensionen dieser Materialien als auch deren Anwendungen in möglichen Bauteilen.

Neben der eigenen Forschung am Lehrstuhl, zu- meist gefördert durch die Einbindung in Forschungsverbünde (SFB 631, SFB 689, BMBF-, NanoQuit', DFG SPP 'Spintronik') werden auch viele, hochqualitative Schichtstrukturen als Ausgangsmaterialien für die Forschung anderer Arbeitsgruppen im nationalen und internationalen Umfeld hergestellt.



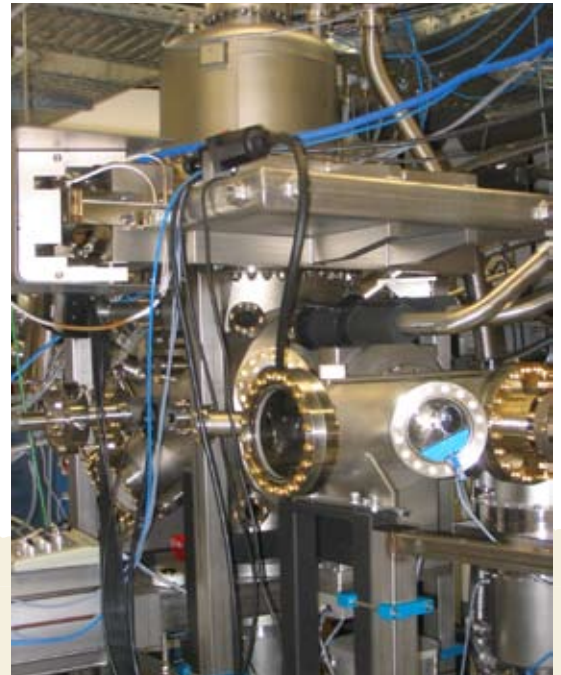
'Rauigkeitsskala' eines MBE-Quantenfilms aufgenommen mit konfokaler Mikroskopie und Spektroskopie: Farbkodiert aufgetragen ist die spektrale Lage der Photolumineszenzlinie eines Quantenfilms abhängig von der Position auf der Probe. Links ist eine starke Variation bedingt durch die Dickenfluktuation des Films zu erkennen. Ein Temperverfahren glättet die Schicht und verringert die Dickenfluktuation deutlich (rechts).

erlaubt diese Konfiguration, ein breites Spektrum an komplexen Heterostrukturen für Spintronik, Magnetotransport und Optik herzustellen:

- Höchstbewegliche 2dimensionale Elektronen- und Lochsysteme ($\mu > 10^7 \text{ cm}^2/\text{Vs}$, bzw. $\mu > 10^6 \text{ cm}^2/\text{Vs}$)
- Höchstbewegliche Elektronensysteme auf Spaltflächen
- Durch Überwachen von Spaltflächen definierte Quantendraht- und Quantenpunktstrukturen, z.B. für Laseranwendungen.
- Ferromagnetische GaMnAs Schichten in Kombination mit hochbeweglichen Ladungsträgersystemen und auf Spaltflächen
- Spintronik-Bauelemente

Forschung an epitaktisch gewachsenen Halbleiter-Nanostrukturen:

Am Lehrstuhl stehen Aufbauten sowohl für Magnetotransportmessungen in Feldern bis 16T und bei Temperaturen bis unter 350mK als auch für Lumineszenzexperimente mit einer Ortsauflösung besser als $0.9\mu\text{m}$ zur Verfügung. Neben einer raschen Bestimmung relevanter Eigenschaf-



Details aus dem MBE-Labor.
Oben: Eine der beiden Epitaxie-Kammern.
Unten: Einblick in den Transferkanal.



Detail aus dem MBE-Labor.
Probenmaterial zur weite-
ren Verarbeitung

Kurzzeitspektroskopie an Halbleiter-Heterostrukturen

Prof. Dr. Christian Schüller

Die seit Oktober 2004 bestehende Arbeitsgruppe von Christian Schüller untersucht die Spin- und Ladungsträgedynamik in Halbleiter-Heterostrukturen, die in der MBE am Lehrstuhl Wegscheider hergestellt werden. Ein Forschungsschwerpunkt, gefördert im Rahmen des DFG-Schwerpunkts 'Halbleiter-Spintronik', ist dabei die Spindynamik in hochbeweglichen 2D-Elektronen- und Lochsystemen. Zudem werden im Rahmen des Sonderforschungsbereichs 689 'Spinphänomene in reduzierten Dimensionen' Heterostrukturen aus nichtmagnetischen und ferromagnetischen III-V-Halbleitern untersucht.

Im Kurzzeitspektroskopie-Labor stehen dafür ein ^3He -Split-Coil-Kryostat (Basistemperatur 500 mK, Magnetfeld 11.5 T, optischer Zugang) und ein Mikroskop-Kryostat zur Verfügung. Die eingesetzten Messmethoden sind zeitaufgelöste Pump-Probe-Spektroskopie, zeitaufgelöste Faraday-Rotation, zeit-, orts- und polarisationsaufgelöste Photolumineszenz mit einem Streak-Kamerasystem sowie Kerr-Magnetometrie. Als Anregungs-



Prof. Dr. Christian Schüller

Kontakt:
Tel.: ++49 (0)941 943 2078
Email: christian.schueller
@physik.uni-regensburg.de

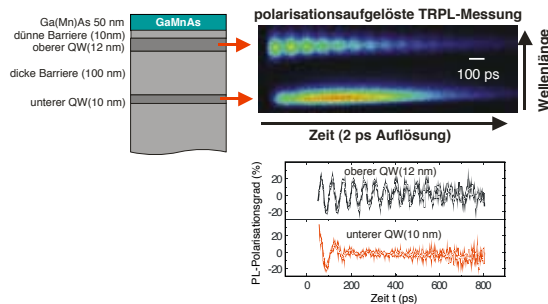


Bild 1: Zeit- und polarisationsaufgelöste Photolumineszenzmessung (PL) an einer Halbleiter-Heterostrukturprobe, durchgeführt mit dem Streakkamera-System. Die Probe besteht aus zwei nichtmagnetischen Quantentöpfen (engl. Quantum Well QW) und einer ferromagnetischen Ga(Mn)As-Deckschicht. In der bei 4 Kelvin in einem Magnetfeld von 6 Tesla in der Probenebene durchgeführten Messung ist anhand der Oszillation der PL-Intensität deutlich zu erkennen, dass die Spinlebensdauer im oberen QW in der Nähe der Ga(Mn)As-Schicht um den Faktor 3 erhöht ist.

quelle für die zeitaufgelöste Spektroskopie dient ein gepulster Titan-Saphir-Laser mit einer Pulsbreite von 500 fs.

Im (zur Zeit noch im Aufbau befindlichen) Raman-Labor werden elektronische Anregungen in Halbleiter-Heterostrukturen mittels resonanter Ramanstreuung untersucht, zusätzlich ist der Aufbau eines Systems für zeitaufgelöste Raman-Spektroskopie geplant. Für dieses Labor werden ein Mikroskop-Kryostat mit Magnetsystem, ein Triple-Raman-Spektrometer sowie CW- und ps-Titan-Saphir-Lasersysteme beschafft.



Bild 2: Schnappschuss im dunklen Kurzzeitspektroskopie-Labor. Im Vordergrund ist der ^3He -Kryostat zu erkennen, im Hintergrund sieht man das Spektrometer.

Terahertz-Physik

Prof. Dr. Sergey D. Ganichev



Prof. Dr. Sergey D. Ganichev

Kontakt:
Tel.: ++49 (0)941 943 2050
Email: sergey.ganichev
@physik.uni-regensburg.de

Der Schwerpunkt der wissenschaftlichen Aktivitäten der Arbeitsgruppe Ganichev liegt in der Terahertz (THz-) Forschung und -Technologie.

Der Terahertz-Frequenzbereich ist eines der vielversprechendsten Gebiete moderner Physik, das von großer Bedeutung für Festkörperphysik, Astrophysik, Plasmaphysik und viele andere Bereiche ist. Die wichtigsten Themen der Arbeitsgruppe Ganichev sind Grundlagen der Spintronik, Generation und Detektion sowie Modifikation von THz-Strahlung, Untersuchung von Tunnelphänomenen und nichtlineare optische Effekte in Festkörpern, Entwicklung neuer Methoden zur Materialforschung, bildgebende Verfahren für die Medizin und Untersuchung der Wechselwirkung von THz-Strahlung mit biologischen Substanzen.

Die Terahertz-Labors der Arbeitsgruppe um Prof. Ganichev ermöglichen experimentelle Untersuchungen in einem Spektralbereich, der sich vom nahen Infrarot bis zum fernen Infrarot inklusive des gesamten THz-Bereichs über drei Dekaden erstreckt. Die insgesamt acht Laser und spektroskopische Systeme stellen Strahlungsleistungen von sehr kleinen bis hin zu den weltweit stärksten Intensitäten, die bei der Festkörperspektroskopie Verwendung finden, zur Verfügung. Hohe Strahlungsintensitäten führen zu einer Vielfalt nichtlinearer Phänomene, deren Eigenschaften im Terahertz-Bereich sich grundsätzlich von denen im sichtbaren Spektralbereich und im Mikrowellenbereich, sowie von denen in statischen Feldern unterscheiden. Allgemein gesprochen sollen die Untersuchungen mit Terahertz-Hochanregung die Grenzen der derzeitigen Hochfrequenz-Elektronik

Unter den von der AG bearbeiteten Themen sind derzeit folgende Teilprojekte innerhalb verschiedener Programme, an denen deutschlandweit mehrere Forschergruppen arbeiten, besonders hervorzuheben:

- a) „Spinphänomene in reduzierten Dimensionen“, Sonderforschungsbereich der DFG, SFB 689/1
- b) „Nichtlinearität und Nichtgleichgewicht in kondensierter Materie“, Graduiertenkolleg der DFG, GK638



Eines der THz-Labors

Es existieren Kooperationen mit vielen wissen-



CO₂ Q-Switch MIR Laser

schaftlicher Arbeitsgruppen sowohl innerhalb der Fakultät, mit den AGs von D. Weiss, W. Wegscheider, C. Schüller, U. Röbler oder C. Back, als auch eine intensive internationale Zusammenarbeit mit z.B. A.F. Ioffe Institute, St. Petersburg, Russia; Walter Schottky Institut, Garching, Deutschland; Universität Linz, Österreich; Herriot Watt University, Edinburgh, UK; Universities of Surrey and Bath, UK; University of Berkley and University of Purdue, USA; Trinity College, Dublin, Ireland; Free Electron Laser FELIX, Netherlands; Technion, Haifa, Israel; Elektrotechnical Institute, Prag, Czech Republic; Tohoku University, Japan; Honkong University, China; etc.



Großlabor

bestimmen und neue physikalische Phänomene aufdecken, die zukünftige Elektronik bei Terahertz-Frequenzen möglich machen.

Lineare und nichtlineare zeitaufgelöste optische Spektroskopie

Prof. Dr. Alfons Penzkofer

Wir arbeiten auf Teilgebieten der Laserphysik, Lasertechnologie, Photophysik, Photochemie, und Photobiologie. Methoden der klassischen Optik, nichtlinearen Optik, Absorptions- und Emissionsspektroskopie und der Femtosekunden-Laserspektroskopie werden entwickelt und angewandt.

Photolumineszente Farbstoffe, elektrolumineszente Moleküle und konjugierte Polymere werden hinsichtlich ihrer Eignung als Festkörperlaser-Lasermaterialien und als Emittiermaterialien für

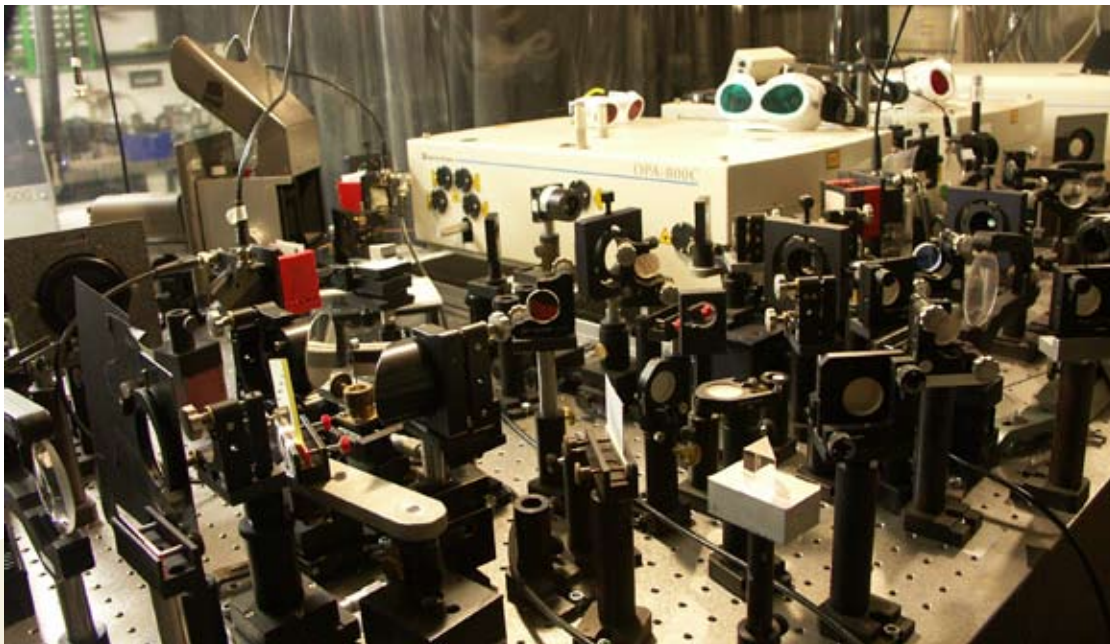
den Ausgangszustand wird mit stationären optischen Methoden untersucht.

Für die Untersuchungen stehen ein Spektralphotometer, ein Eigenbau-Fluorimeter, Piko-sekunden-Lasersysteme (Neodym-Glaslaser, Rubinlaser), ein Femtosekunden-Titansaphirlaser mit optischen parametrischen Verstärkern sowie eine Streakkamera zur Verfügung.

Studien an künstlichen und natürlichen Photorezeptoren werden im Rahmen des Gradu-



Prof. Dr. Alfons Penzkofer
Kontakt:
Tel.: ++49 (0)941 943 2107
Email: alfons.penzkofer@physik.uni-regensburg.de



Femtosekundenlasersystem
mit optischem parametrischem Verstärker.

lichtemittierende Dioden (OLEDs) untersucht. Die ultraschnelle Dynamik des Ladungstransfers und Energietransfers wird studiert an organischen Donor-Akzeptor Molekülen, welche Anwendungen finden in molekularen Schaltern und molekularen Logikbauelementen.

In der Photobiologie beschäftigen wir uns mit Blaublicht-Photorezeptoren. Sie bestehen aus Proteindomänen mit Flavin-Kofaktoren. Drei Klassen von Flavin-Blaublicht-Rezeptoren wurden bisher identifiziert. Es handelt sich dabei um LOV-Domänen (Light, Oxygen, Voltage Sensoren, sie regeln das Pflanzenwachstum hin zur Richtung des einfallenden Lichtes), BLUF Domänen (sensors of Blue Light Using Flavin, sie sind involviert in der Regelung der Photosynthese Aktivität) und Cryptochrome (regeln den Licht induzierten 24 Stunden Schlaf-Wach-Rhythmus von Menschen und Tieren und die Blütezeit von Pflanzen). Die Blaublicht induzierten Photozyklen von Anregung, Aktivität und Rückkehr in den Ausgangszustand erstrecken sich über einen Zeitbereich von Sekunden bis Stunden. Wir untersuchen die primären dynamischen Vorgänge der Rezeptor Aktivierung auf einer Zeitskala von Femtosekunden bis Mikrosekunden mit zeitaufgelösten optischen Methoden. Die Rückkehr in

iertenkollegs GK640/3 „Sensory photoreceptors in natural and artificial systems“ in Zusammenarbeit mit Kollegen aus der Chemie und Biologie der Universität Regensburg durchgeführt. Untersuchungen an Blaublichtrezeptoren führen wir als Mitglied der DFG Forschergruppe FOR 526 „Sensory Blue Light Receptors“ durch. Bei den Untersuchungen der Festkörperfarbstofflaser besteht Zusammenar-



Versuchsaufbau zur Messung von Fluoreszenz, Transmission, Reflexion und Photodegradation.

beit mit Chemikern und Physikern in Madrid, Spanien. Bei der Charakterisierung von Triplettemit- tern arbeiten wir mit der Kyoto Sangyo University in Japan zusammen.



Prof. Dr. Milena Grifoni
Lehrstuhl für Quantentransport und Dissipation

Kontakt:
Tel.: ++49 (0)941 943 2035
Email: milena.grifoni
@physik.uni-regensburg.de

Das Forschungsziel des Lehrstuhls besteht darin, die Eigenschaften komplexer Quantensysteme zu untersuchen, wobei das Hauptaugenmerk auf Ladungs- und Spintransport sowie Wechselwirkungseffekten der jeweiligen Quantensysteme mit ihrer Umgebung liegt. Insbesondere untersuchen wir den Transport durch wechselwirkende Moleküle und Kohlenstoffnanoröhrchen (KNR), Spin-Bahn-Effekte in Halbleitern, Eigenschaften verdünnter magnetischer Halbleiter und die Relaxation und Dephasierung in Qubit-Systemen. Desweiteren gehören Fragestellungen aus der Quanteninformationstheorie und der gerichtete Transport in Ratschen zu unseren Arbeitsschwerpunkten.

Der Lehrstuhl wird derzeit durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft mit den Sonderforschungsbereichen 631 „Festkörperbasierte Quanteninformationsverarbeitung“, SFB 689 „Spinphänomene in reduzierten Dimensionen“, dem Graduiertenkolleg „Nichtlinearität und Nichtgleichgewicht in kondensierter Materie“ sowie dem Schwerpunktprogramm 1243 „Quantentransport auf molekularer Ebene“ gefördert.

Arbeitsgruppe Grifoni

Im Mittelpunkt der Arbeitsgruppe stehen Untersuchungen zu den physikalischen Eigenschaften von Vielteilchensystemen. Die Notwendigkeit, Vielteilchenprobleme zu betrachten, kann hierbei sowohl auf das Vorhandensein von Elektron-Elektron-Wechselwirkungen als auch auf die Wechselwirkung der jeweiligen Quantensysteme mit den zahlreichen Freiheitsgraden der Umgebung zurückgeführt werden.

Insbesondere wird der Spin- und Ladungstransport in wechselwirkenden nano- oder mesoskopischen Systemen, z.B. organische Einzelmoleküle oder Kohlenstoffnanoröhrchen, untersucht. Ziel unserer Forschungsaktivitäten ist vor allem, die Strom-Spannungs-Charakteristik eines bestimmten Systems aus der zugrundeliegenden mikroskopischen Struktur abzuleiten, womit jene dem Experiment zugänglich gemacht werden kann. Aufgrund ihrer, bei niedrigen Energien linearen, elektronischen Bandstruktur, besitzen beispielsweise einwandige metallische Kohlenstoff Nanoröhrchen (KNR) die Eigenschaften von Nicht-Fermiflüssigkeiten. In Folge dessen verhalten sich verschiedene Transportgrößen gemäß Potenzgesetzen und es kommt zu einer Trennung von Spin- und Ladungsfreiheitsgraden. Darüber hinaus ruft die Existenz zweier Fermi-Punkte eine charakteristische Vier-Elektronen-Periodizität in der Strom-Gatespannungs-Kennlinie (vgl. Abbildung 1) in KNR-Quantenpunkten hervor.

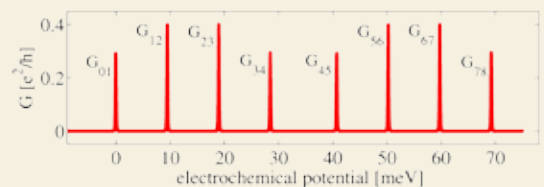
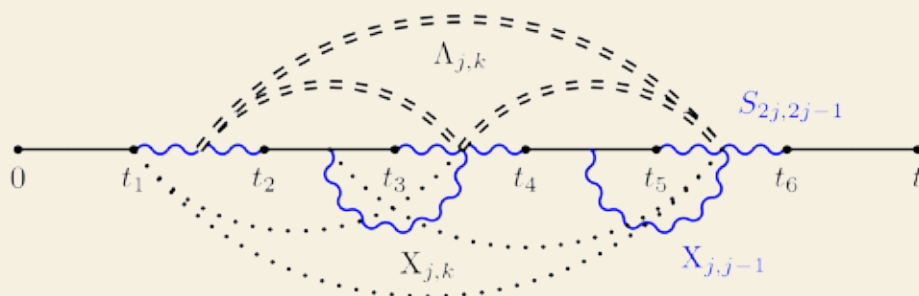


Abb. 1: Leitfähigkeit als Funktion der Gatespannung für ein einwandiges KNR, welches nur schwach an die Kontakte gekoppelt ist. Resonanzspitzen treten immer dann auf, wenn das elektrochemische Potential die Grundzustandsenergien zweier benachbarter Ladungszustände abgleicht. Die charakteristische Bandstruktur der KNRs ist Ursache der vierfachen Periodizität (aus Mayrhofer and Grifoni, PRB 74 R121403 (2006)).

Hingegen werden bosonische Reservoirs betrachtet um z.B. die Auswirkungen von Dissipation und Dephasierung auf die Dynamik von Quantenteilchen, welche sich in einem gegebenen Einteilchenpotential bewegen, zu untersuchen. Diese Situation steht Modell, um die Dephasierungszeiten in (realistischen) Fluss-Qubit-System-

Abb. 2: Die Umgebung induziert zeitlich nichtlokale Korrelationen zwischen Tunnelübergängen eines Zwei-Niveau-Systems zu den Zeiten $t_1, t_2, \dots$ (Nesi, Paladino, Thorwart, Grifoni, (2007))



en, in Spin-Ketten oder für Teilchen, die sich in periodischen Strukturen bewegen, zu untersuchen. Aktuell liegt der Forschungsschwerpunkt der Arbeitsgruppe z.B. in der Berechnung der dissipativen Dynamik eines Teilchens, welches zwei verschiedene Zustände einnehmen kann und in einer nichttrivialen Umgebung eingebettet ist (siehe Abbildung 2). Solch eine nichttriviale Umgebung stellt z.B. ein SQUID Detektor für ein Fluss-Qubit dar. Auch die Möglichkeit eines gerichteten Spin-transportes in dissipativen periodischen Strukturen als Folge der Spin-Bahn-Kopplung wird derzeit untersucht.

Arbeitsgruppe Schliemann

Die Forschungstätigkeiten der Arbeitsgruppe umfassen im Wesentlichen theoretische Untersuchungen zu den folgenden Themen:

- Spintronik, Spindynamik in Halbleitern
- Ferromagnetische Halbleiter
- Quantencomputing in Festkörpern
- Quanteninformationstheorie
- Zweischicht-Quanten-Hall-Systeme

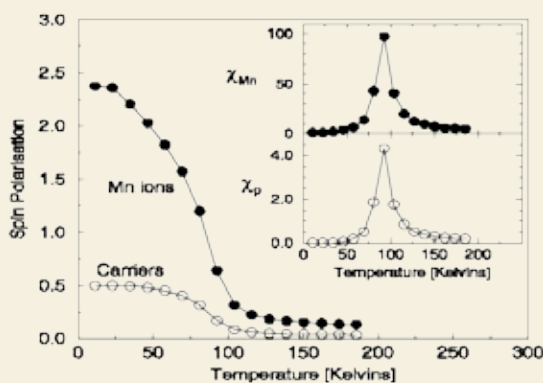
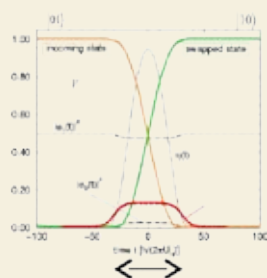


Prof. Dr. John Schliemann

Kontakt:
Tel.: ++49 (0)941 943 2037
Email: john.schliemann
@physik.uni-regensburg.de

Das Gebiet der Spin-Elektronik, oder kurz der Spintronik, zählt sowohl auf experimenteller wie theoretischer Seite zu einem der aktivsten und am schnellsten wachsenden Gebieten in der aktuellen Festkörperforschung. Es umfasst die gesamte Fülle an Anstrengungen und Vorschlägen hinsichtlich der Nutzung des Elektronenspins anstatt - oder in Kombination mit - der Elektronenladung zur Informationsverarbeitung, oder sogar noch ambitionierter, zur Quanten-Informationsverarbeitung. Spintronik beschäftigt sich also mit der Hardware möglicher künftiger Computersysteme. Aus Sicht der Materialwissenschaft besteht dabei eine enge Verknüpfung zu dem Gebiet ferromagnetischer Halbleiter, wobei Mangan-gedoptes GaAs als Musterbeispiel dient. Dabei besteht das Ziel darin, die magnetischen Eigenschaften von Metallen mit den Transporteigenschaften von Halbleitern in ein und demselben Material bei Zimmertemperatur zu verknüpfen. Ein weiteres aktives Feld der Halbleiter-Forschung liegt bei den Zweischicht-Quanten-Hall-Systemen, die auch in unserer Arbeitsgruppe untersucht worden sind. Darüber hinaus steht das Gebiet der Spintronik mit der Forschung über Quanten-Informationsverarbeitung in Festkörper-Systemen in Beziehung. Zu guter Letzt arbeitet unser Team auch aktiv an eher abstrakten Fragestellungen zur Quanten-Informationstheorie, wobei wir auf Tuchfühlung mit dem Fachgebiet der mathematischen Physik gehen.

Quanten-Informationsverarbeitung in Festkörper-Systemen



Ferromagnetische Halbleiter



Prof. Dr. Klaus Richter
Lehrstuhl für Theoretische Physik

Kontakt:
Tel.: ++49 (0)941 943 2029
Email: klaus.richter
@physik.uni-regensburg.de

Die Forschungsschwerpunkte der Arbeitsgruppen am Lehrstuhl sind im Bereich der Theorie der Kondensierten Materie angesiedelt. Sie reichen von der Spinelektronik über die Molekulare Elektronik, Mesoskopische Physik elektronischer und atomarer Systeme bis hin zu Quanteninformation und Quantenchaos. Dabei stehen Transportphänomene (Leitfähigkeit in Nanostrukturen und Einzelmolekülen, spinabhängiger Transport, Propagation kalter Atomgase) im Vordergrund unseres Interesses und bilden die gemeinsame thematische und methodische Klammer. Quantenkohärenz im Wechselspiel mit Einflüssen reduzierter Dimensionalität der Nanosysteme sowie Unordnungs-, Spin- und Wechselwirkungseffekte führen zu einer Vielzahl neuartiger physikalischer Quantenphänomene.

Arbeitsgruppe Klaus Richter

Im Fokus unserer Forschung steht Ladungstransport durch komplexe Quantensysteme von mesoskopischen bis hin zu molekularen Skalen, insbesondere ballistische Nanostrukturen (siehe Abb. 1), Quantenpunkte und Einzelmoleküle.

Im Kontext der Halbleiter-basierten Spinelektronik interessieren wir uns für Spin-Effekte im kohärenten Ladungstransport unter dem Einfluss inhomogener Magnetfelder oder der Spin-Bahn-Wechselwirkung. Die Kopplung von orbitalen und Spin-Freiheitsgraden, zusammen mit Effekten auf Grund der endlichen Systemgeometrien, führten zu neuartigen Phänomenen in der Spin-Dynamik und -relaxation: Wir haben beispielsweise kürzlich demonstriert, dass die Kombination von Übergittern und Spin-Bahn-Wechselwirkung in mesoskopischen Leitern mit Wechselspannung spinpolarisierte Ströme liefert und somit als „Spin-Ratsche“ fungieren kann.

Beim Ladungstransport durch Einzelmolekül-Brücken zwischen makroskopischen Leitern untersuchen wir, wie genuin molekulare Eigenschaften, wie vibronische Freiheitsgrade der Moleküle sowie Wechselwirkungseffekte (Coulomb-Blockade) den Leitwert der molekularen Brücken modifizieren. Unsere Quantentransportrechnungen erfolgen zumeist numerisch im Rahmen des Landauer- und Keldysh-Formalismus mit Hilfe von Greensfunktionsmethoden.

An der Schnittstelle zwischen Atomphysik und Mesoskopischer Physik untersuchen wir die Propagation von ultrakalten Atomen und Bose-Einstein Kondensaten durch künstliche Wellenleiter und Kavitäten („atom on a chip“). Nichtlinearitäten in den die Kondensatdynamik beschreibenden Gleichungen führen zu eigentümlichen Effekten, wie beispielsweise die von uns entdeckte „Atomblockade“ in der Transmission durch Doppelbarrieren (siehe Abb. 2).

Mesoskopische Systeme im Übergangsbereich zwischen Mikro- und Makrophysik sind ideale Kandidaten, um das Wechselspiel zwischen klassischer und Quantenmechanik zu studieren, insbesondere Signaturen chaotischer klassischer Dynamik im korrespondierenden Quantensystem. Unter Weiterentwicklung moderner semiklassischer Methoden ist es uns hier gelungen, subtile Korrelationen in der klassischen Dynamik aufzuspüren (siehe Abb. 3), die sowohl Relevanz bei der Erklärung statistischer Eigenschaften von Energieniveaus besitzen, als auch die konsistente Formulierung einer semiklassischen Theorie des ballistischen Quantentransports erlauben.

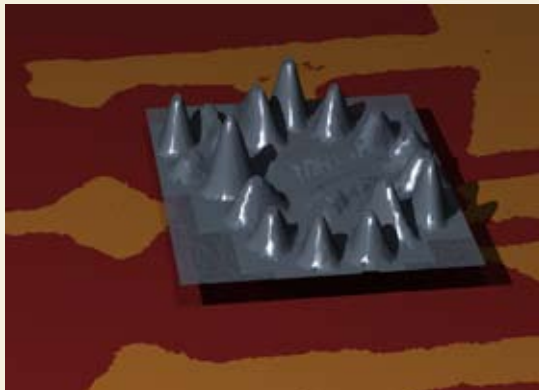


Abb. 1: Berechnete Elektronendichte in einem „Quantenpunkt“

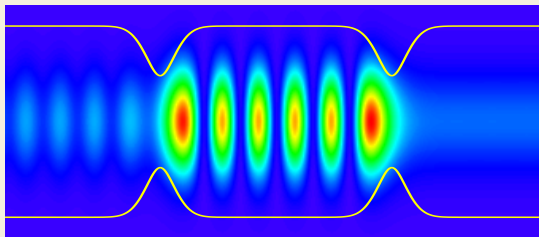


Abb 2: Bose-Einstein Kondensat in einem Materiewellenleiter mit Doppelbarriere

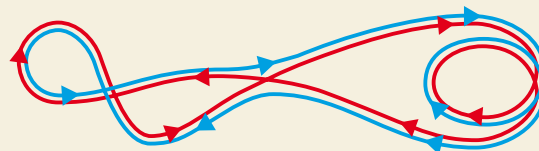
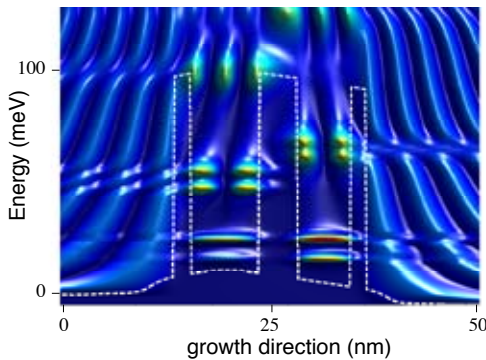


Abb. 3: Ein Paar ‚korrelierter‘ klassischer Trajektorien, bei dem die rechte Schleife gleichsinnig, die linke Schleife gegensinnig durchlaufen wird.

Arbeitsgruppe Jaroslav Fabian

Den Hauptforschungsschwerpunkt unserer Arbeitsgruppe stellt die Spintronik dar, ein Zweig der Elektronik mit wachsender Bedeutung, bei der zusätzlich zur Ladung auch der Spin-Freiheitsgrad des Elektrons ausgenutzt wird, um Information zu verarbeiten und zu speichern. Wir arbeiten an un-



Konsistente Berechnung der lokalen Zustandsdichte einer dreifach begrenzten magnetischen Resonanz-Tunnel-Diode bei angelegter Spannung

terschiedlichen Gesichtspunkten der Spintronik, sowohl bzgl. Grundlagen- als auch angewandter Forschung.

Im Bereich der Grundlagenforschung untersuchen wir den Spin-polarisierten Transport und das Spin-polarisierte Tunneln in Metallen und Halbleitern, Spin-Relaxation und Spin-Dynamik in Bulk-Systemen als auch in Quantenpunkten und den kohärenten Transport von Spin-verschränkten Zuständen in Systemen wie z.B. Quantenpunkten. Auf der Basis von spinabhängigem Tunneln zwischen Quantenpunkten haben wir einen Mechanismus zur Umwandlung von Spin in Ladung entwickelt, ebenso wie eine Möglichkeit Spinverschränkungen mit adiabatischen Passagen-Schemata zu erzeugen und zu detektieren – die so genannte "Entanglement distillation by adiabatic passage". Schließlich haben wir Spin Relaxation in einzelnen und gekoppelten lateralen Quantenpunkten untersucht und die Geometrien für eine

robuste Spin-basierte Quanteninformationsverarbeitung gefunden. Außerdem planen wir mit ab initio und Monte Carlo Rechnungen den Ferromagnetismus von Halbleiter-Quantentrögen und Interface-Systemen, den Quantentransport durch magnetische Strukturen zu untersuchen.

Auf der angewandten Seite entwickeln und simulieren wir neuartige Modelle für Spin-basierte Bauelemente, wie z.B. magnetische Dioden, magnetische Bipolar-Transistoren, Magnetresonanz-Tunneldioden, m-MOBILES, digitaler Magnetowiderstand usw. Wir haben ein neues Grundelement des Magnetwiderstands gefunden – das wir digitalen Magnetwiderstand (DMW) nennen – bei dem der Widerstand eines Bauteils sich digital (sprunghaft) ändert, wenn das angelegte magnetische Feld (kontinuierlich) durch gestimmt wird.



Prof. Dr. Jaroslav Fabian

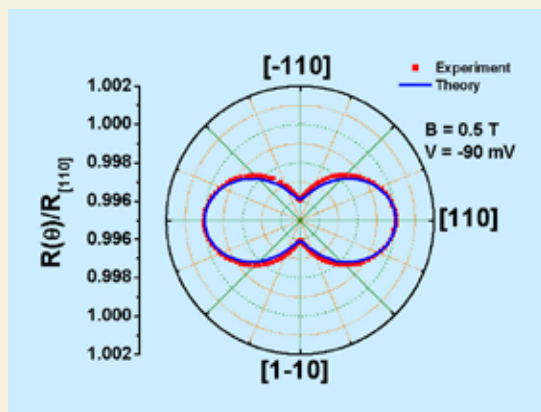
Kontakt:
Tel.: ++49 (0)941 943 2031
Email: jaroslav.fabian
@physik.uni-regensburg.de

15

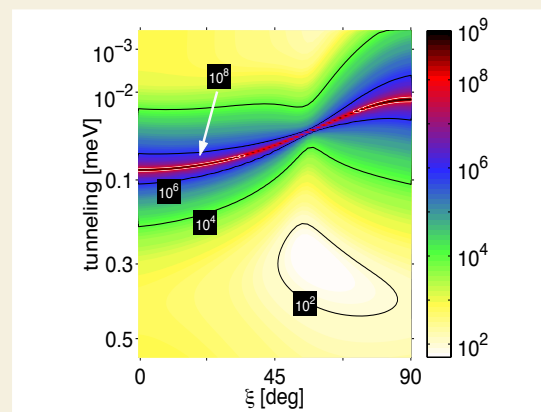
Forschungsförderung und Kooperationen

Der überwiegende Teil der Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler des Lehrstuhls wird durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft gefördert im Rahmen der Sonderforschungsbereiche „Spinphänomene in reduzierten Dimensionen“ und „Festkörperbasierte Quanteninformationsverarbeitung“, des Graduiertenkollegs „Nichtlinearität und Nichtgleichgewicht in kondensierter Materie“, sowie durch Beteiligung an den Schwerpunktprogrammen „Quantentransport auf molekularen Skalen“ und „Halbleiter Spintronik“. Weitere Unterstützung erhalten wir von US ONR, sowie durch Stipendien der Alexander von Humboldt-Stiftung und anderen Stiftungen der Nachwuchsförderung.

Die Arbeitsgruppen am Lehrstuhl unterhalten laufende Kooperationen mit Theoriearbeitsgruppen unter anderem an der State University of New York in Buffalo, der Duke University, der Harvard University, der University of Maryland, College Park, der Université Louis Pasteur in Straßburg, der Université Paris-Sud in Orsay, der Karl-Franzens-Universität in Graz, der Universität in Leoben, der Universität Catania, dem Hefei Institute of Technology in China und der Universität Catania.



Tunnel-anisotroper Magnetwiderstand: Experiment AG Weiss und unsere Theorie



Berechnete Spinrelaxation in gekoppelten Quantenpunkten

Weitere aktuelle Informationen hinsichtlich der Forschungslinien, Publikationen und beteiligten Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter finden sich unter:

<http://www.physik.uni-regensburg.de/forschung/fabian/>

<http://www.physik.uni-regensburg.de/forschung/richter/richter/>

Quantenchromodynamik - die Theorie der Quarks und Gluonen

Professoren: Dr. Gunnar Bali, Dr. Vladimir Braun, Dr. Andreas Schäfer, Dr. Tilo Wettig



Prof. Dr. Vladimir Braun
Lehrstuhl für Hadronen-
und Teilchenphysik

Kontakt:
Tel.: ++49 (0)941 943 2005
Email: vladimir.braun
@physik.uni-regensburg.de



Prof. Dr. Tilo Wettig

Kontakt:
Tel.: ++49 (0)941 943 2004
Email: tilo.wettig
@physik.uni-regensburg.de

Die grundlegenden Theorien der Teilchenphysik sind Quantenfeldtheorien (QFT). (Siehe hierzu den Artikel 'Quantenfeldtheorie - Was ist das?' des Internetportals des Bundesministeriums: <http://www.weltderphysik.de>, Suchbegriff 'Quantenfeldtheorie'.) Diese erlauben eine Vielzahl konkreter Aussagen über unsere Welt, von kleinsten Längenskalen bis hin zur Kosmologie.

Störungstheoretisch ist die QFT sehr gut verstanden, und für alle Effekte, die sich störungstheoretisch beschreiben lassen, besteht der weitere Fortschritt in einer systematischen, kontinuierlichen Verbesserung durch Berücksichtigung immer höherer Ordnungen. Dies ist unbedingt nötig, um die Chance zu erhöhen, 'Neue Physik' zu entdecken. Denn um neue und noch fundamentalere Ebenen im Aufbau der Welt identifizieren zu können, müssen klarerweise die theoretischen Unsicherheiten kleiner sein als die Größe der beobachteten Effekte. Daher ist die sogenannte 'High-Energy-Frontier' gleichzeitig auch eine 'High-Precision-Frontier'.

Wenn somit an der fundamentalen Bedeutung der störungstheoretischen QFT kein Zweifel besteht, so üben doch die vielfältigen nicht-störungstheoretischen Phänomene die größte Faszination aus. Besonders in der Quark-Gluon-Physik, der Quantenchromodynamik (QCD), gibt es noch eine Unzahl von Rätseln zu lösen. Hier sind die Phänomene deshalb so vielgestaltig, weil die relevante Kopplungskonstante α_s groß ist (typischerweise $\alpha_s(Q^2) = 0.2 - 0.3$ statt z.B. $\alpha(Q^2) = 1/137 - 1/120$ für die elektromagnetische Wechselwirkung) und nicht-lineare Effekte dadurch extrem stark werden.

Vor diesem Hintergrund arbeitet unsere Gruppe primär an Problemen der nicht-störungstheoretischen QCD, ergänzt durch einige Aktivitäten im Bereich der QCD-Störungstheorie. Der mit Abstand universellste und wohlfundierteste nicht-störungstheoretische Zugang zu QFTs ist die Gitter-QFT, insbesondere die Gitter-QCD. Hierbei wird ein begrenztes Raumzeit-Volumen durch ein Punktgitter approximiert. In dieser Approximation kann man dann die meisten Informationen, die den inneren Aufbau von QCD Bindungszuständen, also z.B. des Protons, charakterisieren, numerisch berechnen. Allerdings benötigt man dazu die weltweit leistungsfähigsten Computer, ja, eigentlich sogar noch viel leistungsfähigere. Daher ist unsere Arbeitsgruppe auch an der Entwicklung neuer, besonders kostengünstiger und leistungstarker Computergenerationen beteiligt. Gegenwärtig setzen wir insbesondere große Hoffnungen auf das Projekt eines PFlop/s Rechners, das in Zusammenarbeit mit IBM - Deutschland, dem Forschungszentrum Jülich, dem DESY und der Universität Wuppertal verfolgt wird.

Zur Gitter-QCD besteht eine überregionale DFG-Forschergemeinschaft. Ein Sonderforschungsgebiet (Transregio) wurde gemeinsam mit der Uni-

versität Wuppertal beantragt (Sprecher A. Schäfer). Wir sind an EU-Projekten beteiligt (I3HP im FP-6) und arbeiten eng mit Experimenten an internationalen Großforschungszentren (DESY, CERN, GSI, JLab, BNL) zusammen.

Gerade in den letzten Jahren haben wir viele wissenschaftliche Ergebnisse erhalten, die uns mit einigem Stolz erfüllen. Allerdings setzt die Würdigung dieser Ergebnisse eine gewisse Vertrautheit mit dem Stand, den die Teilchenphysik erreicht hat, voraus. (Hier sei noch einmal auf das Internetportal des BMBF verwiesen, wo sich eine Vielzahl aktueller Darstellungen für eine breitere Öffentlichkeit findet.)

Im Folgenden seien nur zwei Ergebnisse, die sich relativ einfach erklären lassen, beispielhaft vorgestellt.

Protonen haben Spin 1/2 und bestehen in einfachster Näherung aus zwei up-Quarks und einem down-Quark, die alle ebenfalls den Spin 1/2

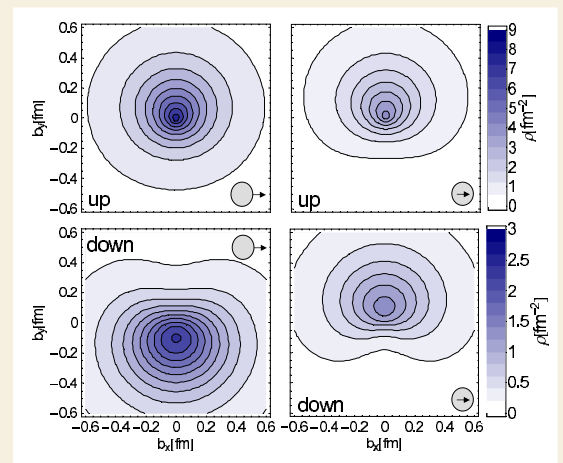


Abb. 1: GPDs

Die Verteilung von Quarks in einem transversal polarisierten (links) und unpolarisierten (rechts) Proton.

haben. Bei der Kopplung der 3 Quarkspins zu dem Gesamtspin 1/2 spielen auch ihre relativen Bahndrehimpulse eine Rolle, was sich wiederum in einer nicht-trivialen räumlichen Verteilung manifestiert. Dies konnten wir, ausschliesslich basierend auf den Grundgleichungen der QCD, berechnen. Gezeigt ist auf der linken Seite die Dichteverteilung der Quarks in der transversalen Ebene für ein Proton, das auf den Betrachter zu fliegt und dessen Spin nach rechts zeigt. Auf der rechten Seite wurde hingegen gefordert, dass der Spin des betrachteten Quarks nach rechts zeigt und bezüglich der Richtung des Protonspins keine Einschränkung gemacht.

Das zweite Beispiel betrifft das Confinement, d.h. die Tatsache, dass Quarks und Gluonen nicht frei vorkommen können, sondern nur als 'farblose' Bindungszustände. Versucht man z.B. ein Quark und ein Antiquark auseinander zu zie-

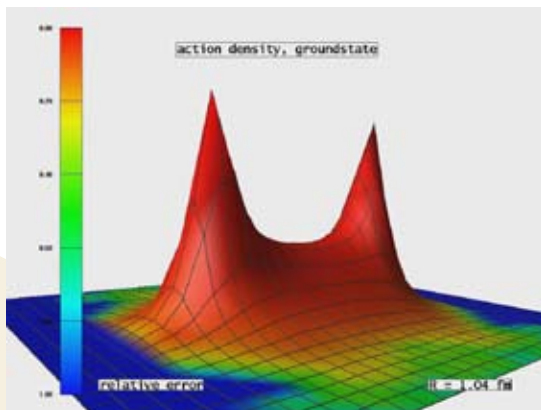


Abb. 2: String-Breaking
Der Gluon-String zwischen einem Quark und Antiquark kurz vor dem Zerreißen aufgrund der Erzeugung eines Quark-Antiquark-Paares.

hen, so entsteht zunächst ein sogenannter String aus Gluonen, der bei noch größeren Abständen durch Erzeugung eines Quark-Antiquark-Paares zerreißt. Dies konnte detailliert berechnet werden. Abb. 2 zeigt einen 'Schnappschuss'.

Als letztes zeigt Abb. 3 den Regensburger QCDOC Computer, der von T. Wettig in einer Zusammenarbeit mit IBM, BNL, RIKEN, Columbia University und einem Britischen Konsortium mit entwickelt wurde. Der Regensburger Rechner ist kaum größer als eine Workstation, liefert aber immerhin 0.4 TFlop/s. (Seine 'großen Brüder' in den USA und im UK haben typischerweise 10 TFlop/s.) Inzwischen arbeiten wir an einem Nachfolgemodell, mit einem Preis/Leistungs-Verhältnis, das um wesentlich mehr als eine Größenordnung günstiger ist, und das sich durch besonders geringen Energieverbrauch pro TFlop/s auszeichnen wird.



Abb. 3: QCDOC
Der Regensburger QCDOC-Rechner



Prof. Dr. Andreas Schäfer
Lehrstuhl für Hadronen- und Teichenphysik

Kontakt:
Tel.: ++49 (0)941 943 2007
Email: andreas.schaefer
@physik.uni-regensburg.de



Prof. Dr. Gunnar Bali

Kontakt:
Tel.: ++49 (0)941 943 2017
Email: gunnar.bali
@physik.uni-regensburg.de



Akad. Dir. Josef Reisinger

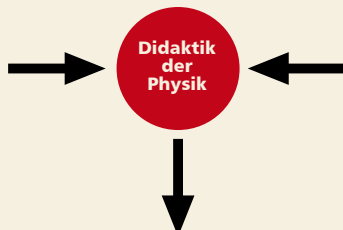
Kontakt:
Tel.: ++49 (0)941 943 2139
Email: josef.reisinger
@physik.uni-regensburg.de



"Man kann einem Menschen nichts lernen, man kann ihm nur helfen, es für sich selbst herauszufinden." Galileo Galilei

Die Didaktik der Physik ist nicht nur ein eigenständiges Fach, sondern die eigentliche Professionswissenschaft der Physiklehrkräfte. Selbstverständlich muss ein/e Physiklehrer/in sehr fundierte Kenntnisse in der Fachwissenschaft Physik haben. Für den geforderten fachüberschreitenden Unterricht bedarf es zusätzlicher Kenntnisse aus den anderen naturwissenschaftlichen Disziplinen und der Technik. Und natürlich braucht er/sie auch einschlägige Kenntnisse aus den Erziehungs-, Geistes- und Sozialwissenschaften. Die Lehre vom Lehren und Lernen der Physik – und das ist das Kerngeschäft im Physikunterricht – ist aber die Physikdidaktik.

Pädagogik
Allgemeindidaktik
Psychologie
Soziologie
(Natur-) Philosophie
Wissenschaftstheorie
Erkenntnistheorie
...



Physik
Chemie
Biologie
Technik
Technologie
...

Physik-
unterricht

Die multidisziplinäre Unterrichtswissenschaft Physikdidaktik ist noch relativ jung. Sie ist erst seit den 70er Jahren an den deutschen Hochschulen als Forschungsdisziplin vertreten. Anders als etwa die Physik kann sie nicht aus einer langen Tradition schöpfen. So ist es nur verständlich, dass sich noch kein einheitliches und eigenständiges Wissenschaftsparadigma herausgebildet hat.

Im Wesentlichen beschäftigt sich die Physikdidaktik mit der Frage, was im Physikunterricht vermittelt werden soll (Ziele des Physikunterrichts und Begründungen) und mit allen Aspekten der Frage, wie diese Ziele erreicht werden können. Dazu gehören u. a. die Untersuchung von Lernprozessen, die Erhebung von Schülervorstellungen, die Entwicklung schülergemäßer und fachgerechter Sachstrukturen (Elementarisierung), die Konstruktion von Unterrichtseinheiten, die Entwicklung von Experimentiermaterial und Unterrichtsmedien und deren Erprobung und wissenschaftliche Evaluation.

Ganz grob kann man zwischen zwei unterschiedlichen Ausrichtungen der Physikdidaktik unterscheiden: Der fachwissenschaftlich orientierten Stoffdidaktik und der an der empirischen Lehr-Lernforschung orientierten Physikdidaktik. An den deutschen Hochschulen ist die Stoffdidaktik drei- bis viermal so stark vertreten, als die empirische Lehr-Lern-Forschung.

In Regensburg obliegen der Physikdidaktik fast ausschließlich Lehraufgaben. Neben der theoretischen und praktischen Ausbildung der Studierenden in Fachdidaktik im Rahmen der Lehramtsstudiengänge Physik für Grund-, Haupt- und Realschulen sowie für das Gymnasium, bilden die Organisation und Durchführung von Fortbildungsveranstaltungen für Lehrkräfte sowie die Kooperation mit Schulen weitere Schwerpunkte. Im Rahmen von Staatsexamensarbeiten befassen sich die Studierenden mit Stoffelementarisierungen, der Konstruktion von Unterrichtseinheiten, sowie der Entwicklung von Lernmaterialien und Unterrichtsmedien. Diese werden in der Praxis erprobt und auf ihre Brauchbarkeit hin evaluiert.



Modellversuch zur unkontrollierten Kettenreaktion (auf eine Metallplatte aufgesteckte Streichhölzer)

Das Veranstaltungsangebot für die Studierenden umfasst

- die Einführung in die Schulphysik unter Berücksichtigung fachdidaktischer Gesichtspunkte zur fachwissenschaftlichen Ausbildung der Studierenden der Lehrämter für Grund- und Hauptschulen,
- die Vorlesung „Einführung in die Physikdidaktik“ (Vermittlung der theoretischen Grundlagen der Fachdidaktik),
- eine Vorlesung, die die Einführung grundlegender physikalischer Begriffe im Physikunterricht zum Gegenstand hat (z. B. Kraftbegriff, Energiebegriff, ...); hier geht es vor allem auch um die fach- und schülergerechte Elementarisierung zentraler physikalischer Konzepte,
- experimentelle Seminare zu Planung, Aufbau, Durchführung und Präsentation schulphysikalischer Experimente sowie deren Reflexion unter fachdidaktischen Gesichtspunkten,
- Seminarangebote zur Analyse und Planung von Unterricht, insbesondere im Zusammenhang mit der Begleitung der Schulpraktika
- und ein Seminar zu Vorbereitung auf die schriftliche Staatsprüfung.

In vielen Veranstaltungen werden Videoaufzeichnungen als Grundlage für die Reflexion eingesetzt.

Die organisatorischen Strukturen der Physikdidaktik orientieren sich am Vorbild der Lernwerkstätten. Seminar-, Arbeits- und Sammlungsräume, eine Präsenzbibliothek, Arbeitsmaterialien, Medien, ein Raum für Kommunikation und offene Türen sollen eine Lernumgebung bilden, die eigenständiges und selbst verantwortetes Lernen fördert.



Freihandexperiment zur Ausdehnung von Gasen bei Erwärmung. Der Versuch demonstriert gleichzeitig die Umwandlung thermischer in mechanische Energie.

Die Reflexion von Unterricht mit Hilfe von Videoaufzeichnungen gewinnt in der fachdidaktischen Forschung und Lehre immer größere Bedeutung. Derzeit wird in Kooperation mit dem Institut für Pädagogik der Naturwissenschaften (IPN) in Kiel eine fortlaufende Lehrerfortbildung durchgeführt, in der die Lehrkräfte dazu angeleitet werden, mit Hilfe von Videoaufzeichnungen ihren eigenen Unterricht zu reflektieren. Ziel der Intervention ist es, die Lehrkräfte dabei zu unterstüt-

zen, sich ihrer Denkmuster über Physikunterricht bewusst zu werden und diese nachhaltig zu beeinflussen.

Die Hauptaufgabe des Physikunterrichts ist es nicht, die Schüler/innen zu kleinen Physikern zu machen oder gar die Physik weiter zu entwickeln. Vielmehr sollen die Schüler/innen eine Vorstellung davon bekommen, was Physiker tun und wie Physik entsteht. Das können Sie nur, wenn der Physikunterricht auf verstehendes Lernen ausgerichtet ist. Selbstverständlich müssen dazu auch einige grundlegende physikalische Inhalte gelernt werden. Doch schon Max Planck erkannte: „Es kommt weniger darauf an, was in der Schule gelernt wird, als darauf, wie gelernt wird. Ein einziger mathematischer Satz, der von einem Schüler wirklich verstanden wird, besitzt für ihn mehr Wert als zehn Formeln, die er auswendig gelernt hat, und die er auch vorschriftsmäßig anzuwenden weiß, ohne aber ihren eigentlichen Sinn zu verstehen.“

Auch für den Physikunterricht ist es die vornehmste und wichtigste Aufgabe, die jungen Menschen in ihrer Entwicklung zu begleiten. Deshalb geht es in der fachdidaktischen Ausbildung nicht nur um die allseitige Optimierung aller Determinanten eines guten Physikunterrichts, sondern stets auch um die Diskussion von Norm- und Wertfragen. Denn im Unterricht geht es neben dem Stoff immer auch um die Menschen, die zur Auseinandersetzung mit den Inhalten angeregt werden sollen. Physikunterricht neu denken heißt deshalb nicht zuletzt auch, sich über die Fachinhalte hinaus gleichermaßen an den Schüler/innen zu orientieren.

Mechanikwerkstatt (Zentrale Einrichtung der Fakultät Physik)

Norbert Sommer, Johann Deinhart



Norbert Sommer
Werkstattleitung

Kontakt:
Tel.: ++49 (0)941 943 2124
Email: norbert.sommer@physik.uni-regensburg.de

Die Mechanikwerkstatt ist für den Experimentalphysiker von größter Wichtigkeit. Vor allem während der Doktor-, aber auch der Diplomarbeit müssen häufig komplett neue Apparaturen aufgebaut werden, um die geplanten Experimente durchführen zu können (Bild 1 und 2). Dazu sind oft nicht-handelsübliche Geräte und Bauteile erforderlich, die zusammen mit der Werkstatt entwickelt und gebaut werden müssen. Auch gibt es Apparaturen, die irgendwann einmal „ihren Geist aufgeben“ und eine Reparatur notwendig machen. Weiterhin unterhält die Werkstatt entsprechende Lager für Rohmaterial, Schrauben, Maschinenelemente usw. die von den Diplomanden und Doktoranden verwendet werden können.

Weitere Information im Internet: <http://www.physik.uni-regensburg.de/infra/mechanik/>



Johann Deinhart
Stellv. Werkstattleitung

Kontakt:
Tel.: ++49 (0)941 943 2124
Email: johann.deinhart@physik.uni-regensburg.de

Wir sind technischer Dienstleister für die experimentelle Forschung in der Physik. Durch die Labornähe der Werkstatt können technische Probleme meist schnell und unbürokratisch gelöst werden. Der direkte Kontakt von Wissenschaftlern zu den Werkstattleuten ist für alle von Vorteil. Bei größeren Projekten ist es notwendig die Lehrstuhltechniker mit der Planung zu beauftragen. Mit Hilfe von modernen CAD Systemen kann am Computer das fertige Modell betrachtet und eventuell Bewegungsabläufe simuliert werden. Fehler sieht man leichter und können vorab beseitigt werden. Für 2D Zeichnungen bevorzugen wir AutoCAD und für 3D Modelle benutzen wir Inventor, beide Produkte von der Fa. Autodesk.

Die Ausstattung und Größe der Werkstatt orientiert sich an den Bedürfnissen der Forschung. Momentan sind 2 Meister, 12 Facharbeiter und 6 Auszubildende beschäftigt.



Bild 2

Die Werkstatt ist in folgende Arbeitsbereiche untergliedert:

Allgemeiner Werkstattbereich

- Anfertigen von einfachen Bauteilen aus unterschiedlichen Werkstoffen auf herkömmlichen Werkzeugmaschinen (Bild 3).
- Montage und Reparaturen von Maschinen und Geräten.
- Ausbildungsplatz für Industriemechaniker. (Bild 4)

Schlosserei – Schweißerei

- Anfertigen von Einrichtungsgegenständen (Regale, Unterbauten, Tische, Abschirmungen) aus Stahl, Aluminium, Holz und Kunststoff.
- Schweißen von Vakuumbehältern, Flansche, Rohre und Zubehör.

CNC Center

- Computergesteuerte Dreh- und Fräsmaschine für das Anfertigen von komplizierten mechanischen Bauteilen sowie das Fertigen von Teilen in größeren Stückzahlen (Bild 5).
- Computergesteuerte Drahterosionsmaschine zum Konturschneiden und Trennen aller metallischen Werkstoffe mit einem Schneidspalt von 0,2 bis 0,4 mm. Feinstbearbeitung von Bauteilen mit hoher Maßgenauigkeit und Oberflächengüte.

Oberflächentechnik

- Trommelschleifen: Entgraten, schleifen und polieren von metallischen Kleinteilen.
- Eloxieren: Oberflächen von Aluminium veredeln (auch in unterschiedlichen Farbtönen möglich)
- Brünieren: Oberfläche von Messingteilen schwärzen.
- Lackieren von Blechteilen bis zu einer Größe von ca. 1m² (Bild 6)

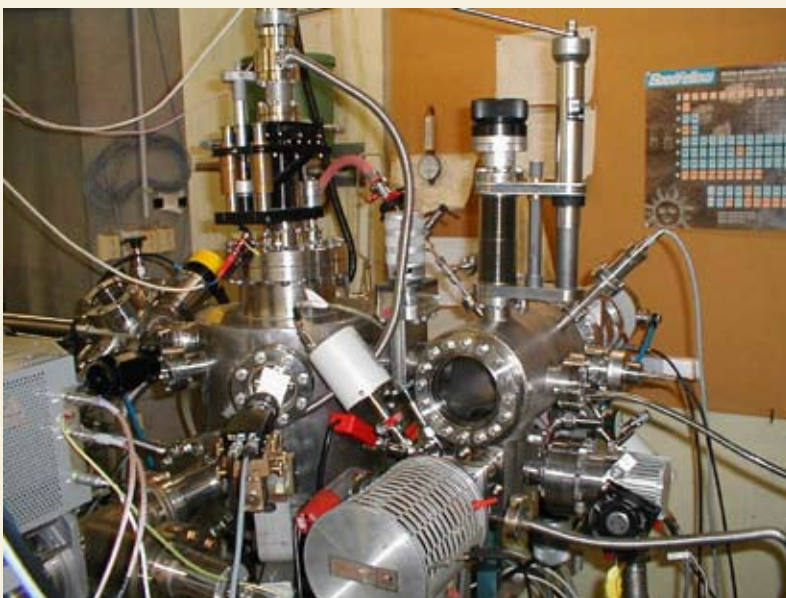


Bild 1

Für Schüler, Studenten und Diplomanten werden auf Wunsch Praktikas organisiert.

- Für die Schüler meist in Form einer einwöchigen Schnupperlehre.
- Für Studenten und Diplomanten meist eine Einweisung in die Grundlagen der Metallbearbeitung (Drehen, Fräsen, Sägen, Bohren, Gewinde schneiden oä.).



Bild 3



Bild 4



Bild 5



Bild 6

Naturwissenschaftliche Fakultät II
Physik
Universität Regensburg

93040 Regensburg

Telefon: ++49 (0) 941 943 2023

Telefax: ++49 (0) 941 943 2021

Internet: <http://www.physik.uni-regensburg.de>

Impressum

Herausgeber

Naturwissenschaftliche Fakultät II - Physik
Universität Regensburg

Verantwortlich

Prof. Dr. Klaus Richter, Dekan

Redaktion / Text

Beiträge der Arbeitsgruppen

Übersetzung

Tommy Burch, Christoph Bauer

Gestaltung

Franz Stadler, Universität Regensburg

Fotos

Beiträge der Arbeitsgruppen, Christoph Bauer

© 2007, Naturwissenschaftliche Fakultät II - Physik
Universität Regensburg