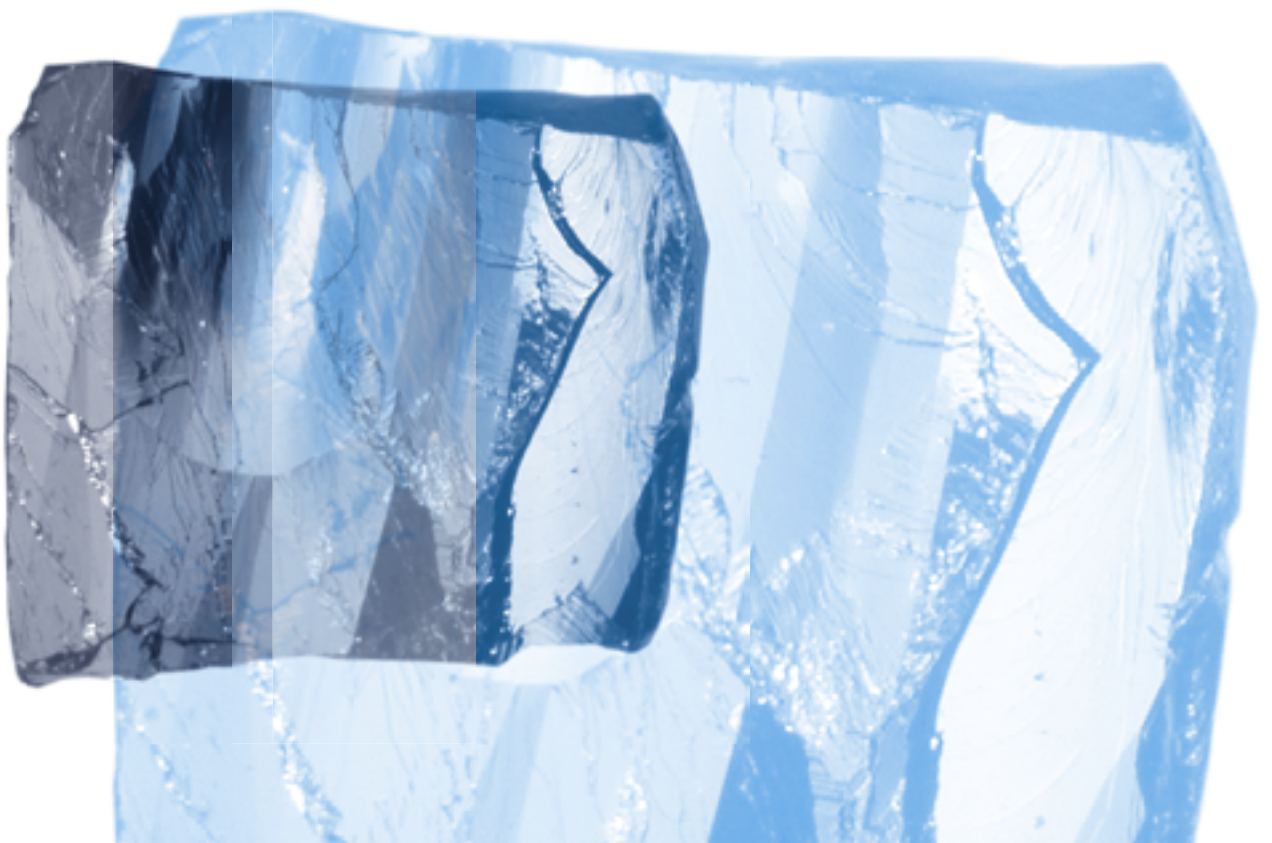


SFB  
484

Sonderforschungsbereich 484  
am Institut für Physik der Universität Augsburg

Exotische Zustände in Festkörpern



**Titelbild:**

Die Makrofotografie zeigt ein etwa drei mal drei Millimeter großes Spaltstück eines Strontiumniobat-Einkristalls ( $\text{Sr}_6\text{Nb}_5\text{O}_{18}$ ), der von Dr. Frank Lichtenberg am Lehrstuhl Experimentalphysik VI der Universität Augsburg gezüchtet wurde. Das Besondere an diesen so genannten geschichteten Perowskiten ist die komplexe, aber geordnete Schichtstruktur ihres Kristallgitters. Die chemische Zusammensetzung des Materials und damit die Schichtstruktur können von den Augsburger Physikerinnen und Physikern gezielt verändert werden. Anschließend untersuchen die Forscherinnen und Forscher den Einfluss der Schichtstruktur auf die physikalischen Eigenschaften des Materials. Durch die Veränderungen des Schichtaufbaus gewinnen die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler unter anderem neue Erkenntnisse über die Mechanismen, wie Ladungsträger in diesen speziellen Perowskiten durch den Kristall transportiert werden.

Foto: Klaus Wiedenmann

**Impressum****Herausgeber**

Institut für Physik · Sonderforschungsbereich 484

Universität Augsburg · D-86135 Augsburg

Telefon: 0821 598 3104 · Telefax: 0821 598 3725

E-Mail: [sfb484.sekretariat@physik.uni-augsburg.de](mailto:sfb484.sekretariat@physik.uni-augsburg.de)

<http://www.physik.uni-augsburg.de/sfb484/>



Kooperative Phänomene im Festkörper:

Metall-Isolator-Übergänge und Ordnung mikroskopischer Freiheitsgrade

Projektbereich D: Komplexe Strukturen auf atomarer Skala

Projektbereich E: Dynamik mikroskopischer Freiheitsgrade

**Redaktion und Fotografie**

Thorsten Naeser

**Design**

HAAK & NAKAT, München | [www.haak-nakat.de](http://www.haak-nakat.de)

September 2007

## Inhalt:

<b>Einführung</b>	04
<b>Interview mit Prof. Dr. Dieter Vollhardt</b>	06

Teilprojekt D1: <b>Neue Perowskit-Verbindungen</b>	08
Teilprojekt D2: <b>Elektronen beim Grenzübertritt</b>	10
Teilprojekt D3: <b>Magnetismus im Lichte von Neutronen</b>	12
Teilprojekt D4: <b>Phänomene an Grenzflächen</b>	14
Teilprojekt D5: <b>Organische Elektronik: Neue Technik für flexible Bildschirme und intelligente Etiketten</b>	16
Teilprojekt D6: <b>Außergewöhnliches Verhalten von Elektronen an Grenzflächen</b>	18
Teilprojekt D7: <b>Wechselwirkungen im Stromfluss</b>	20

Teilprojekt E1: <b>Mikroskopische Magnetfelder in Festkörpern</b>	22
Teilprojekt E2: <b>Wandelbare Metalle</b>	24
Teilprojekt E3: <b>Wenn Elektronen kooperieren</b>	26
Teilprojekt E4: <b>Elektronenwolken im Ausnahmezustand</b>	28
Teilprojekt E5: <b>Störstellen mit positiven Effekten</b>	30
Teilprojekt E6: <b>Fingerabdruck wechselwirkender Elektronen</b>	32
Teilprojekt E7: <b>Neue Materialien für schnelle Speichermedien</b>	34

<b>Ansprechpartner und Leiter der Teilprojekte</b>	36
--	----

Südteil des Physik-Gebäudes der Universität Augsburg.



# Exotische Zustände in Festkörpern

Der Sonderforschungsbereich 484 am Institut für Physik der Universität Augsburg.

Selbst bei den tiefsten Temperaturen herrscht im Inneren von Metallen keine Ruhe. Insbesondere sind die Elektronen – negativ geladene Teilchen, die gleichzeitig auch als winzige Magnete wirken – stets in Bewegung. Sie bewegen sich mit hoher Geschwindigkeit (etwa 1000 km pro Sekunde) durch das kristalline Gitter positiv geladener Atome und stoßen sich dabei gegenseitig ab. Um die Auswirkungen dieser gegenseitigen Wechselwirkung auf die Eigenschaften des Metalls zu verstehen, müssen die Elektronen im Kollektiv betrachtet und die Gesetze der Quantenphysik berücksichtigt werden.

Systeme mit vielen wechselwirkenden Quanten-Teilchen verhalten sich je nach äußeren Bedingungen und Material ganz unterschiedlich. Zum Beispiel können sich die Magnetrichtungen der Elektronen räumlich anordnen („Magnetismus“) oder es kann zum Verlust der elektrischen Leitfähigkeit („Isolator-Verhalten“) bzw. umgekehrt zu einer völlig verlustfreien Stromleitung („Supraleitung“) kommen. Mittlerweile ist eine große Zahl zum Teil erstaunlicher („exotischer“) Ordnungszustände der Elektronen im Festkörper bekannt.

Wie derartiges Verhalten überhaupt entstehen kann und welche Konsequenzen sich daraus ergeben, wird von rund 70 Physikerinnen und Physikern des Sonderforschungsbereichs 484 „Kooperative Phänomene im Festkörper: Metall-Isolator-Übergänge und Ordnung mikroskopischer Freiheitsgrade“ an der Universität Augsburg untersucht. Ihr besonderes Interesse gilt dabei stromleitenden Materialien, die durch gezielte äußere Einflüsse, z. B. durch Absenkung der Temperatur, zum Isolator werden. Neben der Erforschung bereits bekannter Festkörpersysteme werden auch völlig neue Materialien entwickelt, in denen bisher unbekannte Eigenschaften elektronischen Verhaltens auftreten. Die Ergebnisse dieser Grundlagenforschung tragen dazu bei, neue elektronische Bauteile, wie Transistoren oder magnetische Speicher, zukünftig kleiner und leistungsfähiger zu machen und effizientere Materialien für energietechnische Anwendungen zu entwickeln.

Der Sonderforschungsbereich 484 wird seit dem Jahr 2000 von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) gefördert und in der derzeitigen Bewilligungsperiode 2006-2009 mit 5,3 Millionen Euro finanziert. Der Verbund besteht aus 15 Teilprojekten; acht der zehn festkörperphysikalisch bzw. festkörperchemisch ausgerichteten Lehrstühle des Instituts für Physik der Universität Augsburg sind daran beteiligt.

Im Jahr 2005 wurden dem Sonderforschungsbereich 484 erstmalig Mittel für die Betreuung von Kindern von Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern bewilligt; er spielt damit eine Vorreiterrolle in Deutschland.

Der Physiker Professor Dieter Vollhardt gibt Auskunft über den SFB 484.



Ende 2005 hat die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) den Augsburger Sonderforschungsbereich (SFB) 484 „Kooperative Phänomene im Festkörper: Metall-Isolator-Übergänge und Ordnung mikroskopischer Freiheitsgrade“ zum zweitenmal, diesmal für vier Jahre, verlängert. Der SFB erhält damit von der DFG eine weitere Finanzierung in Höhe von 5,3 Millionen Euro. Zum ersten Mal sind in der Förderung für die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler auch Mittel für die Betreuung von Kindern und für die Öffentlichkeitsarbeit enthalten. Im Interview gibt der Sprecher des Sonderforschungsbereichs, Professor Dieter Vollhardt, Auskunft über den SFB, woher man als Physiker frische Ideen bekommt und was man mitbringen sollte, wenn man Physik studieren will.

*Herr Professor Vollhardt, das Interesse des Sonderforschungsbereichs gilt dem physikalischen Innenleben von Metallen und wie man ihre elektrische Leitfähigkeit beeinflussen kann. Könnten Sie das näher erläutern?*

Ein Metall besteht aus einem Kristallgitter von Atomen, genauer gesagt Atomrümpfen, sowie Elektronen. Die Elektronen besitzen eine Ladung, aufgrund derer sie sich gegenseitig abstoßen, und eine magnetische Richtung, dem Spin. Wenn sich die Elektronen in dem Festkörper mehr oder minder frei bewegen und somit einen elektrischen Strom leiten können, handelt es sich um ein Metall. In den Systemen, die wir untersuchen, hängt die elektrische Leitfähigkeit empfindlich von äußeren Einflüssen wie dem Druck und der Temperatur ab. Insbesondere kann es dadurch zu einem Übergang von einem Metall zu einem Isolator kommen. Im SFB 484 untersuchen wir u. a. die Bedingungen, unter denen ein derartiger Metall-Isolator-Übergang zustande kommen kann.

*Wie erforscht die Augsburger Gruppe aus Theoretischen Physikerinnen und Physikern und Experimentalphysikerinnen und -physikern des SFB 484 solche Phänomene? Welche Wechselwirkungen gibt es zwischen Theorie und Experiment?*

Wie für die Naturwissenschaften typisch beruht jeder Erkenntnisgewinn in der Physik auf einer Kombination experimenteller und mathematisch-theoretischer Untersuchungen. Man spricht von „Experiment und Theorie“ als Fundament physikalischer Forschung. Dabei hat der Begriff „Theorie“ übrigens nichts mit „Beliebigkeit“ zu tun, wie man es aufgrund des geflügelten Worts „Grau ist alle Theorie“ meinen könnte. Denn theoretische Beschreibungen in der Physik basieren auf strengen Gesetzen. Experiment und Theorie arbeiten bei uns Hand in Hand: Experimentelle Ergebnisse werden durch Modelle beschrieben, deren weiterführende Konsequenzen wiederum durch Experimente bestätigt oder widerlegt werden müssen. Dabei sind wir in eine internationale Gemeinschaft von Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern eingebettet, die an ähnlichen Problemstellungen mit zum Teil unterschiedlichen Methoden arbeiten. Fragestellungen, die wir aufwerfen, oder Lösungen, die wir finden, werden international aufgegriffen.

*Was bedeuten die Ergebnisse für die Anwendungen?*

Unsere Ergebnisse werden dazu beitragen, die komplexen Eigenschaften moderner Materialien zu verstehen oder sogar vorherzusagen. Die Systeme und Materialien, die wir untersuchen, sind langfristig für viele Arten der Anwendung wichtig: Hier denke ich z. B. an Schalter,

Sensoren, Magnetspeicher oder Stromkabel. Diese Anwendungen sind allerdings nicht das primäre Ziel des SFB. Unser Forschungsverbund untersucht zunächst einmal die physikalischen Grundlagen, die zum großen Teil noch unverstanden sind.

*Sie machen also vor allem Grundlagenforschung. Auf was kommt es dabei an?*

Der Begriff Grundlagenforschung deutet schon an, dass hier zunächst einmal die Fundamente für zukünftige Entwicklungen gelegt werden müssen. Nehmen Sie zum Beispiel den Transistor, der Mitte des letzten Jahrhunderts entwickelt wurde. Dies war zunächst reine Grundlagenforschung, da man gar nicht wusste, wie so ein Teil funktioniert. Als man dann das Prinzip des Transistors verstanden hatte, revolutionierte er die Welt. Er hielt in jeden Haushalt Einzug und ist heute in fast allen technischen Geräten vom Radio bis zum Computer zu finden. Ohne Transistoren wäre unser heutiges Leben gar nicht mehr vorstellbar.

*Bleiben wir noch etwas bei der Forschung. Wie und woher erhalten Physikerinnen und Physiker frische Ideen?*

Durch Denken, Lesen, Diskutieren, Abschätzen, Ausprobieren, Experimentieren und dann noch einmal Nachdenken. Das gilt für die theoretische wie auch die experimentelle Physik. Wir Physiker kommunizieren intensiv und international, z. B. durch Veröffentlichungen, die täglich im Internet abrufbar sind, oder auf Konferenzen. Dies ermöglicht es uns, stets auf dem neuesten Stand der Forschung zu sein. Neue Ideen entstehen durch eine Kombination von Information, die von außen kommen, und ihrer gedanklichen Verarbeitung. Häufig ist auch etwas Glück im Spiel. Das Wort „Spiel“ ist hier durchaus ernst zu nehmen. Neue Ideen entstehen im Labor oder auf dem Papier häufig aus dem zweckfreien Versuch, Ideen spielerisch umzusetzen.

*Wer sollte Physik studieren und was geben Sie ihren Physik-Studentinnen und -Studenten mit auf den Weg?*

Wer die fundamentalen Prinzipien der Natur und ihre Konsequenzen verstehen möchte, wird sich an Physik begeistern können. Es sollten sich solche Studentinnen und Studenten mit Physik beschäftigen, die Freude an grundlegenden Erkenntnissen, neuen Ideen und ihrer mathematisch-theoretischen bzw. apparativ-experimentellen Erforschung haben. Physiker müssen es lieben zu experimentieren, Modelle zu entwickeln, zu rechnen. „Liebe“ ist hier tatsächlich das richtige Wort – man muß begeistert sein von dem, was man tut, und mit starkem geistigen und zeitlichen Einsatz an einem Problem forschen. Dabei darf man sich nicht von Misserfolgen entmutigen lassen. Es gehört auch Mut zum Ausprobieren und Testen völlig neuer Ideen dazu, die evtl. der Lehrmeinung zuwider laufen. Neue, unkonventionelle Ideen sind die Voraussetzung für erfolgreiche Forschung.

*Zum ersten Mal hat die DFG auch Gelder für die Kinderbetreuung der Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler des SFB 484 mit eingeplant. Wie setzen Sie diese Fördermittel ein?*

Zum einen hat uns die Universität Augsburg im Rahmen des Verlängerungsantrags des SFB 484 sehr geholfen, indem sie zusätzlich zu der existierenden Kinderbetreuung eine halbe Stelle für eine Fachkraft zur Verfügung gestellt hat, so dass Kinder von SFB-Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern nun von 8 bis 17 Uhr betreut werden können. Zum anderen hat uns die DFG Mittel für die Aufstockung von Arbeitsverträgen von Erzieherinnen bewilligt. Damit können wir SFB-Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern mit kleinen Kindern im Alter bis zu sechs Jahren die wissenschaftliche Arbeit erleichtern. Dies betrifft insbesondere die Betreuung der Kinder während der Ferien. Das Angebot ist auf starke Resonanz gestoßen. Der Augsburger SFB hat mit diesem Beispiel Schule gemacht.

*Das Interview führte Thorsten Naeser.*

Im Teilprojekt D1 erkunden Festkörperchemikerinnen und -chemiker die Eigenschaften von Kristallen für elektronische Anwendungen.

Kleiner und leistungsfähiger. Das ist der Trend, der in Bauteilen für die Elektronik unaufhaltsam ist. Ein Weg zu diesem Ziel führt über neue Materialien, die in der Natur nicht vorkommen und erst von Materialforschern erschaffen werden. Im Teilprojekt D1 des Sonderforschungsbereichs 484 untersuchen Chemiker Oxide vom Perowskit-Typ.

Ursprünglich benannte man ein Mineral mit dem Namen Perowskit, heute jedoch werden alle Oxide, die sich von diesem grundlegenden mineralischen Strukturtyp ableiten, als Perowskite bezeichnet. Oxide wiederum sind Verbindungen von Metallen mit Sauerstoff. Perowskite werden unter anderem als elektronische Bauteile in Kondensatoren, als Supraleiter oder als Katalysatoren eingesetzt. Durch die Produktion und Untersuchung neuer Verbindungen wollen die Augsburger Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler eine Verbesserung dieser Bauteile erreichen. Üblicherweise werden Perowskite hergestellt durch Reaktionen von Festkörpern, die aus einfachen Oxiden bestehen. Dabei müssen Temperaturen von rund 1000 °C eingesetzt werden.

Ein Ziel der Augsburger Festkörperchemikerinnen und -chemiker ist es nun, durch Verwendung neuer Synthesemethoden, diese Reaktionstemperaturen stark herabzusetzen. Dadurch können die Forscherinnen und Forscher neue Verbindungen herstellen, die bei 1000 °C nicht mehr stabil wären. Viele physikalische und chemische Eigenschaften, wie der Magnetismus und die elektrische Leitfähigkeit lassen sich durch unterschiedliche Partikelformen verändern. Durch unterschiedliche Herstellungsverfahren können die Forscherinnen und Forscher diese Eigenschaften beeinflussen. Zum Beispiel zeigen Nanopartikel von Magnetit ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) ein ganz anderes magnetisches Verhalten als wenn das Material in größeren Teilchen angeordnet ist.

Für die Untersuchung und die Bestimmung der Eigenschaften der neuen Perowskit-Verbindungen muss ihre Kristallstruktur untersucht werden. Um die für diese Untersuchungen benötigten Kristalle zu erhalten, werden die Verbindungen etwa durch das so genannte optische Zonenschmelzen hergestellt. Dabei fokussieren die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler die Strahlungsenergie spezieller Lampen mittels vergoldeter Hohlspiegel auf einen sehr kleinen Brennpunkt. Dort herrschen dann Temperaturen von über 2000 °C, sodass die Proben schmelzen und auskristallisieren. Mit dieser Technik erhalten die Forscherinnen und Forscher Kristalle von mehreren Zentimetern Länge und etwa fünf Millimetern Durchmesser.



**Abbildung 1:** Sorgfältig justiert der Physiker Michael Weigl im Quarzrohr vor ihm eine Probe aus Strontiumtantalat.

**Abbildung 2:** Das Material ist polykristallin, sein Innenleben besteht also aus sehr kleinen Kriställchen in den verschiedensten Anordnungen. Anschließend schließt Weigl die beiden vergoldeten Hohlspiegel, die man hinter dem Quarzrohr erkennt. Dann werden zwei starke Lichtstrahlen auf die Probe fokussiert, wodurch sie sich auf über 2000 °C erhitzt, an der heißesten Stelle schmilzt und nach dem Abkühlen kristallisiert. Dadurch erhält man aus dem polykristallinen Ausgangsmaterial einen Kristall, in dem alle Atome regelmäßig angeordnet sind.

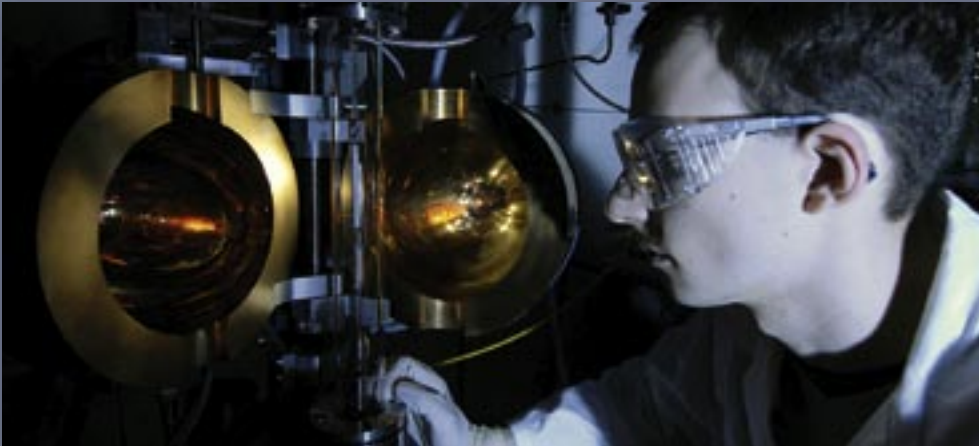


Abb. 1

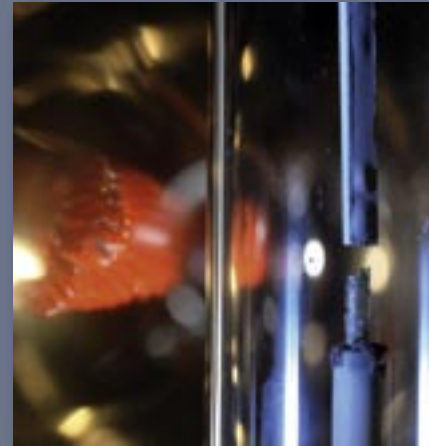


Abb. 2

Diese Kristalle werden nun mit der Strukturanalyse untersucht. Dabei beschließen die Festkörperchemikerinnen und -chemiker die Proben mit Röntgen- und Neutronenstrahlen. Die Strahlen werden je nach Element unterschiedlich gestreut und es ergibt sich ein charakteristisches Beugungsbild des Materials. Aus diesem Beugungsbild rekonstruieren die Forscherinnen und Forscher die Anordnung und Verknüpfung der verschiedenen Atome, also die Kristallstruktur der Perowskit-Probe. Mit Hilfe der Transmissionselektronenmikroskopie können die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler zudem einzelne Atome erkennen und damit Besonderheiten in dem Material, wie etwa Defekte, aufdecken.

Eine weitere wichtige Untersuchungsmethode ist die thermische Analyse. Dabei werden einige Milligramm der Probe unter verschiedenen Gasatmosphären aufgeheizt und etwaige Gewichtsveränderungen durch chemische Reaktionen aufgezeichnet. Neben den Untersuchungen am Augsburger Institut werden auch Experimente am Deutschen Elektronensynchrotron DESY, der Schweizer Neutronenspallationsquelle SINQ oder dem Forschungsreaktor FRM II in Garching bei München durchgeführt. Bei allen Untersuchungen der Forscherinnen und Forscher geben die Perowskit-Verbindungen stets aufs Neue überraschende physikalische und chemische Eigenschaften preis, die zukünftig dazu beitragen können, Bauteilen in der Elektronik eine noch größere Leistungsfähigkeit zu entlocken.

Die Physikerinnen und Physiker des Teilprojekts D2 analysieren, wie Elektronen die Grenze zwischen zwei verschiedenen Materialien überwinden.

Elektronische Bauelemente von der Größe einiger Nanometer, d. h. einiger Milliardstel Meter, erlauben es, Schaltvorgänge mit enormer Geschwindigkeit durchzuführen. Damit sind sie weitaus schneller als die Rechengänge in zurzeit erhältlichen Prozessoren in PCs und Laptops. Die Qualität der Bauelemente hängt entscheidend davon ab, wie leicht die Elektronen und somit der elektrische Strom die Grenzflächen zwischen verschiedenen Materialkomponenten überwinden können. Wie Elektronen diese Grenzübertritte vollziehen, untersuchen die Physikerinnen und Physiker im Teilprojekt D2. Dabei kommen vor allem numerische Methoden, also Computer-Programme, zum Einsatz.

Untersucht werden insbesondere die Mechanismen des Stromtransports in Bauelementen, die auf Hochtemperatur-Supraleitern basieren. Die Optimierung der Grenzflächen in diesen Materialien, der so genannten Korngrenzen, ist auch eine wichtige Voraussetzung für ihre Einsetzbarkeit in energiesparenden und umweltfreundlichen Kabeln, die mit möglichst geringem Verlust den Strom vom Erzeuger zum Verbraucher transportieren sollen.

Die Funktionalität elektronischer Bauelemente, die oft nur wenige Nanometer groß sind, beruht ganz wesentlich auf der Kombination verschiedener, geeigneter Materialien. Um einen Stromfluss zu erzeugen, müssen Elektronen von einem Material in ein anderes wechseln. Einerseits ist dieser Prozess entscheidend für die Funktionsfähigkeit der Bauelemente, andererseits passen zwei verschiedene Materialien nie perfekt zusammen: In der Nähe der Grenzschicht zeigen sich winzige, aber spürbare Verschiebungen der Atome. Die elektronische Ladung wird umverteilt, und die Elektronen suchen sich neue Wege beim Stromfluss. Nicht zuletzt entstehen bei den Grenzübertritten Energieverluste. Je geringer man die Energieverluste halten kann, desto effizienter kann Strom verschickt und für Schaltvorgänge genutzt werden.

Genau für solche Grenzschichten interessieren sich die Physikerinnen und Physiker des Teilprojekts D2. Mit Hilfe ausgefeilter Computer-Programme untersuchen sie die elektronische Struktur, also die genaue Lage der Ionen und die Verschiebung der Elektronen in der Nähe der Grenzschichten, welche experimentell nur schwer zugänglich sind.

Um die grundlegenden Ideen für den Stromfluss über Grenzschichten zu entwickeln, haben die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler eine Grenzfläche zwischen einem Hochtemperatur-Supraleiter, dem so genannten YBCO (chemische Formel:  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ , daher die Abkürzung YBCO), und dem – nach dem Planetoiden Pallas benannten – Metall Palladium (chemische Formel: Pd) gewählt. Hochtemperatur-Supraleiter bestehen zu einem Teil aus Ebenen aus Kupfer-Dioxid ( $\text{CuO}_2$ ), die für die Supraleitung verantwortlich sind. Je nachdem wie die  $\text{CuO}_2$ -Ebenen und das Palladium zueinander in dem Bauelement angeordnet sind, ergeben sich im Grenzbereich völlig verschiedene Ladungsverteilungen. Ist die Anordnung zum Beispiel parallel, verschieben sich die Elektronen vom Supraleiter in das Metall.

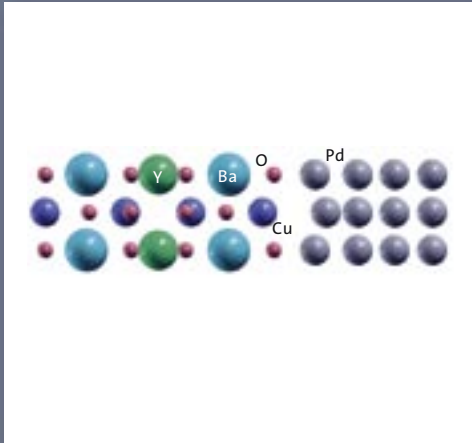


Abb. 1

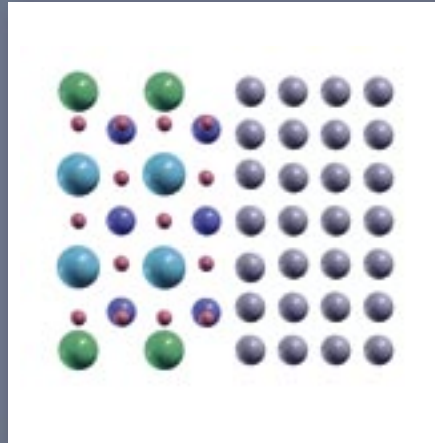


Abb. 2

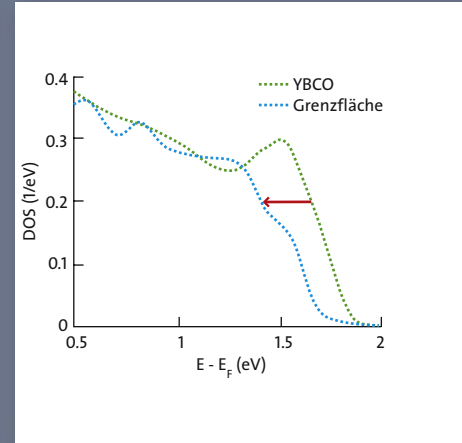


Abb. 3

Dieses neue Ergebnis der Theorie erklärt eine wichtige experimentelle Beobachtung, die bereits vor rund sieben Jahren in einem anderen Teilprojekt des Sonderforschungsbereichs gemacht wurde: In dem Experiment konnte gezeigt werden, dass sich die Leitfähigkeit einer Korngrenze entscheidend verbessern lässt, indem man geeignete Fremdatome einbringt, die zusätzliche Elektronen freisetzen und so den Verlust ausgleichen.

Bei den theoretischen Untersuchungen des Teilprojekts D2 ist von großer Bedeutung, dass man die genauen Positionen der Ionen in den beiden Materialien bestimmt und auch die abstoßende Wechselwirkung der Elektronen untereinander in die Berechnungen einbezieht. Abbildung 1 zeigt das Ergebnis dieser so genannten Struktur-Optimierung. Charakteristisch ist die Vergrößerung des Abstands zwischen Kupfer (Cu) und Palladium (Pd) sowie die Annäherung von Sauerstoff (O) und Palladium.

Neben der parallelen Anordnung betrachten die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler zum Vergleich auch die senkrechte Anordnung, bei der die  $\text{CuO}_2$ -Ebenen des Supraleiters senkrecht zur Grenzfläche angeordnet sind (Abbildung 2). Aus den Struktur-Daten lässt sich insbesondere eine zentrale Größe berechnen, die so genannte Zustandsdichte (englisch: Density of States, kurz DOS). Sie gibt an, wie viele Elektronen bei einer bestimmten Energie zu finden sind. Eine Verringerung der Zustandsdichte und damit der Elektronenzahl ist dabei mit einer Abnahme der Leitfähigkeit verbunden. In Abbildung 3 ist zu erkennen, wie sich die Ladungen vom Supraleiter in das Metall verschieben (parallele Anordnung). Aus der Fläche zwischen der grünen und der blauen Kurve ergibt sich die Ladungsumverteilung zu 13 % einer Elementarladung pro Kupfer-Atom – in sehr guter Übereinstimmung mit der oben erwähnten experimentellen Beobachtung.

Mit diesen Ergebnissen haben die Forscherinnen und Forscher wichtige Fortschritte zum Verständnis des Stromflusses über Grenzschichten erzielt. In darauf aufbauenden Arbeiten sollen, in enger Kooperation mit den experimentellen Gruppen im Sonderforschungsbereich, weitere Anwendungsmöglichkeiten in Bauelementen ausgelotet werden.

Die Forscherinnen und Forscher im Teilprojekt D3 untersuchen kleinste physikalische Veränderungen in Materialien, die große Auswirkungen auf ihre Gesamteigenschaften haben können.

Magnetische Eigenschaften von Materialien, die durch die darin enthaltenen magnetischen Ionen bestimmt werden, sind unterschiedlichen und miteinander konkurrierenden Wechselwirkungen ausgesetzt. Dominiert eine bestimmte Wechselwirkung, führt das normalerweise zu einem magnetisch geordneten Zustand bei tiefen Temperaturen. Bei bestimmten geometrischen Anordnungen der magnetischen Ionen kann der Fall auftreten, dass sich die unterschiedlichen Wechselwirkungen gegenseitig aufheben. Das wird als Frustration bezeichnet. Solche frustrierten Systeme zeigen oft ungewöhnliche Eigenschaften, die daraus resultieren, dass sehr kleine Änderungen physikalischer Parameter zu einer sehr großen Änderung im subtilen Gleichgewicht der konkurrierenden Wechselwirkungen führt. So können z. B. ein kleines äußeres Magnetfeld oder ein geringer von außen angelegter Druck zu drastischen Änderungen in den Materialeigenschaften führen. Solche Effekte sind Gegenstand der aktuellen Forschung im Teilprojekt D3.

Die aus Schwefel und den Metallen Eisen und Scandium aufgebaute Verbindung  $\text{FeSc}_2\text{S}_4$  ist ein hervorragendes Beispiel eines frustrierten Systems. Bei ihm dominiert keine der vorhandenen Wechselwirkungen, dadurch bleibt ein dynamischer, ungeordneter Grundzustand bis zu Temperaturen nahe dem absoluten Nullpunkt stabil. Dieser magnetische Zustand von  $\text{FeSc}_2\text{S}_4$  wurde mittels Neutronenstreuung untersucht. Hierzu bringen die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler die Probe in einen Strahl von Neutronen. Da Neutronen elektrisch nicht geladen sind, durchdringen die allermeisten von ihnen einfach die Probe ohne Wechselwirkungen einzugehen.

Im Falle magnetischer Proben bewirkt jedoch eine zusätzliche schwache Wechselwirkung zwischen den magnetischen Momenten der Probe und des Neutrons, dass ein kleiner Teil der einfallenden Neutronen von der ursprünglichen Flugrichtung abgelenkt, d. h. gestreut wird. Wie in Abbildung 1 schematisch gezeigt, ist hinter der Probe ein Detektor angebracht, der die Zahl der Neutronen misst, die durch Streuprozesse in der Probe um einen bestimmten Winkel (dem Streuwinkel) abgelenkt wurden. Der Streuwinkel enthält Informationen über atomare Abstände. Zusätzlich analysiert die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler, ob die gestreuten Neutronen Energie an die Probe abgegeben oder von ihr aufgenommen haben. Die detektierte Anzahl gestreuter Neutronen bezeichnet man als Streuintensität. In einem vollständig ungeordneten System sollte die Intensität gleichmäßig über alle Streuwinkel verteilt sein, während in einem geordneten System bei bestimmten Winkeln (entsprechend den charakteristischen Abständen einer geordneten Struktur) Maxima in der Streuintensität beobachtbar sein sollten.

Ein wesentliches Ergebnis dieser Untersuchung ist in Abbildung 2 dargestellt. Sie ist entnommen aus der Originalveröffentlichung A. Krimmel *et al.*, Phys. Rev. Lett. **94**, 237402 (2006). Die horizontale Achse des Bildes wird durch den Streuwinkel bestimmt und die vertikale Achse entspricht der Energieänderung der auf die Probe fallenden Neutronen. Verschiedene Intensitäten sind durch unterschiedliche Farben dargestellt. Der horizontale, dunkelrote Balken zeigt daher Streuprozesse ohne Energieänderung, die im vorliegenden Fall keine Rolle spielen. Darüber hinaus findet man zusätzliche Intensitäten, welche im

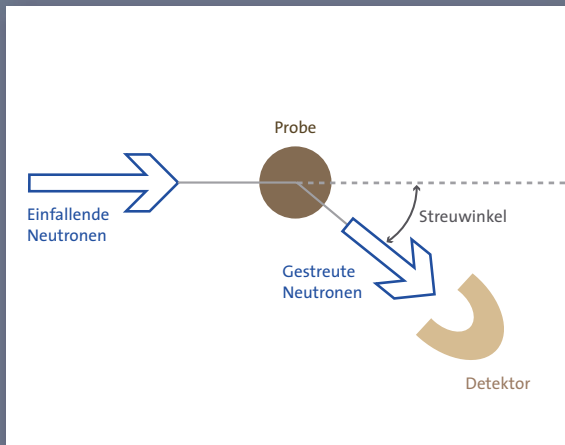


Abb. 1

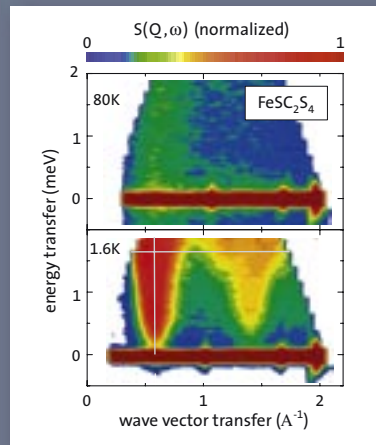


Abb. 2

oberen Bildteil bei  $T=80$  K relativ diffus in der Energie verteilt sind, aber dennoch bereits eine Zentrierung in Abhängigkeit des Streuwinkels zeigen. Beim Abkühlen zeigen sich deutliche Strukturen der magnetischen Streuintensität (unteres Teilbild bei  $T=1.5$  K).

Solch ausgeprägte Maxima und Minima der Streuintensität für bestimmte Streuwinkel entsprechen normalerweise kollektiven Anregungen in einem magnetisch wohl geordneten Kristall. Eine Besonderheit ist das Auftreten einer kleinen Energielücke. Das bedeutet, dass die Streuintensität für kleine Energieüberträge auf nahezu null absinkt, weil es keine physikalischen Anregungsprozesse mit einer entsprechenden Energie gibt. In der Abbildung spiegelt sich dieser Sachverhalt wider, insofern die ausgeprägten magnetischen Streuintensitäten bei 1.5 K nicht ganz bis zum dunkelroten horizontalen Balken hinabreichen. Für größere Energieüberträge zeigt sich dagegen eine starke Streuintensität (im unteren Teilbild in rot und gelb dargestellt). Solch eine Energielücke im magnetischen Anregungsspektrum kann als eine Signatur eines Flüssigkeitszustandes interpretiert werden.

Die Zustände fest, flüssig und gasförmig von Wasser sind wohlbekannt. Eine magnetisch wohlgeordnete, periodische Struktur entspricht einem magnetischen Festkörper. Im Falle von  $\text{FeSc}_2\text{S}_4$  entsteht dagegen aufgrund unterschiedlicher konkurrierender Wechselwirkungen ein dynamisch ungeordneter Grundzustand, der als eine magnetische Flüssigkeit aufgefasst werden kann. Bei einer Mittelung über sehr viele Atome erscheint das Material einfach unmagnetisch. Untersucht man den Magnetismus aber auf atomarer Skala mit Hilfe von Neutronen, so erkennt man bereits Anzeichen einer einsetzenden Ordnung. Das gilt allerdings nur für mit Energieauf- und Abnahme verbundene dynamische Prozesse, da ein magnetisch geordneter Gleichgewichtszustand durch die Frustration unterdrückt wird.

Frustrierte Systeme erlauben also das Zustandekommen geordneter Strukturen im Detail zu studieren, wobei kleine Änderungen der äußeren Bedingungen drastische Änderungen in den Materialeigenschaften hervorrufen können. Bei fortschreitender Miniaturisierung in der Mikroelektronik bis hinab zu atomaren Größen sind solche Effekte in zunehmendem Maße zu berücksichtigen.

Die Physikerinnen und Physiker des Teilprojekts D4 erkunden hauchdünne Elektronensysteme.

Fügt man zwei Schichten aus verschiedenen isolierenden Oxiden zusammen, so kann sich zwischen ihnen eine Grenzschicht mit besonderen Eigenschaften bilden. Die Grenzschicht ist wenige Nanometer dick und sehr gut leitfähig (ein Nanometer ist ein Milliardstel Meter). Innerhalb der leitfähigen Grenzschicht sind die Elektronen sehr beweglich und schnell. Dabei bewegen sie sich entlang der Grenzfläche. Die Physikerinnen und Physiker des Teilprojekts D4 des Sonderforschungsbereichs untersuchen die Phänomene, die sich an diesen Grenzflächen abspielen.

Bei ihren Experimenten untersuchen die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler die Grenzflächen zwischen zwei Oxiden ( $\text{SrTiO}_3$  und  $\text{LaAlO}_3$ ). Dazu stellen sie mittels eines UV-Lasers aus diesen Materialien Mehrlagenschichten her (siehe Abbildung 2), deren Schichtdicke, Zusammensetzung und Abfolge sie auf der atomaren Skala exakt einstellen können (siehe Abbildung 1).

Die bisherigen Ergebnisse der Untersuchungen haben nun gezeigt, dass sich die Leitfähigkeit der Grenzfläche mit der Dicke der oberen Schicht aus  $\text{LaAlO}_3$  sprunghaft ändert. Mit ein, zwei oder drei Kristalllagen aus  $\text{LaAlO}_3$  bildet sich eine stark isolierende Grenzschicht. Eine Kristalllage ist hierbei 0,4 Nanometer dünn. Beträgt die Dicke allerdings vier Kristalllagen, wird die Grenzschicht schlagartig sehr gut leitfähig.

Da das Elektronengas in den Kristallen mit drei Lagen perfekt isolierend, aber gleichzeitig an der Schwelle zur Leitfähigkeit ist, lässt es sich für die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler sehr leicht leitfähig schalten, indem sie eine elektrische Spannung senkrecht zur Grenzfläche anlegen. Auf diese Weise lässt sich die gesamte Anordnung als Transistor verwenden, der dann als Verstärker und Schalter von elektrischen Strömen dient.

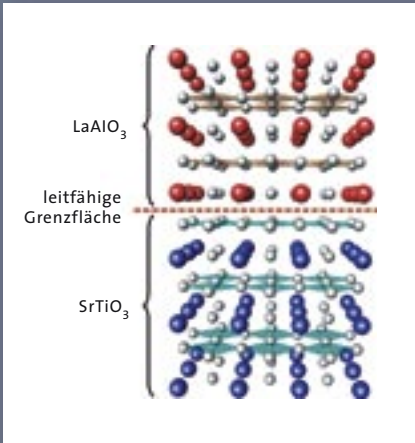


Abb. 1



Abb. 2

Den im Teilprojekt mitwirkenden Forscherinnen und Forschern ist es zudem gelungen, bei solchen Schaltprozessen die Leitfähigkeit der zunächst isolierenden Grenzschicht um den Faktor zehn Millionen zu erhöhen. Bei diesem Versuch wurde das Umschalten an der Grenzschicht von einem so genannten Quantenphasenübergang ausgelöst, der die Leitfähigkeit der Grenzschicht steuert. Die Elektronen der Grenzschicht sind hochbeweglich und sehr schnell, ihre Geschwindigkeit ist fast vergleichbar zur Geschwindigkeit der Elektronen in schnellen halbleitenden Transistoren.

Da die Forscherinnen und Forscher diese Eigenschaften der Elektronen an den Grenzschichten jetzt hervorragend steuern können, eröffnen ihre Untersuchungen neue Perspektiven zur Herstellung schnellerer und kleinerer Bauelemente (siehe Abbildung 3).

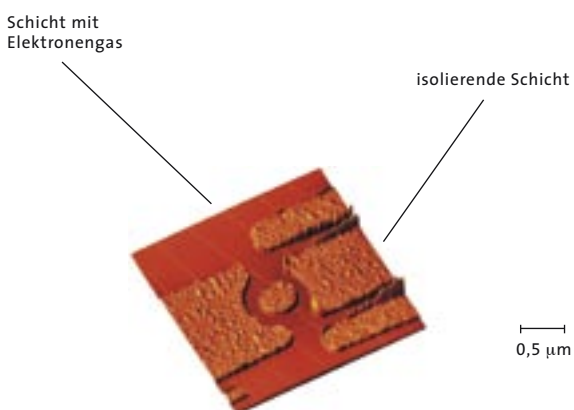


Abb. 3

Die Physikerinnen und Physiker des Teilprojekts D5 erforschen organische Halbleitermaterialien.

Kunststoffe sind aus dem Alltag nicht mehr wegzudenken. Sie sind leicht, flexibel und gut zu verarbeiten. Im Bereich der Elektronik und der Optoelektronik spielten diese Substanzen bis vor wenigen Jahren kaum eine Rolle. Die Industrie verwendete vor allem anorganische Halbleitermaterialien, wie Silizium, das für das Funktionieren der Mikroprozessoren und Speicherbausteine von Computern verantwortlich ist. Doch dieses Paradigma scheint sich zu wandeln. Seit kurzem zeichnen sich gute Perspektiven für den Einsatz von organischen Halbleitermaterialien ab, etwa bei organischen Leuchtdioden (OLEDs) für Flachbildschirme und Beleuchtungszwecke oder bei organischen photovoltaischen Zellen für die Umwandlung von Sonnenlicht in elektrischen Strom. Die Physikerinnen und Physiker des Teilprojekts D5 interessieren sich darüber hinaus für organische Feldeffekt-Transistoren (OFETs) als Grundbaustein elektronischer Schaltungen. Die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler wollen verstehen wie der Ladungstransport in diesen Transistoren abläuft und wie sie ihn kontrollieren können.

Organische Feldeffekttransistoren wurden erstmals Mitte der 80er Jahre in der Literatur beschrieben. Sie bestehen aus einer nur wenige hundert Nanometer dünnen Isolatorschicht, dem Dielektrikum, einer ebenso dünnen organischen Halbleiterschicht sowie drei in der Regel metallischen Elektroden (siehe Abbildung 1). Legt man an die Steuerelektrode eine Spannung an, so werden wie bei einem Kondensator in dem an das Dielektrikum angrenzenden Medium Ladungsträger erzeugt. Das bedeutet für die OFETs, dass die ersten Moleküllagen der organischen Schicht an der Grenzfläche zum Isolator geladen werden. Somit kann nun ein Strom zwischen den anderen beiden Elektroden fließen. Durch diesen sogenannten Feldeffekt lässt sich also der Stromfluss in einfacher Weise an- und ausschalten. Dabei wird die Schaltgeschwindigkeit des Transistors neben der Geometrie des Bauelements, also der Schichtdicke des Isolators und dem Elektrodenabstand, vor allem durch die Beweglichkeit der Ladungsträger in der organischen Schicht bestimmt.

Organische Dünnschichttransistoren erreichen heute Beweglichkeitswerte, die vergleichbar mit amorphem Silizium oder sogar höher sind. Damit werden diese Bauelemente interessant für elektronische Anwendungen, wobei insbesondere die Möglichkeit des Druckens der Materialien für die kostengünstige Massenproduktion von elektronischen Schaltungen attraktiv erscheint. Potentielle Anwendungen liegen beispielsweise bei flexiblen Displays oder der Radiofrequenz-Identifikation (RFID). Für derartige elektronische Etiketten, die über Funk ausgelesen werden können, gibt es zahlreiche Anwendungen im Bereich der Produktidentifikation oder der Logistik

Das Verständnis der physikalischen Prinzipien, die in diesen Feldeffekt-Transistoren herrschen, ist bis heute sehr begrenzt. Dies liegt an den Besonderheiten des Ladungstransports in den organischen Halbleitern, aus denen die Transistoren aufgebaut sind. Im Gegensatz zu kristallinen Halbleitern wie Silizium haben organische Halbleiter eine andere Kristallstruktur oder sie liegen als ungeordnete oder polykristalline Schichten vor. Zudem ist die Wechselwirkung zwischen den benachbarten Molekülen sehr schwach, sodass die Ladungsträger sich auf einzelnen Molekülen festgesetzt haben und sich nur durch thermisch unterstützte Hüpfprozesse von einem Platz zum nächsten bewegen. Im Gegensatz zu Metallen und



**Abbildung 1:** Schematischer Aufbau eines organischen Feldeffekt-Transistors. **Abbildung 2, 3:** Das halbleitende Polymer Poly (3-hexylthiophen) (P3HT) bildet eine lamellenartige Struktur in organischen Feldeffekt-Transistoren aus. Misst man den Ladungstransport parallel und senkrecht zur Oberfläche des Bauelements erhält man deswegen erhebliche Unterschiede, wie die Messkurven deutlich zeigen.

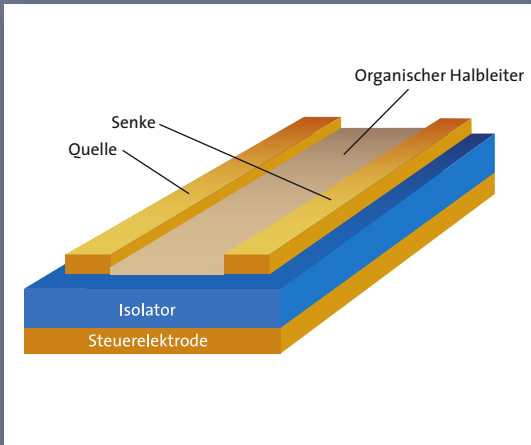


Abb. 1

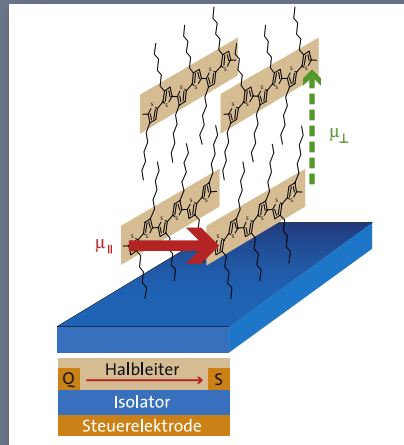


Abb. 2

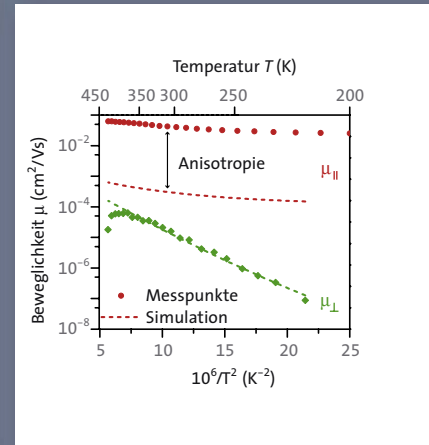


Abb. 3

anorganischen Halbleitern nimmt also der Strom in organischen Halbleitern beim Erwärmen zu. Daneben hängt die Beweglichkeit der Ladungsträger, also der Elektronen oder der Löcher, auch noch von der angelegten elektrischen Feldstärke ab und zudem von der Anzahl der Ladungsträger in dem Material. Somit bestimmen sowohl externe und wie auch interne Faktoren den Ladungsträgertransport und damit den Stromfluss in den organischen Dünnschichten (siehe Abbildung 2 und 3).

Was nun genau in den organischen Halbleitermaterialien beim Ladungstransport passiert, studieren die Augsburger Physikerinnen und Physiker anhand der von ihnen präparierten Feldeffekt-Transistoren mit unterschiedlichen anorganischen Isolatoren. Die Forscherinnen und Forscher können über die Spannung, die sie an die Transistoren anlegen und vor allem die Dielektrizitätskonstante (DK) des Isolators steuern, wie viele Elektronen sich im Kanal des Transistors befinden. Anorganische Dielektrika haben dabei den Vorteil, dass sie sehr hohe Dielektrizitätskonstanten von bis zu 100 oder bei tiefen Temperaturen auch weit darüber hinaus besitzen können (zum Vergleich: Luft hat eine DK von 1).

Damit sollte es möglich sein, durch eine angelegte Steuerspannung so viele Ladungsträger in der organischen Schicht zu erzeugen, dass jedes Molekül an der Grenzfläche zum Dielektrikum eine Ladung trägt. Dieser Zustand, der bisher noch von keiner Forschergruppe erreicht wurde, eröffnet eine Reihe interessanter Möglichkeiten. So stellt man sich die Frage, wie sich diese eng benachbarten Ladungsträger gegenseitig beeinflussen und welche Auswirkungen dies auf den Ladungstransport hat. Daneben haben anorganische Dielektrika auch noch ganz praktische Vorteile: sie erlauben niedrigere Schaltspannungen und höhere Ströme in den Transistoren.

Das Studium dieser Fragen erfordert eine sehr sorgfältige Präparation der Grenzfläche zwischen dem organischen Halbleiter und dem anorganischen Dielektrikum sowie den Kontakten. Da der Stromfluss hauptsächlich innerhalb der ersten Moleküllagen stattfindet, spielen Details der elektronischen Struktur an den Grenzflächen und das Wachstum der organischen Filme eine wichtige Rolle. Den Einfluss dieser Parameter auf den Ladungstransport zu verstehen und zu kontrollieren, ist ein wichtiges Ziel im Teilprojekt D5.

Die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler des Teilprojekts D6 erforschen inhomogene Elektronensysteme.

Die faszinierendsten Eigenschaften von Festkörpern, wie supraleitende und magnetische Phasen, werden durch quantenmechanische Spielregeln verursacht, die das kollektive Verhalten von Elektronen bestimmen. Aber selbst ein einfaches elektronisches Halbleiterbauelement wie der Transistor, erhält seine Funktionalität, nämlich das Schalten von Strömen, erst durch das quantenmechanisch geregelte Verhalten der Elektronen an Grenzflächen von Halbleitern. Während das Verhalten der Elektronen in Halbleitern seit Jahrzehnten gut bekannt ist, hat sich in den letzten Jahren ein neues Forschungsfeld etabliert, das sich mit Grenzflächen aus Oxiden von Übergangsmetallen wie Kupfer, Titan, Kobalt und Mangan beschäftigt. Diese Materialklassen (Kuprate, Titanate, Kobaltate und Manganate) zeigen neuartige Eigenschaften, die in einfachen Metallen und Halbleitern nicht beobachtet werden, wie unkonventionelle Supraleitung oder ungewöhnliche magnetische Zustände.

Es stellt sich nun die Frage, ob neuartige Bauelemente entwickelt werden können, die auf diesen Materialien basieren. Genau dieser Aufgabe widmen sich die Physikerinnen und Physiker des Teilprojekts D6 in enger Zusammenarbeit mit den Teilprojekten D2 und D4 des Sonderforschungsbereichs. Die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler modellieren dazu das quantenmechanische Verhalten der Elektronen an solchen Grenzflächen. Sie erforschen, ob diese Elektronen kollektiv in einen Zustand übergehen. Experimentell hat man bereits gefunden, dass an der Grenzfläche zwischen zwei Metallen ein isolierender Zustand und an der Grenzfläche von zwei Isolatoren ein metallisch leitender Zustand gebildet werden kann.

Wie kann man sich dies vorstellen? Eine Autobahn, die fast verkehrsfrei ist, erlaubt freie Fahrt, genauso wie ein metallischer Zustand freie Elektronenbewegung erlaubt. Bei hohem Verkehrsaufkommen können sich Staus bilden, insbesondere wenn die Fahrer sehr nervös auf das Fahrverhalten der anderen reagieren. Dies entspricht dann in diesem einfachen Bild dem Übergang in einen Isolatorzustand durch „Korrelationen“, also gegenseitige Beeinflussung der Elektronen. Wenn sich nun zwei Autobahnen kreuzen, kann es dort zu neuem, komplexen Verhalten der Fahrer kommen. Dies kann von den Verkehrsbedingungen abhängen, zum Beispiel Baustellen, Ampeln, Überholspuren und anderen Details. Ähnlich ist es an der Grenzfläche von zwei Materialien: mikroskopische Unebenheiten und Versetzungen des Kristallgitters, elektrische Felder oder neue Wechselwirkungen können dort die Eigenschaften der Elektronen dramatisch verändern.

Ein besonders einfaches Modell für eine Grenzfläche ist in Abbildung 1 skizziert. Sie wird hier aus zwei übereinander liegenden Ebenen gebildet: einer Ebene mit grünen Kugeln und einer Ebene mit blauen Ovalen. Die grünen Kugeln deuten eine Verteilung von Elektronen in einer Kupfer-Sauerstoff-Schicht eines Kuprats an. In dieser Momentaufnahme sitzen sie auf den Gitterplätzen des Kristalls. Jedoch können sie von Gitterplatz zu Gitterplatz „springen“, weichen sich aber dabei in einer komplexen, quantenmechanisch bestimmten Weise aus und beeinflussen dadurch das Verhalten der Ladungsträger in der darüber liegenden Schicht. In diesem speziellen Fall soll durch die darüber liegende blaue Schicht ein Titanat

**Abbildung 1:** Grenzflächenmodell, bei dem ein Metall mit einem Dielektrikum zusammengefügt sind: die Elektronen auf dem Gitter sind als grüne Kugeln dargestellt und die Dipole des Dielektrikums als blaue Ovale.

**Abbildung 2:** Atomare Lagen an einer Grenzfläche (links oben). Die atomare Konfiguration ist im rechten oberen Bild für einen kleinen Abschnitt gezeichnet. Das untere Bild gibt die berechnete Ladung wieder, die sich über die Grenzfläche aufgebaut hat. Dieses „Ladungsprofil“ zeigt, dass die Grenzfläche metallisch geworden ist, obwohl zwei Isolatoren zusammengefügt wurden. In entfernteren Lagen ist die Ladungsdichte dagegen sehr klein, und diese Lagen sind elektrisch isolierend. Der Abstand von der obersten gezeichneten  $\text{TiO}_2$ -Lage wird in Ångström (Å) gemessen, was ein zehnmillionstel Millimeter darstellt.

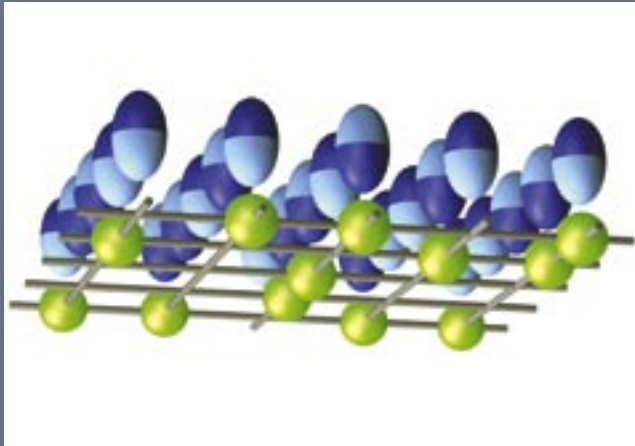


Abb. 1

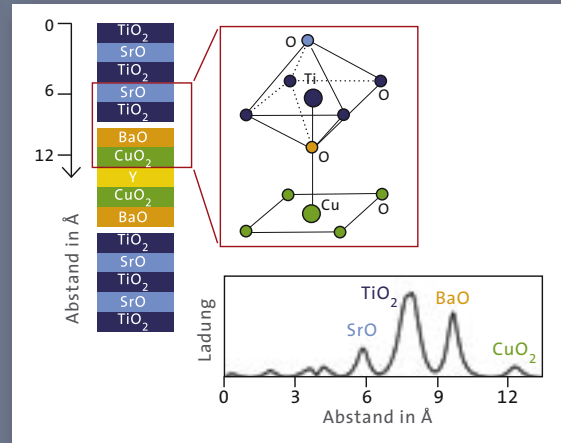


Abb. 2

modelliert werden. Dieses Titanat ist ein Isolator, ein sogenanntes Dielektrikum. Es zeichnet sich dadurch aus, dass die Ladungen kleine Dipole von molekularer Größe bilden. In Dipolen sind positive und negative Ladungen räumlich getrennt – zum Beispiel positive Ladung im hellblauen und negative Ladung im dunkelblauen Teil eines Ovals. Die Dipole können ihre Richtung drehen: so kann in der Skizze der hellblaue oder dunkelblaue Teil der Ovale zur unteren Ebene hin gerichtet sein. Durch ein elektrisches Feld senkrecht zu diesen Ebenen können die Dipole ausgerichtet werden – ähnlich wie eine Anordnung von kleinen Magneten durch ein magnetisches Feld orientiert werden kann.

Das System weckt nun dadurch das Interesse der Forscherinnen und Forscher, dass die Elektronen (in der grünen Ebene) selbst jeweils ein winziges elektrisches Feld besitzen und damit die Dipole in dem Dielektrikum ausrichten können. Dieser Zusammenhang wird subtil, wenn man noch berücksichtigt, dass die Elektronen zwischen den Gitterplätzen hüpfen und dadurch die Dipole „kippen“ können. Ebenso kann aber auch das elektrische Feld der Dipole das Hüpfen der Elektronen beeinflussen. Ist es nun für die Elektronen günstiger, auf einem Gitterplatz „festzusitzen“, was in einem elektrischen Isolator der Fall wäre? Oder ist es günstiger, wenn die Elektronen in einer metallischen Phase bleiben oder sogar in die supraleitende Phase übergehen? Kann man insbesondere mit einem äußeren Feld zwischen solchen Zustände schalten? Um solche Fragen zu beantworten, muss die Grenzfläche mit mehreren Atomlagen modelliert werden. Dies ist in Zusammenarbeit mit Wissenschaftlern der University of British Columbia für eine bestimmte Materialkombination gelungen (siehe Abbildung 2). Die atomare Konfiguration an der Grenzfläche mit der Kupfer-Sauerstoff-Ebene unten und dem Titan-Sauerstoff-Oktaeder oben ist schematisch dargestellt. Links davon sind die weiteren atomaren Lagen skizziert, die für eine Berechnung des Ladungsprofils über die Grenzfläche hinweg notwendig sind. In einer sogenannten ab initio Rechnung findet man Ladungsträger auf den grenznahen Schichten, die das System metallisch machen, eventuell auch supraleitend. Dieses erstmalig berechnete Ladungsprofil ist umso überraschender als man hier ein System aus zwei Isolatoren zusammengebaut hat, das jedoch an der Grenzschicht metallisch leitend wird.

Wechselwirkungen zwischen Elektronen beim Stromfluss sind im Focus der Forscherinnen und Forscher im Teilprojekt D7.

Fließt Strom durch ein Material, werden dabei Elektronen transportiert, die sich gegenseitig beeinflussen. Diese so genannte Korrelation bewirkt zwei Phänomene: Zum einen stoßen sich zwei negativ geladene Elektronen gegenseitig ab, wenn sie sich zu nahe kommen. Damit sind die beiden Teilchen nicht mehr voneinander unabhängig. Sprich: Sie sind korreliert. Zum zweiten prallen die beim Stromfluss transportierten Elektronen Wechselwirkungen auf die Gitterionen, aus denen das leitende Material aufgebaut ist. So erhalten die Gitterionen zusätzliche Energie, die sie wiederum auf andere Elektronen übertragen können. Dadurch ergibt sich effektiv eine weitere Wechselwirkung zwischen zwei Elektronen, denn wie das Licht, besitzen auch die Gitterschwingungen einen Teilchencharakter. In Anlehnung an den Begriff Photon für das Lichtteilchen, spricht man hier von Phononen und von einer Elektron-Phonon-Wechselwirkung. Die Physikerinnen und Physiker des Teilprojekts D7 untersuchen ein Modell, das diese Effekte beschreibt.

Das Modell der Elektronenkorrelation muss hohe Ansprüche erfüllen. Einerseits muss es exakt die Vorgänge beschreiben, die bei der Elektronenkorrelation auftreten, andererseits muss es mathematisch noch berechenbar bleiben.

Dazu haben die Forscherinnen und Forscher nun ein Modell entwickelt, das zwei zentrale Gitterplätze von Ionen des leitenden Materials repräsentiert. Die Physikerinnen und Physiker nehmen an, dass nur die Elektronen, die sich auf den Gitterplätzen befinden, miteinander und mit den Gitterionen zusammenstoßen. Ein Stromfluss wird dadurch ermöglicht, dass links und rechts Elektronenreservoir an das zentrale System ankoppeln. Von den Elektronen, die sich dort befinden, nehmen die Forscherinnen und Forscher an, dass sie sich völlig unabhängig voneinander bewegen. Für viele Metalle ist diese Annahme eine gute Näherung, da sich häufig die gegenseitige Abstoßung der Elektronen und die indirekte Wechselwirkung über das Ionengitter weitgehend gegenseitig aufheben.

Ohne die Elektronenreservoir handelt es sich hier um ein bekanntes Modell, anhand dessen in den 80er Jahren, unter anderem vom späteren Nobelpreisträger Anthony J. Leggett, der Zusammenhang zwischen Quantenmechanik und klassischer Physik untersucht wurde. Bei der theoretischen Behandlung ist nun eine wesentliche Schwierigkeit, die Methoden, die damals entwickelt wurden, auf Systeme mit angekoppelten Elektronenreservoir zu erweitern.

**Abbildung 1:** Graphische Darstellung eines Moleküls, das über Schwefelatome (rot) mit Goldspitzen verbunden ist, was einen Stromfluss ermöglicht. **Abbildung 2:** Schematische Darstellung des untersuchten Modells: Elektronen fließen zwischen zwei metallischen Kontakten (grün) durch ein zentrales System (blau), das aus zwei Störstellen besteht. Elektronen, die sich auf diesen Störstellen befinden, erzeugen Gitterschwingungen.



Abb. 1

Mittlerweile findet das von den Augsburger Physikerinnen und Physikern untersuchte Modell Anwendung in der sogenannten molekularen Elektronik. Dort werden mit sehr feinen Goldspitzen einzelne Moleküle kontaktiert, so dass sich eine Spannung anlegen lässt und man letztendlich einen Stromfluss beobachtet. Bei den Molekülen sind nur sehr wenige Elektronenzustände relevant und lassen sich wie Gitterplätze beschreiben. Eine aktuelle Fragestellung auf diesem Gebiet ist beispielsweise, wie sich angeregte Molekülschwingungen im Stromfluss bemerkbar machen.

Mit ihren Untersuchungen schaffen die Physikerinnen und Physiker so anhand einfacher Modelle ein Verständnis für Transportmechanismen von Elektronen in stromleitenden Materialien. Dies wiederum ermöglicht in einem nächsten Schritt, Materialien zu entwickeln, die ein entsprechendes Verhalten zeigen.

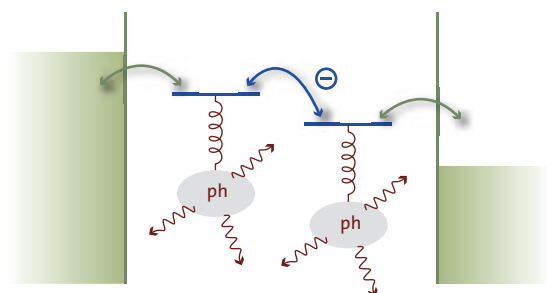


Abb. 2

Die Physikerinnen und Physiker des Teilprojekts E1 messen Eigenrotationen von Atomkernen und Elektronen in Materialien.

Jedes Wasserstoffatom verfügt über einen so genannten nuklearen Spin, also eine Art winzige Kreisbewegung seines Protons im Kern. Genau über diese Eigenrotation des Protons können Ärzte sich in der Medizin mit Hilfe der Magnetresonanztomographie ein detailliertes Bild über das Körperinnere eines Menschen verschaffen. Doch auch Elektronen besitzen so einen magnetischen Spin und damit eine magnetische Resonanz. Für dieses Phänomen interessieren sich die Physikerinnen und Physiker des Teilprojekts E1. Sie nutzen den magnetischen Spin der Atomkerne und der Elektronen, um in Festkörpern lokale Magnetfelder zu beobachten und auszumessen.

Die bekannteste Anwendung der magnetischen Resonanz ist die Magnetresonanztomographie (MRT) in der Medizin: Hier wird der Anteil des Elements Wasserstoff, des häufigsten Elements im menschlichen Körper, in den Körpersubstanzen wie Wasser, Fett, Muskel oder Knochen, gemessen. Die unterschiedlich hohen Anteile ergeben dann ein Schnittbild durch den menschlichen Körper.

Detektiert wird ein Wasserstoffatom über die Bewegung seines nuklearen Spins (Protonenspin) in einem Magnetfeld. Durch die zusätzliche Einstrahlung von Radiowellen einer bestimmten Frequenz (Larmorfrequenz) werden die Protonenspins aus ihrer gleichmäßigen Bewegung im Magnetfeld ausgelenkt. Je mehr Protonenspins ausgelenkt werden, desto größer ist das detektierte Signal und damit der Anteil an Wasserstoff.

Die gleichmäßige Bewegung des Protonenspins in einem Magnetfeld ähnelt der Bewegung eines rotierenden Kinderkreisels im Schwerfeld der Erde. Beim Kinderkreisel ist die Höhe der Präzessionsfrequenz der taumelnden Bewegung (Larmorfrequenz) abhängig von der Stärke des Schwerfeldes: Derselbe Kinderkreisel würde auf dem Mond langsamer taumeln als auf der Erde. Analog führt eine Änderung des Magnetfeldes zu einer Änderung dieser Larmorfrequenz des Protonenspins im Wasserstoffatom.

Da auch Elektronen einen Spin besitzen, kann man das Phänomen der „Magnetischen Resonanz“ universal, sowohl an Atomkernen, als auch an Elektronen, beobachten. Mit Hilfe dieses Spins messen die Physikerinnen und Physiker mit den hochempfindlichen Messmethoden der magnetischen Kernresonanz (NMR) und der Elektronenspinresonanz (ESR) lokale Magnetfelder in Festkörpern. Diese lokalen Magnetfelder können statisch oder zeitlich veränderlich sein. Aus den detektierten lokalen Feldern können die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler Rückschlüsse auf die mikroskopischen Materialeigenschaften ziehen, wie magnetische Struktur, orbitale Ordnung, Ladungsordnung und Phasenübergänge. Ein großer Vorteil in dieser Untersuchungsmethode liegt darin, dass sie berührungsfrei ist und damit die Probeneigenschaften nicht beeinträchtigt werden.

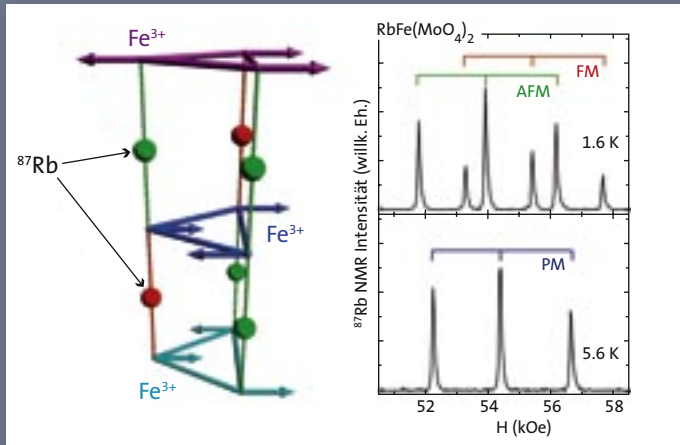


Abb. 1

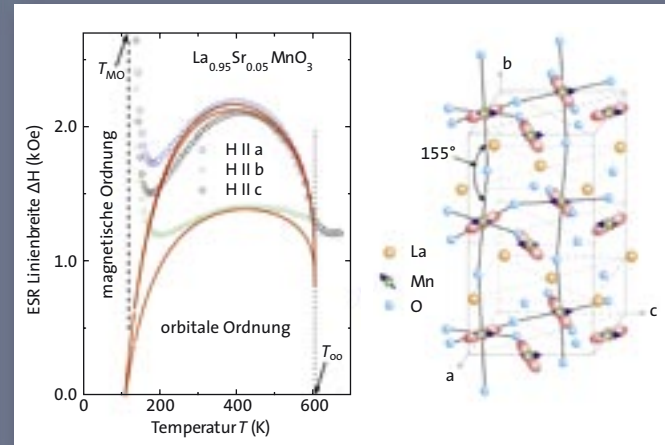


Abb. 2

Gemessen werden solche statischen lokalen Magnetfelder in Übergangsmetalloxiden wie zum Beispiel dem Rubidiummolybdat  $\text{RbFe}(\text{MoO}_4)_2$ . Hier besitzen die Eisenionen des Oxids ein magnetisches Moment. Die Eisenionen selbst sitzen auf einem dreieckigen Gitter, das für die exotischen magnetischen Eigenschaften dieses Materials wichtig ist. Das Isotop  $^{87}\text{Rb}$  des Rubidiums trägt im Atomkern viele Protonenspins, die sich zu einem gesamten nuklearen Spin überlagern, der als Sonde für die NMR dient. Über die Detektion des nuklearen Spins des  $^{87}\text{Rb}$ -Isotops können die Forscherinnen und Forscher eine Aussage darüber treffen, wie sich die magnetischen Momente der Eisenionen in dem Material ausrichten, um der Frage nachzugehen, warum die magnetischen Momente dies tun. Es hat sich gezeigt, dass es bei tiefen Temperaturen nicht nur eine, sondern zwei verschiedene Sorten von Ausrichtungen gibt (in Abbildung 1 in Rot und Grün gekennzeichnet).

Zeitlich veränderliche lokale Magnetfelder benachbarter Spins bewirken eine gegenseitige Dämpfung der Larmorpräzession und verbreitern die magnetischen Resonanzlinien, wie an dem Beispiel der ESR in  $\text{LaMnO}_3$  zu sehen ist (siehe Abbildung 2). In diesem Übergangsmetalloxid spielen die Orbitale (rote Keulen) der Mangan ( $\text{Mn}^{3+}$ ) 3d-Schale, in denen sich die von der ESR detektierbaren Elektronen befinden, dabei eine wichtige Rolle: Die Orbitale sind oberhalb der orbitalen Ordnungstemperatur  $T_{\text{OO}}$  ungeordnet und ordnen unterhalb in einem Schachbrettmuster. Die Mangan-Elektronenspins (schwarze Pfeile) sind erst unterhalb der magnetischen Ordnungstemperatur  $T_{\text{MO}}$  geordnet, werden aber schon im paramagnetischen Bereich durch die Orbitale beeinflusst. Im orbital geordneten Bereich ist die Dämpfung entlang der Orbitale effektiver als senkrecht dazu, so daß sich eine starke Abhängigkeit der Linienbreite von der Richtung des angelegten Magnetfeldes zeigt (rote Linien: theoretische Simulation des orbitalen Einflusses). Diese Experimente der ESR helfen die Frage zu klären, welcher Mechanismus die Orbitale koppelt.

Materialien, die ihre Eigenschaften abhängig von den äußeren Bedingungen völlig verändern können, werden von den Physikerinnen und Physikern im Teilprojekt E2 erkundet.

Übergangsmetalloxide eignen sich aufgrund ihrer physikalischen Eigenschaften für den Einsatz als Funktionsmaterialien in vielen Bereichen des täglichen Lebens. Beispielsweise ändert sich ihre elektrische Stromleitfähigkeit von gut leitendem (metallischem) zu isolierendem Verhalten, abhängig von der Temperatur. Damit eignen sich die Materialien für Brandmelder. Zugleich ändern sich die optischen Eigenschaften solcher Materialien. Sie können vom durchsichtigen Isolator zum undurchsichtigen Metall übergehen und damit bei Fenstern die Einstrahlung des Sonnenlichts regulieren. Im Teilprojekt E2 werden solche neuartige Übergangsmetalloxide in unterschiedlichen Probenformen, vom Einkristall bis zu nanometergroßen Partikeln, hergestellt und ihre Eigenschaften untersucht.

Während sich in einfachen Metallen (z. B. Kupfer) die Elektronen nahezu frei bewegen können und dadurch den elektrischen Strom sehr gut leiten, sind in deren Oxiden die Elektronen fest an die Atome gebunden. Damit sind sie elektrische Isolatoren. Die Oxide der Übergangsmetalle nehmen hinsichtlich der elektrischen Leitfähigkeit eine Zwischenstellung ein. Ihr Verhalten kann als Funktion von Größen wie Temperatur, Druck und Magnetfeld gezielt beeinflusst werden.

Im Teilprojekt E2 werden derartige Materialien in Form von nanometergroßen Partikeln (ein Nanometer ist ein Millionstel Millimeter), dünnen Schichten und voluminösen Kristallen hergestellt und analysiert. Ein Beispiel für solche Verbindungen sind Vanadium-Oxide, die sich bei Erhöhung der Temperatur sprunghaft vom elektrischen Isolator zum Stromleiter verwandeln. Sie können deshalb als Funktionsmaterialien eingesetzt werden, zum Beispiel als Schalter in automatischen Brandmeldeeinrichtungen. Als dünne Schicht kann dasselbe Material, das bei niedrigen Temperaturen durchsichtig ist, bei höheren Temperaturen undurchsichtig werden. So kann es als Beschichtung auf Fensterglas bei erhöhter Sonneneinstrahlung temperaturbegrenzend wirken. Nicht nur zur Befriedigung wissenschaftlicher Neugier, sondern auch im Hinblick auf den anwendungsbezogenen Einsatz, ist es wichtig, diese Phänomene zu beobachten und zu verstehen. Dies stellt den zentralen Beweggrund dar, an solchen Materialien gezielt Grundlagenforschung zu betreiben.

Die Qualität der von den Physikerinnen und Physikern hergestellten Kristalle (Abb. 1), die sich durch eine regelmäßige Anordnung der Atome auszeichnet, wird mit Hilfe der Beugung von Röntgenstrahlen bestimmt. Um tiefer einzutauchen in die kristalline Welt der Übergangsmetalloxide, stehen den Forscherinnen und Forschern Mikroskope wie Rasterelektronen-, Rasterkraft- und Rastertunnelmikroskope zur Verfügung, mit denen man nicht nur Bilder winzigster Strukturen bis hinab zur Größe von Atomen erstellen kann, sondern auch Informationen über die Eigenschaften der Elektronen im Festkörper gewinnt.

Um den Einfluss der äußeren Bedingungen auf die physikalische Beschaffenheit der Materialien zu untersuchen, werden im Teilprojekt E2 Eigenschaften, wie zum Beispiel der elektrische Widerstand in Abhängigkeit von Temperatur, Druck und Magnetfeld gemessen.



**Abbildung 1:** Oktaederförmiger Einkristall, dessen äußere Gestalt die regelmäßige Anordnung der Atome im Kristallgitter widerspiegelt. **Abbildung 2:** Dünne Schicht eines Übergangsmetalloxids, aufgebracht auf ein quadratzentimetergroßes Glasplättchen. Ihre optischen Eigenschaften ändern sich mit der Temperatur. Diese Schicht kann vom durchsichtigen Isolator zum undurchsichtigen Metall übergehen.

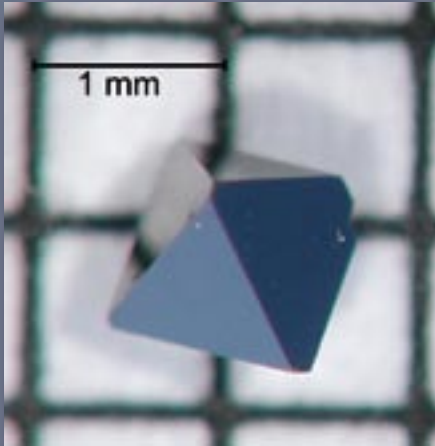


Abb. 1

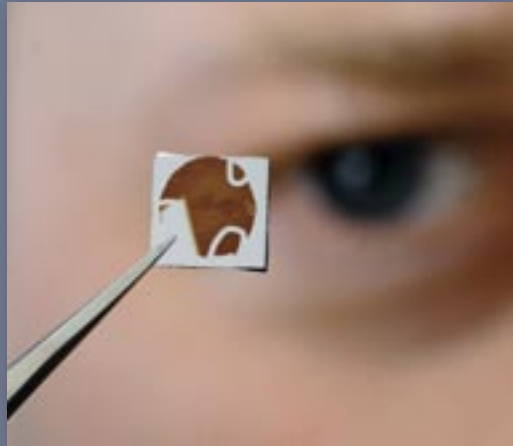


Abb. 2

Dazu stehen spezielle Geräte wie etwa Kryostaten zur Verfügung, mit denen Temperaturen von nur wenigen Tausendstel Grad über dem absoluten Nullpunkt ( $-273\text{ °C}$ ) erzeugt werden können. So lässt sich das Verhalten der Elektronen im Material leichter beobachten, weil bei derart tiefen Temperaturen die Atome im Kristall kaum schwingen, sodass die fließenden Elektronen weniger Störungen erfahren.

Durch Anlegen eines Magnetfeldes lassen sich nicht nur magnetische Materialien beeinflussen. Auch die frei beweglichen Ladungsträger eines nichtmagnetischen Stromleiters erfahren durch das Feld eine Kraft, die sie auf Kreisbahnen ablenkt. Aus diesem Effekt lassen sich weitere Aussagen, z. B. über die Ladungsträger und ihre Dichte im Festkörper treffen. Mithilfe von supraleitenden Magnetfeldspulen können an den Proben Magnetfelder bis zu 17 Tesla erzeugt werden (zum Vergleich: die Stärke des Erdmagnetfeldes beträgt etwa ein Zehntausendstel Tesla, die von Magnetkränen etwa 1-2 Tesla).

Eine weitere Untersuchungsmethode ist das Ausüben von Druck und der damit verbundenen Kompression einer Probe. Dadurch lassen sich die Abstände der regelmäßig angeordneten Atome eines Kristalls gezielt variieren. Mit dem Abstand ändert sich auch die Stärke der Bindung der Elektronen an die Atome, was sich wiederum auf die elektrischen Eigenschaften (metallische oder isolierende Leitfähigkeit) auswirkt.

Bei den Experimenten kommt ein Druck von bis zu 200 000 bar zum Einsatz (zum Vergleich: an der tiefsten Stelle des Ozeans, etwa elf Kilometer unter der Oberfläche, herrscht ein Druck von 1000 bar. Um einen derartigen Druck erzeugen zu können, verwendet man Druckstempel aus dem härtesten bekannten Stoff, dem Diamanten.

Die großflächige Beschichtung von Fensterglas mit Übergangsmetalloxiden ist aus technischen und wirtschaftlichen Gründen nicht realisiert, allerdings finden sie schon jetzt in Messgeräten Verwendung. Man bringt sie auf kleinen, Quadratzentimeter großen Flächen als dünne Schichten auf und verwendet sie als optische Filter (Abb. 2). So kann man die Übergangsmetalloxide zum Beispiel als Schutz für empfindliche Infrarotsensoren vor zu großer Einstrahlung einsetzen.

Im Teilprojekt E3 haben sich die Physikerinnen und Physiker zum Ziel gesetzt, einfache Modelle für komplexe Wechselwirkungen von Elektronen zu entwickeln.

Festkörper, deren Eigenschaften durch den starken gegenseitigen Einfluss der negativ geladenen Elektronen bestimmt sind, bilden einen Schwerpunkt im SFB 484. Das Teilprojekt E3 hat sich zum Ziel gesetzt, für die komplexe Physik der wechselwirkenden Elektronen in realen Materialien einfache Modelle zu studieren und zu klären, wie sich in diesen Systemen aus vielen Elektronen geordnete Strukturen bilden können.

Wie jedes System in der Natur organisieren sich die Elektronen in einem Festkörper in einem optimalen Zustand mit minimaler Energie, der für Elektronen durch die Gesetze der Quantenmechanik bestimmt ist. In Materialsystemen, in denen sich die gegenseitig abstoßenden Elektronen entweder aufgrund ihrer hohen Dichte oder der speziellen chemischen Struktur bei ihrer Bewegung sehr nahe kommen kann sich der optimale Zustand nur im Kollektiv der Elektronen einstellen. Man spricht daher von einem kooperativen Verhalten in einem korrelierten Elektronensystem.

Der optimale Zustand mit minimaler Energie der Elektronen kann durch eine ausgezeichnete Symmetrie oder auch eine perfekte Ordnung der Elektronen gekennzeichnet sein. Solche Symmetrien und Ordnungen als kooperativen Phänomenen liegen dem Magnetismus und auch der Supraleitung zugrunde. Besonders interessante Situationen treten auf, wenn das System gestört wird, die Stärke der Wechselwirkung verändert wird oder elektromagnetische Felder eingeschaltet werden und sich die Elektronen aufgrund der geänderten Bedingungen neu arrangieren müssen. Neue Strukturbildungen werden möglich, und es kann zur Konkurrenz oder Koexistenz von Ordnungsmustern kommen. Übergänge von einem Metall zu einem Isolator, sehr grosse Veränderungen des elektrischen Widerstands durch Einschalten eines Magnetfeldes sowie das simultane Auftreten vom Ferromagnetismus und Ferroelektrizität oder Supraleitung und Antiferromagnetismus sind möglich.

**Abbildung 1:** Lochdichteprofil eines d-Wellen-Supraleiters mit nichtmagnetischen Störstellen.

**Abbildung 2:** Ergebnisse einer Monte Carlo-Simulation zu einem Doppelaustauschmodell für Manganate: a) Temperaturabhängigkeit des Widerstands in der Umgebung der Curie-Temperatur  $T_c$ ; b) räumliche Struktur der Magnetisierung in der para- und ferromagnetischen Phase.

**Abbildung 3:** Realzeitentwicklung der Spin- und Ladungsdichte im Hubbard Modell.

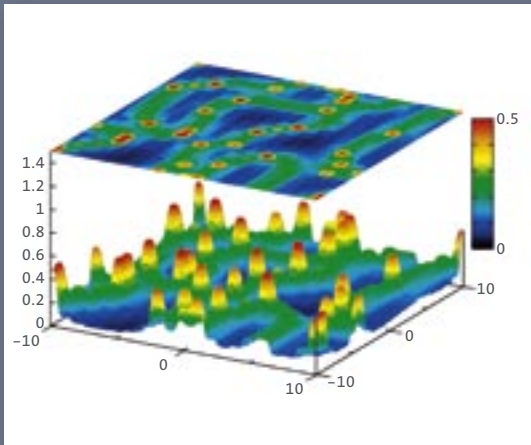


Abb. 1

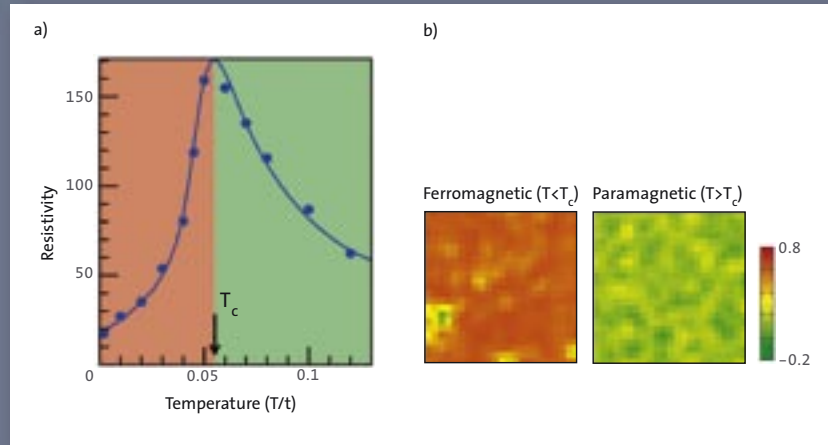


Abb. 2

Für solche Untersuchungen werden auch Computersimulationen verwendet, um sowohl räumliche Strukturen auf mikroskopischen Längenskalen zu identifizieren als auch den zeitlichen Verlauf der Elektronenbewegung bei einer Störung des Gleichgewichts zu verfolgen. Die theoretischen Arbeiten in diesem Teilprojekt haben als Ziel, zum mikroskopischen Verständnis der vielfältigen komplexen Physik der im SFB 484 untersuchten Übergangsmetalloxide und neuen Materialien beizutragen.

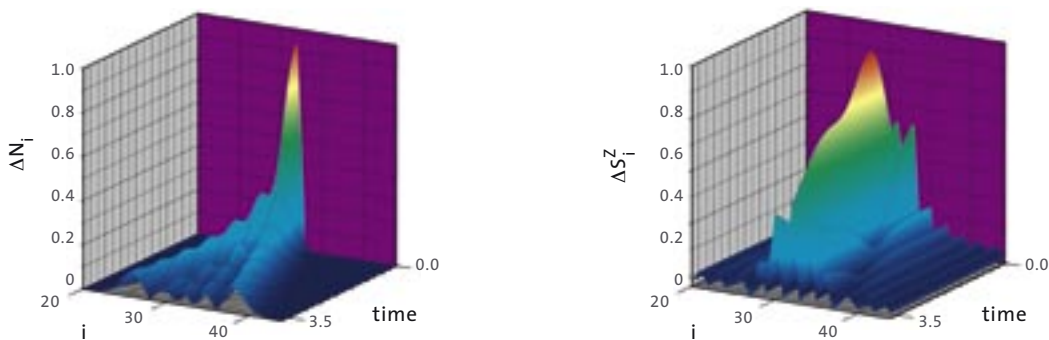


Abb. 3

Die Physikerinnen und Physiker im Teilprojekt E4 haben ein Einfrieren von Elektronen entdeckt.

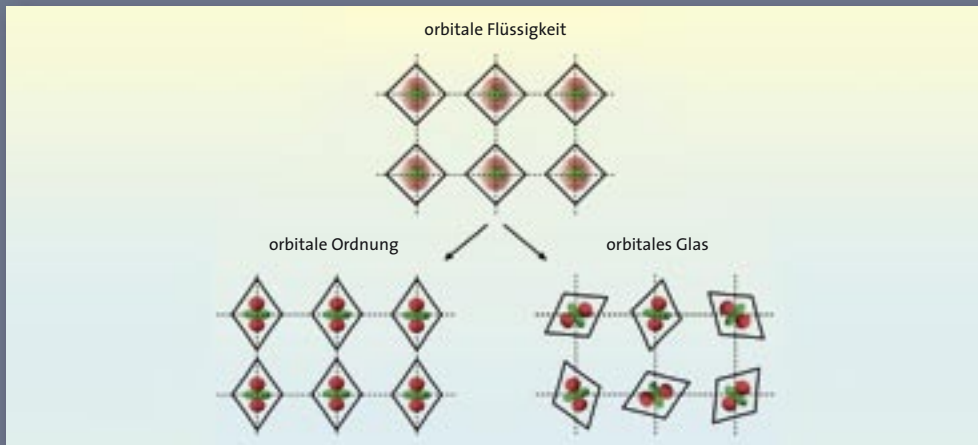
Elektronische Prozesse gehören in der Regel zu den schnellsten Vorgängen in fester Materie. Manchmal dauern sie nicht länger als wenige Femtosekunden. Eine Femtosekunde ist ein Millionstel einer Milliardstel Sekunde, eine Zahl mit 14 Nullstellen hinter dem Komma. Doch es gibt auch Ausnahmen: Im Teilprojekt E4 konnten die Physikerinnen und Physiker zeigen, dass die Elektronenwolken der äußeren Atomhüllen (Orbitale) in Eisenchromsulfid ( $\text{FeCr}_2\text{S}_4$ ), einem Spinell-Kristall, bei tiefen Temperaturen in einen glasartigen Zustand einfrieren. Ihre Rotationsbewegungen werden extrem verlangsamt und kommen fast zum Stillstand, es entsteht ein orbitales Glas.

Der Aufenthaltsort von Elektronen in einer Atomhülle lässt sich quantenmechanisch mit Orbitalen erklären, die Kugel-, Hantel- oder komplexere Formen annehmen können. Dabei geben Orbitale eine Information über die Wahrscheinlichkeit in Abhängigkeit von einem Beobachtungswinkel, ein Elektron an einem bestimmten Ort zu finden. Die Orientierung der Orbitale von Atomen ist zudem abhängig von der Temperatur, der ein Material gerade ausgesetzt ist. Die hantelförmigen Orbitale des Eisenchromsulfids ( $\text{FeCr}_2\text{S}_4$ ) wechseln bei Raumtemperatur schnell ihre Orientierung – man spricht von einer orbitalen Flüssigkeit. Beim Abkühlen beobachtet man in manchen Materialien eine spontane orbitale Ordnung. Die Augsburger Physikerinnen und Physiker konnten jedoch nachweisen, dass sich beim Abkühlen von Eisenchromsulfid die Rotationsbewegung der elektronischen Orbitale und damit die Elektronenbewegungen selbst kontinuierlich um einen Faktor von rund 100 Billionen verlangsamen, bis sie bei tiefsten Temperaturen um minus 272 °C im Mittel nur noch einmal pro Sekunde ihre Orientierung ändern (siehe Abbildung).

Dieser Vorgang ähnelt der kontinuierlichen Verlangsamung der Molekülbewegungen beim Übergang vom flüssigen in den festen Zustand, wie sie z. B. beim Blasen einer Glasvase auftritt. Hier frieren beim Abkühlen der Schmelze die Positionen der Moleküle in einer ungeordneten, flüssigkeitsähnlichen Struktur ein. Die einzelnen Elektronen dagegen bleiben unabhängig vom Zustand der Materie immer gleich schnell.

Anders verhält es sich bei den von uns entdeckten orbitalen Gläsern aus Eisenchromsulfid. Hier kommen die Rotationsbewegungen der Elektronenwolken der äußeren Atomhüllen beim Abkühlen fast zum Stillstand. Wir konnten nachweisen, dass diese Elektronenbewegungen, die vorher einige Femtosekunden lang dauerten, nach dem Einfrieren rund eine Sekunde benötigen, was in der Natur nahezu einem Stillstand gleichkommt.

Schematische Darstellung einer orbitalen Flüssigkeit (oben). Bei tiefen Temperaturen (unten) kann sich in einigen wenigen Materialien statt orbitaler Ordnung (links) eine unregelmäßige Anordnung von Elektronenwolken ausbilden (rechts). Hierbei zeigen elektronische Zustände die Signatur einer glasartigen Erstarrung – ein „orbitales Glas“ bildet sich aus. Die Rauten symbolisieren die Anordnung der benachbarten Atome. [aus *Physik in unserer Zeit* 36, 112 (2005)]



Nicht nur die Orbitale in  $\text{FeCr}_2\text{S}_4$  zeigen glasartiges Einfrieren. Ihre Rotationsbewegungen sind begleitet von einer Verzerrung der regelmäßigen Anordnung benachbarter Atome (in der Abbildung durch die Rauten angedeutet). In dieser Wechselwirkung liegt der Schlüssel zum Verständnis der ungewöhnlichen Elektronendynamik in diesem Material.

Der orbitale Glaszustand in  $\text{FeCr}_2\text{S}_4$  ist ein typisches Beispiel für die reichhaltige Physik orbitaler Freiheitsgrade, bei der die Elektronen die Orientierung ihrer Orbitalbahnen wechseln können. Orbitale Freiheitsgrade können z. B. durch Licht oder elektrische Felder direkt kontrolliert werden. Dieses Phänomen könnte langfristig interessante Anwendungsperspektiven eröffnen. In der „Orbitronik“ will man statt Ladung oder Strom, wie in der Elektronik, orbitale Freiheitsgrade für Mikroelektronik-Bauteile verwenden. Dies wäre analog zum Schalten der Molekülorientierungen in Flüssigkristallen, wie es z. B. in LCD-Anzeigen passiert und könnte auch durch Licht geschehen. Die Orbitronik soll zukünftig schnellere Schaltzeiten und kleinere Bauelemente möglich machen. Sie würde eine Abkehr von der herkömmlichen Silizium-basierten Elektronik bedeuten, die irgendwann an ihre Grenzen stoßen muss, und gänzlich andere physikalische Prozesse nutzen. Derzeit versucht man allerdings noch, die Grundlagen zu verstehen.

Die Physikerinnen und Physiker des Teilprojekts E5 erforschen den Einfluss von Fremdatomen in Materialien.

Mit quantenmechanischen Störstellensystemen und deren theoretischer Beschreibung beschäftigen sich die Physikerinnen und Physiker im Teilprojekt E5. Zunächst erscheint der Begriff „Störstelle“ als etwas Unerwünschtes, eben eine Störung, wie zum Beispiel ein Fremdatom in einer ansonsten reinen Substanz. In der Tat führen solche Störstellen oft zu drastischen Änderungen der physikalischen Eigenschaften eines Materials, so dass beispielsweise die elektrische Leitfähigkeit von Metallen weitgehend von solchen Störstellen bestimmt werden kann.

In anderen Fällen hingegen können Störstellen auch gezielt zur Manipulation von Materialeigenschaften ausgenutzt werden, wie etwa bei der Dotierung von Halbleitern. Als Dotierung bezeichnet man dabei gerade das kontrollierte Hinzufügen von Fremdatomen.

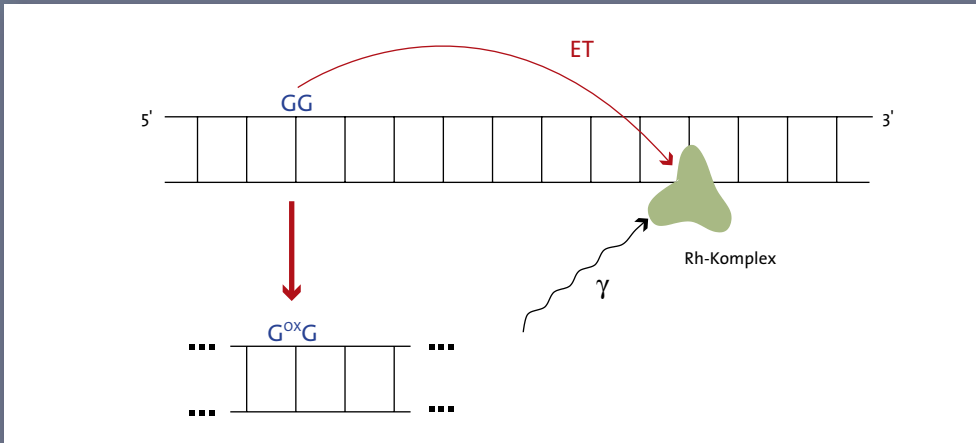
Die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler des Teilprojekts E5 wollen solche Störstellensysteme besser verstehen. Die Objekte, die sie theoretisch beschreiben, sind zumeist Elektronen. Man nimmt an, dass diese Elektronen sich in einem Metall unabhängig voneinander bewegen, eine Annahme, die in vielen Fällen auch sehr gut erfüllt ist. Bei der Anwesenheit von Störstellenatomen ist das jedoch nicht mehr der Fall. Die Elektronen spüren sich dann gegenseitig, sie treten miteinander in Wechselwirkung und führen korrelierte Bewegungen aus.

In diesem System darf man sich die Elektronen nicht als kleine Kugeln vorstellen, eine korrekte Beschreibung liefert die Quantenmechanik, in der den Elektronen eine Wellenfunktion zugeordnet wird.

Die quantenmechanische Beschreibung solcher Störstellensysteme beschäftigt die Physik bereits seit einigen Jahrzehnten. Ein berühmtes Beispiel dafür ist der so genannte Kondo-Effekt. Dabei geht es um magnetische Fremdatome in einem nicht-magnetischen Metall. Hier ist es der Spin der Elektronen auf den Fremdatomen, der das magnetische Moment verursacht.

Die Elektronen des Metalls wechselwirken in besonderer Weise mit den Elektronen auf der Störstelle, so dass bei tiefen Temperaturen (typischerweise bei wenigen Grad Kelvin über dem absoluten Nullpunkt) das magnetische Moment abgeschirmt wird. Dies führt zu einem elektrischen Widerstand der für abnehmende Temperaturen stark ansteigt.

Störstellenphysik findet man auch in zunächst unerwarteten Situationen. Das Bild beschreibt einen Elektronen-Transfer-Prozess in der DNA-Doppelhelix, dargestellt als Leiter. Die Guanin-Basen (G) spielen die Rolle von Elektronen-Donatoren und werden durch den Elektronen-Transfer-Prozess (ET) oxidiert ( $G^{ox}$ ), während ein Rh-Komplex als Elektronen-Akzeptor fungiert, nachdem er durch Einstrahlung von Licht ( $\gamma$ ) angeregt wurde. Insbesondere der Akzeptor kann nun im weitesten Sinne als Störstelle aufgefasst werden, der in die ansonsten ungestörte DNA-Doppelhelix eingebracht wird.



Bemerkenswert dabei ist, dass man bei tiefen Temperaturen immer das qualitativ gleiche Verhalten findet, unabhängig von mikroskopischen Eigenschaften der Störstelle. Das Verständnis solcher universeller Eigenschaften beispielsweise im elektrischen Widerstand ist eine zentrale Aufgabe der theoretischen Festkörperphysik, es ermöglicht den Forscherinnen und Forschern, den riesigen Zoo an Phänomenen in Festkörpern zu ordnen.

Ein solches fundiertes theoretisches Verständnis vorausgesetzt, lassen sich Störstellen auch als Sensoren in ein System einbringen. Der Einfluss der Störstelle lässt damit Rückschlüsse auf Eigenschaften des ungestörten Systems zu, wie etwa bei den Hochtemperatur-Supraleitern. Durch das Einbringen magnetischer Störstellen konnten in den letzten Jahren wichtige Informationen über den Mechanismus gewonnen werden, der der Supraleitung zugrunde liegt.

Die Physikerinnen und Physiker des Teilprojekts E6 haben einen neuartigen Effekt in Metallen entdeckt.

Die Bewegung von Fußgängern auf einem gefüllten Marktplatz und von Elektronen in einem Metall führt zu sehr ähnlichem Verhalten: Um nicht zusammenzustoßen, müssen sich sowohl Menschen wie auch Elektronen gegenseitig ausweichen. Diese räumliche Beeinflussung der Bewegung nennt man „Korrelation“. Im Fall der Bewegung von Elektronen in einem Metall, bei der Effekte der Quantenphysik eine entscheidende Rolle spielen, können derartige Korrelationen dramatische Folgen haben. Sie bestimmen insbesondere die physikalischen Eigenschaften vieler Materialien. Die Physikerinnen und Physiker des Teilprojekts E6 haben einen neuartigen Effekt entdeckt, der durch die Korrelationen zwischen den Elektronen verursacht wird.

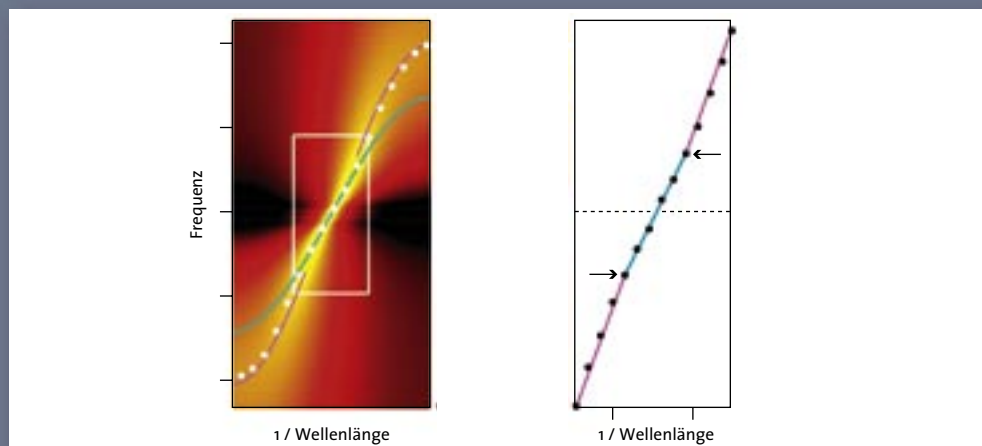
Elektronen sind geladene Teilchen, die gleichzeitig auch Wellencharakter besitzen. Dieses scheinbar paradoxe Verhalten lässt sich mit der Quantenmechanik erklären, deren Gesetzen die Elektronen unterliegen. Für die Elektronen heißt das: Sie haben eine Wellenlänge und damit eine Frequenz, die von der Wellenlänge abhängt. Diese Eigenschaft ist auch bei einem Lautsprecher zu beobachten: Je höher ein Ton, also je höher die Frequenz, um so kürzer die dazugehörige Wellenlänge, mit der seine Membran schwingt. Die Abhängigkeit der Frequenz einer Welle von der Wellenlänge bezeichnet man als Dispersion. In einem korrelierten Material wird die Dispersion der Elektronenwellen durch die gegenseitige Abstoßung der Elektronen stark beeinflusst.

Den Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern des Teilprojekts E6 des Sonderforschungsbereichs ist es nun zusammen mit Kollegen aus Stuttgart, Göttingen und Ekaterinburg (Russland) gelungen, die Dispersion von Elektronen in korrelierten Metallen genauer zu verstehen. Sie berechneten, dass sich die Beziehung zwischen Frequenz und Wellenlänge bei gewissen Frequenzen abrupt ändern kann. Dieses eigenartige Verhalten äußert sich als mehr oder minder scharfer Knick in der Dispersionskurve.

Solche Knicke sind eine Folge der spezifischen räumlichen Korrelationen zwischen den Elektronen. Das heißt: Bei bestimmten Frequenzen reagieren die Elektronen nicht mehr so, wie man es eigentlich erwartet hätte.



Die Abbildung zeigt die Dispersion, d. h. die Abhängigkeit der Frequenz (senkrechte Achse) von Elektronenwellen in einem korrelierten Material von ihrer Wellenlänge – aufgetragen als  $1/\text{Wellenlänge}$  (waagerechte Achse). Mit Hilfe einer Farbskala wird dargestellt, wie gut sich die Elektronenwellen ausbreiten können: Je heller die Farbe, um so geringer die Dämpfung der Bewegung aufgrund der gegenseitigen Wechselwirkung zwischen den Elektronen. Die günstigsten Frequenzen und Wellenlängen sind mit weißen Punkten markiert. Sie folgen bei kleinen Frequenzen der theoretisch bereits bekannten hellblauen Kurve. Die neue Theorie der Physikerinnen und Physiker in Teilprojekt E6 erklärt die Knicke, die beim Übergang zur rosa Kurve bei höheren Frequenzen auftreten. Im rechten Bild sind die Knicke vergrößert dargestellt und mit Pfeilen markiert.



Wie ausgeprägt ein Knick ist und bei welcher Frequenz er in der Dispersion auftritt, hängt von der Stärke der Korrelation ab und stellt deshalb so etwas wie einen charakteristischen Fingerabdruck der Wechselwirkung zwischen den Elektronen dar. Dieses Ergebnis ist sehr allgemein und ist daher für praktisch jedes Metall zu erwarten, in dem sich die Elektronen stark korreliert bewegen. Tatsächlich wurden in den letzten Monaten genau solche Knicke in der Dispersion zahlreicher Materialien entdeckt – ihr Ursprung war bisher allerdings völlig rätselhaft.

Die Ergebnisse der Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler erlauben es nun, mit Hilfe der Knicke unerwartete Informationen über das „Innenleben“ korrelierter Materialien zu finden. Damit sind diese Knicke ein neuer Schlüssel zum Verständnis der Eigenschaften von Materialien, wie z. B. Hochtemperatur-Supraleitern und Metalloxiden, die sowohl für die Grundlagenforschung wie auch für moderne technologische Anwendungen enorm wichtig sind.

Die Physikerinnen und Physiker der Teilprojekte E7 und E4 kombinieren Ferroelektrizität mit Ferromagnetismus.

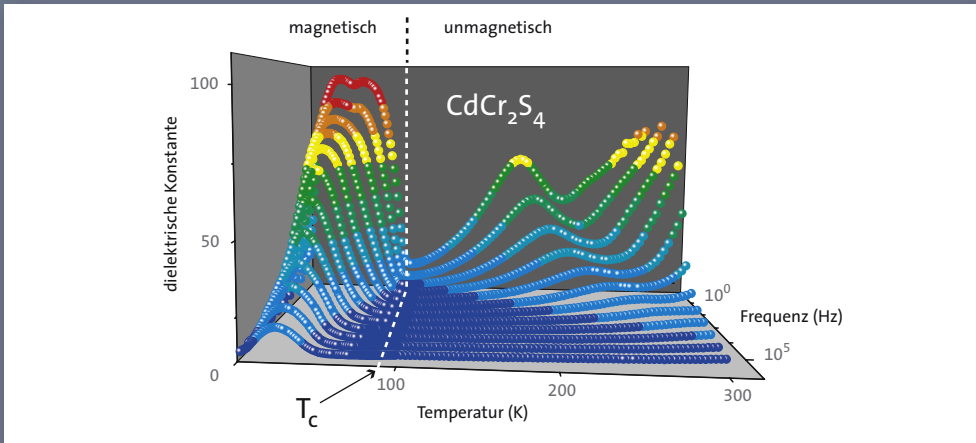
Im Rahmen der Teilprojekte E4 und E7 des Sonderforschungsbereichs gelang kürzlich die Entdeckung einer Klasse neuer Materialien, die die technologisch wichtigen Eigenschaften „Ferromagnetismus“ und „Ferroelektrizität“ in sich vereinen. Solche Materialien, bei denen die magnetischen und elektrischen Eigenschaften stark gekoppelt sind, haben ein immenses Potential für neuartige Anwendungen in der Mikroelektronik, z. B. bei der Entwicklung und Miniaturisierung schneller Speichermedien.

Magnetische Materialien kennt die Menschheit seit der Antike. Neben der bekannten Anwendung für Permanentmagnete finden sie Einsatz in der modernen Technologie, vom Elektromotor bis zur Computerfestplatte. Ihr magnetisches Verhalten beruht auf der parallelen Anordnung kleiner Elementarmagnete (magnetische Dipole) auf atomarer Ebene. Die vor 80 Jahren entdeckten Ferroelektrika verhalten sich bezüglich ihrer elektrischen Eigenschaften ganz ähnlich wie Ferromagnete. Statt magnetischer kommt es hier zur parallelen Anordnung elektrischer Dipole. Auch sie werden vielfältig eingesetzt, z. B. für elektronische Bauelemente oder so genannte nichtflüchtige Speicherelemente, bei denen auch ohne permanente Stromversorgung die gespeicherte Information erhalten bleibt.

Ferroelektrische Ferromagnete (so genannte „Multiferroika“), die beide Eigenschaften in einem Material kombinieren, eröffnen nun ein ganz neues Feld von Anwendungen in Optik, elektronischer Schaltungstechnik und – von besonderem Interesse – bei der Entwicklung neuer elektronischer Speichertechniken. Gelänge gleichzeitig elektrische und magnetische Speicherung (letzteres ist z. B. in der Festplatte verwirklicht), wäre die Speicherkapazität verdoppelt. Zudem – und vielleicht noch wichtiger – ließe sich dann magnetische Information elektrisch sehr schnell auslesen. Trotz der intensiven Suche nach ferroelektrischen Ferromagneten sind bislang nur wenige solcher Materialien bekannt. Ihre Eigenschaften sind nicht vielversprechend im Hinblick auf einen technologischen Einsatz.

Die gemeinsam mit einem Gastwissenschaftler aus Moldawien synthetisierte ferroelektrische und ferromagnetische Verbindung Cadmiumchromsulfid ( $\text{CdCr}_2\text{S}_4$ ) gehört zur Gruppe der Spinell-Kristalle. Spinelle sind ein wesentlicher Bestandteil des Erdmantels und finden auch verbreitete technische Anwendung, z. B. in der Hochfrequenztechnik. Wie die Augsburger Physikerinnen und Physiker in einem in dem renommierten Wissenschaftsmagazin „Nature“ erschienenen Artikel [Nature 434, 364 (2005)] zeigen konnten, weist der neu entdeckte ferroelektrische Ferromagnet  $\text{CdCr}_2\text{S}_4$  herausragende Eigenschaften auf, die wesentlich besser für mögliche Anwendungen geeignet sind, als die der bisher bekannten Verbindungen.

Frequenz- und Temperaturabhängigkeit der dielektrischen Konstanten von  $\text{CdCr}_2\text{S}_4$ . Wenn das Material magnetisch wird, steigt die dielektrische Konstante stark an. Ein solches Verhalten eröffnet neue Möglichkeiten für elektronische Speichertechniken.



Zum Beispiel zeigt sich beim Übergang in den magnetischen Zustand bei ca. 85 K (-188 °C) ein sehr starker Anstieg der dielektrischen Konstanten, einer wichtigen Materialgröße zur Charakterisierung des Verhaltens eines Materials beim Anlegen einer elektrischen Wechselspannung (siehe Abbildung). Vor allem der bei tiefen Temperaturen auftretende, so genannte „kolossale magneto-elektrische Effekt“, d. h. eine Kopplung elektrischer und magnetischer Eigenschaften in bisher nicht gekannter Höhe, lässt auf weitere Fortschritte im Verständnis und der Anwendung dieser exotischen Materialien hoffen.

Wie die Untersuchung einer Reihe mit Cadmiumchromsulfid verwandter Spinell-Verbindungen ergeben hat, scheint es sich hier um eine neue Klasse multiferroischer Materialien zu handeln. Dies lässt auf die Entdeckung eines Multiferroikums bei Raumtemperatur hoffen, eine Voraussetzung für die technologische Anwendbarkeit.

Daneben ist aber vor allem die Suche nach der physikalischen Ursache für das in vielerlei Hinsicht verblüffende Verhalten vieler Multiferroika ein wichtiges Ziel der Arbeiten in den Teilprojekten E7 und E4. Einen entscheidenden Beitrag liefern hier Messungen der Durchlässigkeit multiferroischer Kristalle für elektromagnetische Strahlung, z. B. Mikrowellen oder Infrarotlicht. Aus solchen Experimenten konnten die Forscherinnen und Forscher auf eine neue Art von Absorptionsmechanismus (Anregung von „Elektromagnonen“) schließen, der zwar schon vor 37 Jahren von Theoretikern vorhergesagt, aber bislang noch nie experimentell nachgewiesen wurde.

Dies eröffnet zum Beispiel die Möglichkeit der Variation der optischen Eigenschaften (Brechungsindex und Dämpfung) der untersuchten Materialien schon mit relativ geringen Magnetfeldern. So könnte die Entwicklung einer neuen Generation von Bauelementen für die Optoelektronik ermöglicht werden, z. B. zum Einsatz in der Glasfasertechnik.

**Teilprojekt D1****Dr. Stefan Ebbinghaus**

Lehrstuhl für Festkörperchemie

Realstruktur und physikalische Eigenschaften  
perowskit-artiger Übergangsmetalloxide*Persönliche Arbeitsgebiete: Festkörperchemie, Präparation,  
Struktur und Eigenschaften von perowskitverwandten  
Metalloxiden*

Telefon: 0821 598 3012 · Telefax: 0821 598 3002

**E-Mail: stefan.ebbinghaus@physik.uni-augsburg.de****Prof. Dr. Armin Reller**

Lehrstuhl für Festkörperchemie

Realstruktur und physikalische Eigenschaften  
perowskit-artiger Übergangsmetalloxide*Persönliche Arbeitsgebiete: Festkörperchemie, Form  
und Funktion von Übergangsmetalloxiden, insbesondere  
perowskitartigen Phasen*

Telefon: 0821 598 3000 · Telefax: 0821 598 3002

**E-Mail: armin.reller@physik.uni-augsburg.de****Teilprojekt D2****Prof. Dr. Ulrich Eckern**

Theoretische Physik II

Elektronische Struktur und Dynamik inhomogener Systeme

*Persönliche Arbeitsgebiete: Theoretische Festkörperphysik,  
Theorie der Supraleitung, mesoskopische Physik, eindimen-  
sionale Modelle, Dichtefunktionaltheorie*

Telefon: 0821 598 3236 · Telefax: 0821 598 3262

**E-Mail: eckern@physik.uni-augsburg.de****Priv.-Doz. Dr. Peter Schwab**

Theoretische Physik II

Elektronische Struktur und Dynamik inhomogener Systeme

*Persönliche Arbeitsgebiete: Theoretische Festkörperphysik,  
mesoskopische Physik, ungeordnete Systeme*

Telefon: 0821 598 3237 · Telefax: 0821 598 3262

**E-Mail: peter.schwab@physik.uni-augsburg.de****Teilprojekt D3****Prof. Dr. Siegfried Horn**

Lehrstuhl für Experimentalphysik II

Untersuchung zeitlicher und räumlicher Korrelationen  
mittels Neutronen- und Röntgenstreuung*Persönliche Arbeitsgebiete: Experimentelle Festkörperphysik,  
Metall-Isolator-Übergang; Magnetismus, Spektroskopie mit  
Synchrotronstrahlung*

Telefon: 0821 598 3438 · Telefax: 0821 598 3411

**E-Mail: horn@physik.uni-augsburg.de****Priv.-Doz. Dr. Alexander Krimmel**

Lehrstuhl für Experimentalphysik V

Elektronische Korrelationen und Magnetismus

Untersuchung zeitlicher und räumlicher Korrelationen  
mittels Neutronen- und Röntgenstreuung*Persönliche Arbeitsgebiete: Experimentelle Festkörperphysik,  
Elektronische Korrelationen, Magnetismus, Supraleitung,  
Stromethoden*

Telefon: 0821 598 3606 · Telefax: 0821 598 3649

**E-Mail: alexander.krimmel@physik.uni-augsburg.de****Teilprojekt D4****Prof. Dr. Thilo Kopp**

Experimentalphysik VI

Elektronische Korrelationen und Magnetismus

Ladungstransport über Grenzflächen

*Persönliche Arbeitsgebiete: Elektronische Korrelationen und  
Magnetismus, Ungeordnete Systeme, Nichtlineare Dynamik*

Telefon: 0821 598 3651 · Telefax: 0821 598 3652

**E-Mail: thilo.kopp@physik.uni-augsburg.de****Prof. Dr. Jochen Mannhart**

Lehrstuhl für Experimentalphysik VI

Elektronische Korrelation und Magnetismus

Ladungstransport über Grenzflächen

*Persönliche Arbeitsgebiete: Oxide einschließlich  
Supraleitung, Nanotechnologie*

Telefon: 0821 598 3650 · Telefax: 0821 598 3652

**E-Mail: jochen.mannhart@physik.uni-augsburg.de****Priv.-Doz. Dr. Christof Schneider**

Lehrstuhl für Experimentalphysik VI

Elektronische Korrelationen und Magnetismus

Ladungstransport über Grenzflächen

*Persönliche Arbeitsgebiete: Oxide einschließlich  
Supraleitung, Nanotechnologie*

Telefon: 0821 598 3659 · Telefax: 0821 598 3652

**E-Mail: christof.schneider@physik.uni-augsburg.de**

## Teilprojekt D5

**Prof. Dr. Wolfgang Brütting**

Lehrstuhl für Experimentalphysik IV

Ladungstransport an organisch-anorganischen Grenzflächen

*Persönliche Arbeitsgebiete: Niedrigdimensionale Leiter, Organische Halbleiter und Bauelemente, Präparation und Charakterisierung organischer Dünnschichtsysteme, Ladungstransport und Photophysik von organischen Festkörpern*

Telefon: 0821 598 3493 · Telefax: 0821 598 3425

**E-Mail: wolfgang.brueetting@physik.uni-augsburg.de**

**Dr. Andreas Opitz**

Lehrstuhl für Experimentalphysik IV

Ladungstransport an organisch-anorganischen Grenzflächen

*Persönliche Arbeitsgebiete: Organische Halbleiter und Elektronik, Oberflächen- und Grenzflächenphysik, Mikro- und Nanotribologie*

Telefon: 0821 598 3441 · Telefax: 0821 598 3425

**E-Mail: andreas.opitz@physik.uni-augsburg.de**

## Teilprojekt D6

**Prof. Dr. Thilo Kopp**

Experimentalphysik VI

Elektronische Korrelationen und Magnetismus

Transport und komplexe Anregungen in inhomogenen korrelierten Vielteilchensystemen

*Persönliche Arbeitsgebiete: Elektronische Korrelationen und Magnetismus, Ungeordnete Systeme, Nichtlineare Dynamik*

Telefon: 0821 598 3651 · Telefax: 0821 598 3652

**E-Mail: thilo.kopp@physik.uni-augsburg.de**

## Teilprojekt D7

**Prof. Dr. Peter Hänggi**

Lehrstuhl für Theoretische Physik I

Transport auf der Nanometerskala: Effekte der Elektron-

Elektron- und Elektron-Phonon-Wechselwirkung

*Persönliche Arbeitsgebiete: Statistische Physik, Nichtlineare Dynamik; Dissipative Quantensysteme, Biophysik; Molekulare Elektronik*

Telefon: 0821 598 3249 oder 3250 · Telefax: 0821 598 3222

**E-Mail: hanggi@physik.uni-augsburg.de**

**Priv.-Doz. Dr. Sigmund Kohler**

Lehrstuhl für Theoretische Physik I

Transport auf der Nanometerskala: Effekte der Elektron-

Elektron und Elektro-Phonon-Wechselwirkung

*Persönliche Arbeitsgebiete: Quantentransport, Quantendissipation, Dekohärenz, Bose-Einstein-Kondensation, zeitabhängige Quantensysteme*

Telefon: 0821 598 3316 · Telefax: 0821 598 3222

**E-Mail: sigmund.kohler@physik.uni-augsburg.de**

## Teilprojekt E1

**Dr. Norbert Büttgen**

Lehrstuhl für Experimentalphysik V

Elektronische Korrelationen und Magnetismus

Magnetische Resonanz: Lokale elektronische und magnetische Eigenschaften

*Persönliche Arbeitsgebiete: Experimentelle Festkörperphysik, Elektronische Korrelationen und Magnetismus, magnetische Kernresonanzuntersuchungen*

Telefon: 0821 598 3604 · Telefax: 0821 598 3649

**E-Mail: n.buettgen@physik.uni-augsburg.de**

**Dr. Hans-Albrecht Ludwig Krug von Nidda**

Lehrstuhl für Experimentalphysik V

Elektronische Korrelationen und Magnetismus

Magnetische Resonanz: Lokale elektronische und magnetische Eigenschaften

*Persönliche Arbeitsgebiete: Experimentelle Festkörperphysik, Elektronische Korrelationen und Magnetismus, Elektronenspinresonanz*

Telefon: 0821 598 3114 oder 3631 · Telefax: 0821 598 3649

**E-Mail: hans-albrecht.krug@physik.uni-augsburg.de**

**Prof. Dr. Alois Loidl**

Lehrstuhl für Experimentalphysik V

Elektronische Korrelationen und Magnetismus

Magnetische Resonanz: Lokale elektronische und magnetische Eigenschaften

*Persönliche Arbeitsgebiete: Experimentelle Festkörperphysik, Elektronische Korrelationen und Magnetismus, optische Spektroskopie, magnetische Resonanz*

Telefon: 0821 598 3600 oder 3602 · Telefax: 0821 598 3649

**E-Mail: alois.loidl@physik.uni-augsburg.de**

## Teilprojekt E2

**Prof. Dr. Siegfried Horn**

Lehrstuhl für Experimentalphysik II

Elektronische Transporteigenschaften in der Nähe von Metall-Isolator-Übergängen

*Persönliche Arbeitsgebiete: Experimentelle Festkörperphysik, Metall-Isolator-Übergang, Magnetismus; Spektroskopie mit Synchrotronstrahlung*

Telefon: 0821 598 3438 · Telefax: 0821 598 3411

**E-Mail: horn@physik.uni-augsburg.de**

**Dr. Matthias Klemm**

Lehrstuhl für Experimentalphysik II

Elektronische Transporteigenschaften in der Nähe von Metall-Isolator-Übergängen

*Persönliche Arbeitsgebiete: Experimentelle Festkörperphysik, Metall-Isolator-Übergang; Magnetismus, Probenpräparation und -charakterisierung*

Telefon: 0821 598 3215 · Telefax: 0821 598 3411

**E-Mail: klemm@physik.uni-augsburg.de**

**Teilprojekt E3****Prof. Dr. Arno Kampf**

Lehrstuhl für Theoretische Physik III

Elektronische Korrelationen und Magnetismus

Elektronische Eigenschaften in der Nähe von korrelations-induzierten Phasenübergängen

*Persönliche Arbeitsgebiete: Theoretische Festkörperphysik, Korrelierte Isolatoren, Magnetismus, Theorie der Hochtemperatursupraleitung*

Telefon: 0821 598 3702 · Telefax: 0821 598 3725

**E-Mail: [kampf@physik.uni-augsburg.de](mailto:kampf@physik.uni-augsburg.de)****Teilprojekt E4****Priv.-Doz. Dr. Peter Lunkenheimer**

Lehrstuhl für Experimentalphysik V

Elektronische Korrelationen und Magnetismus

Dielektrische Spektroskopie an elektronisch hochkorrelierten Materialien

*Persönliche Arbeitsgebiete: Experimentelle Festkörperphysik, Elektronische Korrelationen und Magnetismus, Ungeordnete Systeme, Dielektrische Spektroskopie*

Telefon: 0821 598 3603 · Telefax: 0821 598 3649

**E-Mail: [peterl@physik.uni-augsburg.de](mailto:peterl@physik.uni-augsburg.de)****Teilprojekt E5****Prof. Dr. Stefan Kehrein**Arnold Sommerfeld Center for Theoretical Physics,  
LMU München

Unkonventionelle Quantenstörstellensysteme

*Persönliche Arbeitsgebiete: Theoretische Festkörperphysik, Elektronische Korrelationen, Renormierungsmethoden, Nichtgleichgewichtsphysik*

Telefon: 089 2180 4539 · Telefax: 089 2180 4155

**E-Mail: [stefan.kehrein@physik.lmu.de](mailto:stefan.kehrein@physik.lmu.de)****Priv.-Doz. Dr. Ralf Bulla**

Lehrstuhl für Theoretische Physik III

Elektronische Korrelationen und Magnetismus

Unkonventionelle Quantenstörstellen-Systeme

*Persönliche Arbeitsgebiete: Theoretische Festkörperphysik, Elektronische Korrelationen*

Telefon: 0821 598 3706 · Telefax: 0821 598 3725

**E-Mail: [ralf.bulla@physik.uni-augsburg.de](mailto:ralf.bulla@physik.uni-augsburg.de)****Teilprojekt E6****Priv.-Doz. Dr. Ralf Bulla**

Lehrstuhl für Theoretische Physik III

Elektronische Korrelationen und Magnetismus

Theorie kooperativer Phänomene in stark wechselwirkenden elektronischen Systemen

*Persönliche Arbeitsgebiete: Theoretische Festkörperphysik, Elektronische Korrelationen*

Telefon: 0821 598 3706 · Telefax: 0821 598 3725

**E-Mail: [ralf.bulla@physik.uni-augsburg.de](mailto:ralf.bulla@physik.uni-augsburg.de)****Dr. Marcus Kollar**

Lehrstuhl für Theoretische Physik III

Elektronische Korrelationen und Magnetismus

Theorie kooperativer Phänomene in stark wechselwirkenden elektronischen Systemen

*Persönliche Arbeitsgebiete: Theoretische Festkörperphysik, Elektronische Korrelationen und Magnetismus*

Telefon: 0821 598 3713 · Telefax: 0821 598 3725

**E-Mail: [marcus.kollar@physik.uni-augsburg.de](mailto:marcus.kollar@physik.uni-augsburg.de)****Prof. Dr. Dieter Vollhardt** (Sprecher des SFB 484)

Lehrstuhl für Theoretische Physik III

Elektronische Korrelationen und Magnetismus

Theorie kooperativer Phänomene in stark wechselwirkenden elektronischen Systemen, Zentrale Aufgaben

*Persönliche Arbeitsgebiete: Theoretische Festkörperphysik, Elektronische Korrelationen und Magnetismus, Ungeordnete Systeme, Normal- und Supraflüssiges Helium3*

Telefon: 0821 598 3700 oder 3701 · Telefax: 0821 598 3725

**E-Mail: [vollha@physik.uni-augsburg.de](mailto:vollha@physik.uni-augsburg.de)****Teilprojekt E7****Priv.-Doz. Dr. Joachim Hemberger**

Lehrstuhl für Experimentalphysik V

Elektronische Korrelationen und Magnetismus

Dielektrische und Optische Spektroskopie

*Persönliche Arbeitsgebiete: Experimentelle Festkörperphysik, Elektronische Korrelationen und Magnetismus, Ungeordnete Systeme und Frustration, Magneto-Elektrik*

Telefon: 0821 598 3616 · Telefax: 0821 598 3649

**E-Mail: [hem@physik.uni-augsburg.de](mailto:hem@physik.uni-augsburg.de)****Prof. Dr. Alois Loidl**

Lehrstuhl für Experimentalphysik V

Elektronische Korrelationen und Magnetismus

Optische Spektroskopie in elektronisch hochkorrelierten Materialien

*Persönliche Arbeitsgebiete: Experimentelle Festkörperphysik, Elektronische Korrelationen und Magnetismus, optische Spektroskopie, magnetische Resonanz*

Telefon: 0821 598 3600 oder 3602 · Telefax: 0821 598 3649

**E-Mail: [aloidl@physik.uni-augsburg.de](mailto:aloidl@physik.uni-augsburg.de)****Priv.-Doz. Dr. Andrei Pimenov**

Lehrstuhl für Experimentalphysik V

Elektronische Korrelationen und Magnetismus

Optische Spektroskopie in der Nähe des Metall-Isolator-Übergangs: Elektronische und phononische Eigenschaften

*Persönliche Arbeitsgebiete: Optische Leitfähigkeit, Terahertz-Spektroskopie, Kolossaler Magnetwiderstand, Hochfeld-ESR*

Telefon: 0821 598 3605 · Telefax: 0821 598 3649

**E-Mail: [andrei.pimenov@physik.uni-augsburg.de](mailto:andrei.pimenov@physik.uni-augsburg.de)**

Blick in eine Vakuumkammer.





---

Kooperative Phänomene im Festkörper:  
Metall-Isolator-Übergänge und Ordnung mikroskopischer Freiheitsgrade

