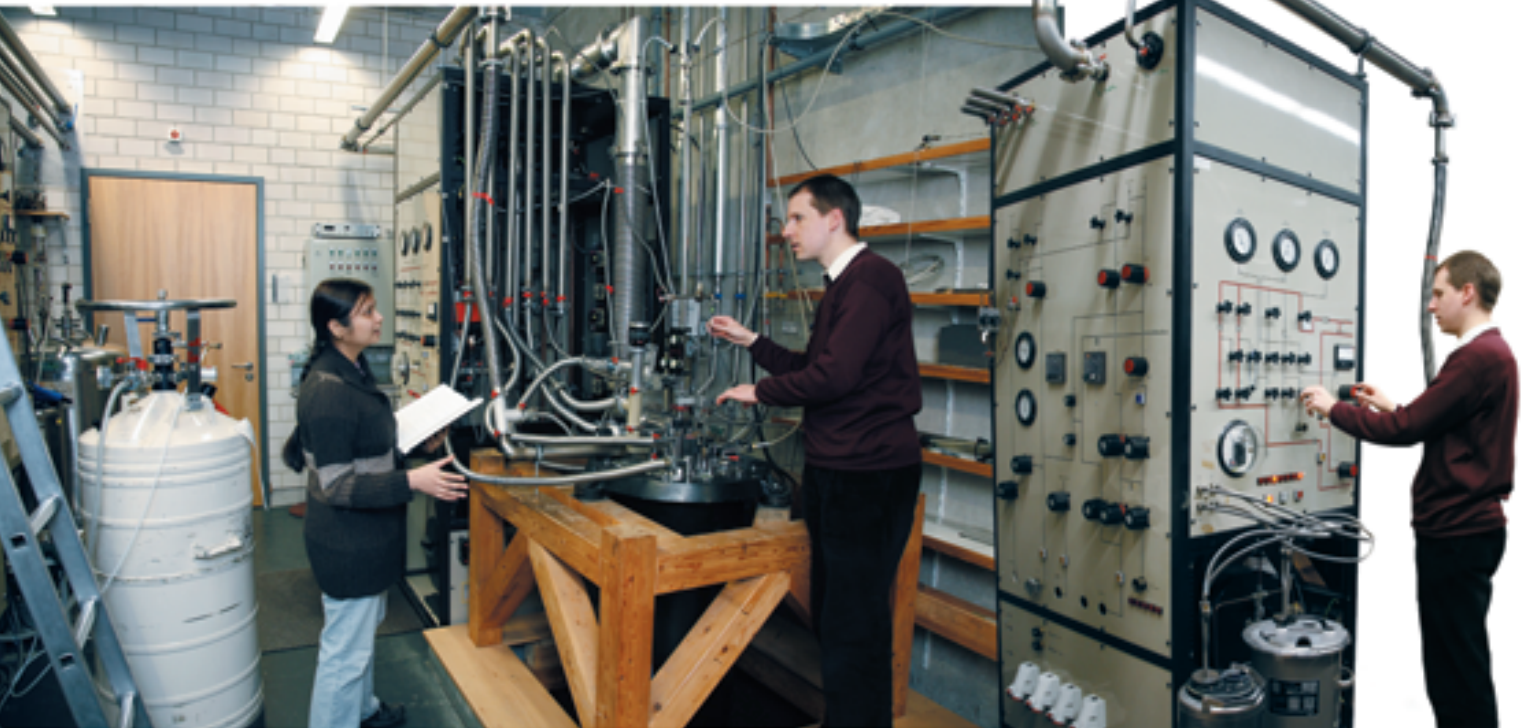


Exotischen Zuständen der Materie auf der Spur

Neuer Transregio-Sonderforschungsbereich zu wechselwirkenden Vielteilchensystemen



Der kälteste Punkt in Frankfurt ist dieses Tieftemperaturlabor im Physikalischen Institut der Universität Frankfurt. Die Arbeitsgruppe von Prof. Dr. Michael Lang, im Bild Dr. Ulrich Tutsch und Dr. Deepshikha Jaiswal-Nagar, untersucht bei Temperaturen nahe dem absoluten Nullpunkt (-273 Grad Celsius) exotische Zustände der Materie.

Neuartige Supraleiter oder Materialien, die durch kleine Störungen vom Isolator zum Leiter oder sogar Supraleiter werden, geben der Forschung Rätsel auf. Sicher ist: Die überraschenden Effekte beruhen darauf, dass Quantenobjekte in großer Zahl miteinander wechselwirken. In einem neuen Transregio-Sonderforschungsbereich zu »komplexen Ordnungsphänomenen in kondensierter Materie« gehen Wissenschaftler unterschiedlichster Disziplinen diesen Phänomenen systematisch auf den Grund.

Ein Kubikzentimeter eines Festkörpers enthält etwa 10^{23} Atome und etwa ebenso viele Elektronen, zwischen denen gleichzeitig mehrere Wechselwirkungen aktiv sind. (10^{23} entspricht etwa der Zahl von Sandkörnern an allen Stränden und Wüsten der Erde). Bei dieser astronomisch großen Zahl an Teilchen ist die Vielfalt elektronischer Eigenschaften in Systemen mit starken Vielteilchen-Wechselwirkungen nicht überraschend. Die Elektronen stoßen sich aufgrund ihrer negativen Ladung gegenseitig ab, werden

jedoch von den positiv geladenen Ionenrümpfen des Kristallgitters angezogen. Darüber hinaus wird die Bewegung der Elektronen noch durch quantenmechanische Effekte beeinflusst: So darf der Spin (die mit dem Elektron verknüpfte magnetische Richtung) nur zwei verschiedene Einstellungen haben. Hinzu kommen weitere Einschränkungen der Bahnen, auf denen sich Elektronen im Festkörper bewegen können.

Das Zusammenwirken all dieser Effekte, deren relative Stärken und Einflüsse je nach Material und äußeren Bedingungen variieren können, erklärt die schier unbegrenzte Vielfalt elektronischer Eigenschaften in Festkörpern. Darunter sind so exotische Phänomene wie kollektive Quantenzustände in Supraleitern oder ungewöhnliche metallische Zustände in der Nähe eines wechselwirkungsgetriebenen Metall-Isolator-Übergangs (siehe »Unzertrennliche Paare oder größte Distanziertheit?«, Seite 88). Gleichzeitig wird aber auch deutlich, welche Herausforderung es darstellt, ein

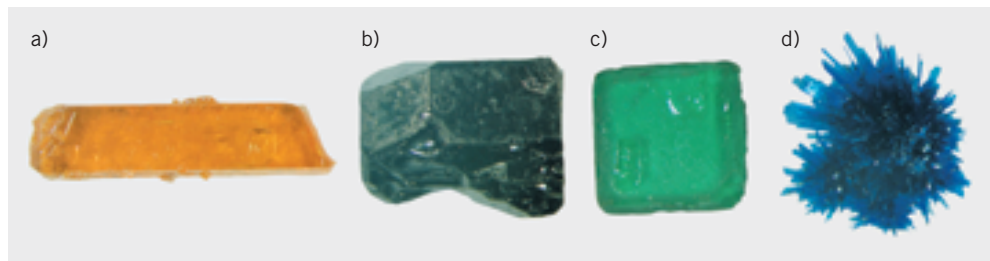
theoretisches Verständnis für die beobachteten Effekte zu entwickeln.

Komplexität reduzieren und schrittweise erhöhen

Was ist die Ursache für solche exotischen Zustände, welche Ordnungsmechanismen sind am Werk und was sind die Konsequenzen daraus? Diesen Fragen widmet sich der im Juli 2007 von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) eingerichtete Transregio-Sonderforschungsbereich SFB/TRR 49 »Condensed Matter Systems with Variable Many-Body Interactions«. In diesem Forscherverbund unter Frankfurter Federführung arbeiten etwa 80 Wissenschaftler der Universitäten Frankfurt, Kaiserslautern und Mainz sowie des Mainzer Max-Planck-Instituts für Polymerfor-

schung. Der hier verfolgte Disziplin übergreifende Ansatz vereint Wissenschaftler aus den Bereichen Festkörperphysik, Festkörperchemie, Materialwissenschaften und Quantenoptik. In den ersten vier Jahren wird das Projekt mit etwa 8,4 Millionen Euro gefördert.

Um komplexe Vielteilchen-Systeme besser zu verstehen und mit den gewonnenen Erkenntnissen neue Materialien mit bisher unbekanntem elektronischen Eigenschaften entwickeln zu können, verfolgt der Sonderforschungsbereich ein neues Konzept. Es beruht auf vergleichenden Untersuchungen ein und desselben Phänomens an Materialien mit unterschiedlichem Grad an Komplexität – von einfachen Modellsystemen bis zum komplexen Festkörper. **2** Damit

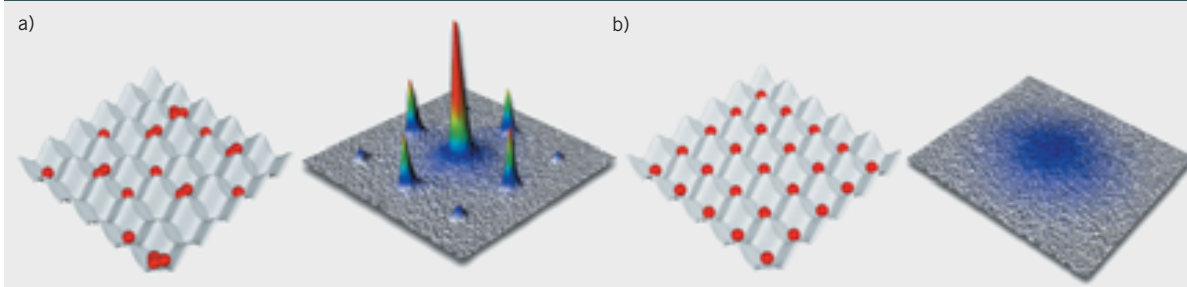


2 Die Farben dieser Kristalle von bernsteingelb über smaragdgrün bis tiefblau verdeutlichen ihre unterschiedliche elektronische Struktur, die sich unter anderem in der Wechselwirkung mit Licht bemerkbar macht; a: Cäsium-Kupferchlorid, b: Cäsium-Kupferbromid, c: ein betainhaltiger Kristall und d: ein Kupfer-Aminopyridin. Im Sonderforschungsbereich »Kondensierte Materiesysteme mit variablen Vielteilchen-Wechselwirkungen« versuchen Forscher Materialeigenschaften wie den Übergang von einem Metall zu einem Isolator zu verstehen, indem sie die Wechselwirkungen einer großen Anzahl von Elektronen unter verschiedenen Bedingungen studieren.

gen im Detail studieren. Ein besonders eindrucksvolles Beispiel, das in unmittelbarem Zusammenhang mit den Forschungsaktivitäten des Sonderforschungsbereichs steht, ist die Simulation des Übergangs von

design: Einem Baukastenprinzip folgend können molekulare Einheiten zu einem Festkörper zusammengebaut werden. Die Eigenschaften des Gesamtsystems lassen sich dann in gewissen Bereichen systematisch

Ultrakalte Quantengase im »Lichtgitter« von Laserstrahlen



3 a) Bose-Einstein Kondensat (suprafluid) Die Gesamtheit aller Atome lässt sich durch eine ausgedehnte Materiewelle beschreiben, jedoch fluktuiert die Zahl der Atome an jedem Gitterplatz. b) Mott-Isolator: Jeder Gitterplatz wird von genau einem Atom besetzt.

können die generischen Eigenschaften der Systeme von eher materialspezifischen Erscheinungen getrennt und somit die für das Phänomen relevanten Parameter identifiziert werden.

Eiskalte Atome im Laserstrahl

Am unteren Rand der Komplexitätsskala kommen »künstliche Festkörper« als einfache Modellsysteme mit gut kontrollierbaren Eigenschaften zum Einsatz. Dieser neue und vielversprechende Ansatz baut auf den bahnbrechenden Entdeckungen der letzten Jahre im Bereich der Atomphysik und Quantenoptik auf. Durch den Einsatz von Laserlicht ist es gelungen, Atome auf ultratiefe Temperaturen abzukühlen und sie in eine regelmäßige, dem Kristallgitter verwandte Anordnung zu zwingen. Die Atome bewegen sich in diesen künstlichen Kristallen ähnlich wie Elektronen in einem Metall. Durch die Vorgabe äußerer Parameter lassen sich damit gewisse elektronische Eigenschaften der Festkörper simulieren und unter gut kontrollierbaren Bedingun-

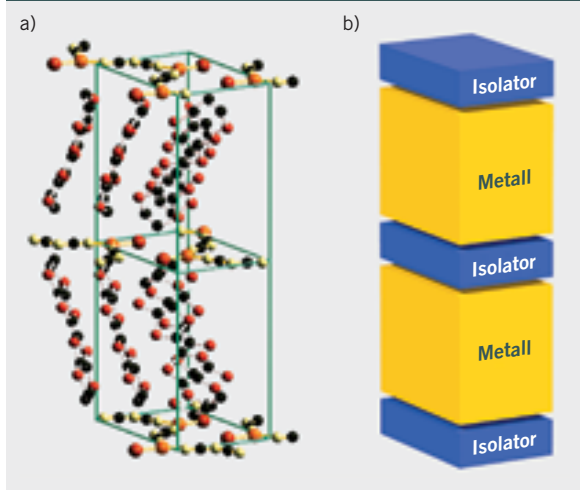
gen im Detail studieren. Ein besonders eindrucksvolles Beispiel, das in unmittelbarem Zusammenhang mit den Forschungsaktivitäten des Sonderforschungsbereichs steht, ist die Simulation des Übergangs von einem Zustand mit lokalisierten Atomen (ein Modell des Isolators) zu einem Zustand, der durch eine einzige ausgedehnte Materiewelle charakterisiert ist (das Analogon des Supraleiters) **3**. Bei diesem Übergang nimmt die ursprünglich starke Wechselwirkung zwischen den Atomen immer weiter ab.

Das Spektrum der zu untersuchenden Materialien reicht von diesen einfachen Modellsystemen bis hin zu komplexen realen Festkörpern, die die Chemiker und Materialwissenschaftler des Sonderforschungsbereichs aus molekularen Bausteinen zusammenfügen können. Ähnlich wie bei den Quantengasen ergeben sich durch den molekularen Ansatz vielfältige Möglichkeiten für ein gezieltes Material-

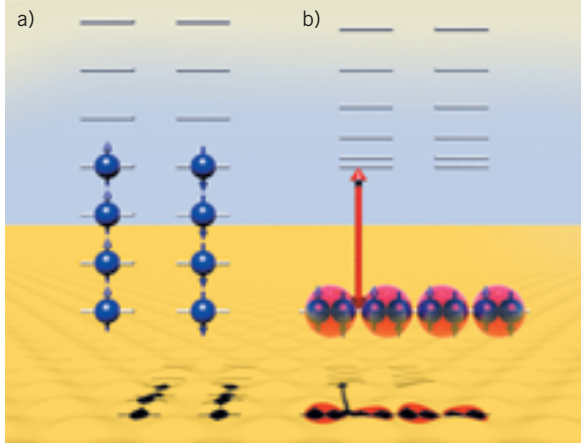
variieren, indem man die Bausteine oder die sie verbindenden Einheiten verändert. **4** Auch die Variation äußerer Parameter wie Druck oder Temperatur führt zu veränderten Materialeigenschaften. Insbesondere molekulare Festkörper sind in letzter Zeit zu einem hochaktuellen Forschungsgebiet nicht nur der grundlagenorientierten Forschung geworden: Sie besitzen ein hohes

4 Die untersuchten Festkörperstrukturen, hier ein molekularer Festkörper, sind oft komplex (links). Das Bauprinzip ist jedoch meist einfach, wie die rechte Seite der Grafik zeigt. Bei dieser Struktur stapeln sich abwechselnd elektrisch isolierende Schichten aus Anionen (blau) und elektrisch leitende Schichten aus organischen ET-Molekülen (gelb) übereinander.

Ein Baukastenprinzip für Festkörper



Unzertrennliche Paare oder größte Distanziertheit?



a) Im normalen Metall besetzen Elektronen jeden Zustand maximal einfach (a).

b) Im Supraleiter bilden sich Elektronenpaare, die den energieärmsten Zustand mehrfach besetzen. Eine Energielücke (roter Pfeil) sorgt für die besondere Stabilität dieses Zustands (b).

Elektronen stoßen sich in der Regel aufgrund ihrer negativen Ladung gegenseitig ab. Für viele der bekannten, sogenannten »klassischen« Supraleiter wie Blei oder Aluminium ist noch eine weitere Wechselwirkung von Bedeutung – die Anziehung, die ein positiv geladenes Ion des Kristallgitters (regelmäßige Anordnung von Atomen oder Ionen) auf die Elektronen ausübt. Diese anziehende Wechselwirkung kann dazu führen, dass sich Elektronen effektiv zu Paaren

(sogenannten Cooper-Paaren) zusammenfügen. Als Paar ist es ihnen möglich, den gleichen Quantenzustand einzunehmen wie alle anderen Elektronenpaare. Dieser gemeinsame Zustand verhält sich wie eine einzige große Materiewelle, die sich ohne Reibungsverluste durch den Festkörper bewegen kann.

Besonders spektakulär wird das Verhalten der Elektronen, wenn ihre abstoßende Wechselwirkung dominiert. Das kann durch gezielte Materialzusammensetzung und/oder geeignete äußere Bedingungen wie Temperatur oder Druck erreicht werden.

Bei diesen sogenannten starkwechselwirkenden Elektronensystemen kann ein ganz außergewöhnlicher Vielteilchen-Zustand eingenommen werden, der es den Elektronen ermöglicht, sich so weit wie möglich aus dem Wege zu gehen. Der Preis dafür ist ein Verlust an Beweglichkeit – das Material ändert abrupt seinen Zustand und wird zum Isolator. Die Komplexität dieses scheinbar einfachen Vielteilchen-Zustandes wird deutlich, wenn man das System ein wenig stört, etwa durch den Austausch weniger Prozent der Atome des Ausgangsmaterials (Dotierung) oder durch äußeren Druck. Dann wird aus dem ursprünglichen Isolator ein exotischer supraleitender Zustand. Supraleitung in diesen stark wechselwirkenden Elektronensystemen impliziert die Bildung von Elektronenpaaren »trotz« oder vielleicht sogar »gerade wegen« der starken Abstoßung der Elektronen untereinander.

Nähere Informationen: www.tr49.de

Maß an Variabilität und zeichnen sich durch eine Fülle von einstellbaren elektronischen Eigenschaften aus. Daher sind sie für viele Bereiche der technischen Anwendung von höchstem Interesse. Durch den Einsatz molekularer Bausteine oder Polymere können elektronische Schaltkreise noch erheblich verkleinert und kostengünstig produziert werden.

Theoretische Modelle sprengen Rechnerkapazität

Trotz der enormen Fortschritte, die in den letzten Jahren im Bereich der Vielteilchen-Physik zu verzeichnen sind, ist man von einer Beschreibung realer Materialien mit starken Vielteilchen-Wechselwir-

kungen noch weit entfernt. Die hier diskutierten theoretischen Modelle sind trotz ihrer stark vereinfachten Annahmen noch zu komplex, um mit den heute verfügbaren Rechenanlagen behandelt werden zu können. Hier bieten die oben beschriebenen Modellsysteme einen neuen Zugang: Weil die Systeme einfach und variabel sind, kann man gewisse theoretische Modelle mit ihren einschränkenden Annahmen im Labor nahezu exakt nachstellen und damit überprüfen, wie relevant der theoretische Ansatz für das reale Festkörpersystem ist.

Darüber hinaus bieten die im Labor hergestellten Modellsysteme erstmals die Möglichkeit, theoretische Vorhersagen über solche Zu-

stände kondensierter Materie zu testen, die kein reales Analogon in Festkörpern haben. Ein Beispiel ist das Phänomen der Farbsupraleitung in Systemen, bei denen die Partner der Cooper-Paare mehr als zwei Einstellmöglichkeiten bezüglich des magnetischen Momentes haben [siehe Walter Hofstetter: »Eiskalte Atome«, in Forschung Frankfurt 4/2006].

Eine weitere wesentliche Frage ist, wie sich Modifikationen an den Bausteinen des Materials auf die Eigenschaften des Festkörpers auswirken. Verfügt man über eine hinreichend gute theoretische Beschreibung des Materials, so kann man die Auswirkungen zunächst am Computer simulieren und dann entscheiden, ob sich eine Realisierung im Labor lohnt. Die hieraus gewonnenen Erkenntnisse könnten dazu beitragen, Werkstoffe mit maßgeschneiderten Eigenschaften künftig gezielter zu entwerfen. Das tiefere Verständnis der exotischen Zustände könnte auch wichtige Impulse für die Entwicklung neuer Materialien liefern, die bisher unbekannte und faszinierende elektronische Eigenschaften aufweisen. ♦

Die Autoren

Prof. Dr. Michael Lang, 48, studierte Physik an der TU Darmstadt. Nach der Promotion verbrachte er einen Forschungsaufenthalt als Postdoc am Institute for Materials Research der Tohoku Universität in Sendai, Japan. Nach seiner Habilitation in Darmstadt im Fach Festkörperphysik im Jahr 1996 wechselte er als Forschungsgruppenleiter an das Max-Planck-Institut für chemische Physik fester Stoffe nach Dresden. Seit 2000 ist er Professor für Physik in Frankfurt. Seine Arbeitsgruppe beschäftigt sich mit Experimenten an stark korrelierten Elektronen und Spins. Er ist Sprecher des im Juli 2007 gegründeten Transregio-Sonderforschungsbereichs SFB/TRR 49 »Condensed Matter Systems with Variable Many-Body Interactions«.

Michael.Lang@physik.uni-frankfurt.de

Dr. Ulrich Tutsch, 36, studierte Physik an der Universität Karlsruhe. Im Anschluss an die Promotion ging er 2003 für zwei Jahre als Postdoc an die Universität Genf. Seit 2005 ist er in der Arbeitsgruppe von Prof. Dr. Lang tätig. Im September 2007 wurde er Wissenschaftlicher Koordinator des SFB/TRR 49.

tutsch@physik.uni-frankfurt.de