

Vom suprasoliden Helium zur Physik der DNA

Highlights aus dem Programm des Arbeitskreises Festkörperphysik

Rainer Scharf

Der Arbeitskreis Festkörperphysik (AKF) war auf seiner diesjährigen Frühjahrstagung wieder zu Gast an der Technischen Universität Dresden. Aus 43 Ländern kamen rund 4200 Teilnehmer und machten die Elbmetropole zum Mekka der Festkörperforschung.

Suprasolid Helium

Die Dresdner Tagung begann mit einer spektakulären Bekanntgabe. Moses Chan von der Pennsylvania State University berichtete über Experimente an festem Helium, die an seinem Labor durchgeführt wurden. Vor zwei Jahren hatten Chan und Eun-Seong Kim mit der Beobachtung Aufsehen erregt, dass in festem He-4 suprafluide Strömungen auftreten können. Sie hatten mit einem Torsionsoszillator das Trägheitsmoment eines kleinen, mit He-4 gefüllten Behälters gemessen. Bei einem Druck von mindestens 26 bar und unterhalb von 2 Kelvin gefror das Helium und rotierte starr mit dem Behälter. Unterhalb von 0,2 Kelvin nahm das gemessene Trägheitsmoment aber plötzlich ab, so als würde ein Teil des kristallinen Heliums die Drehbewegungen des Behälters nicht mehr mitmachen.

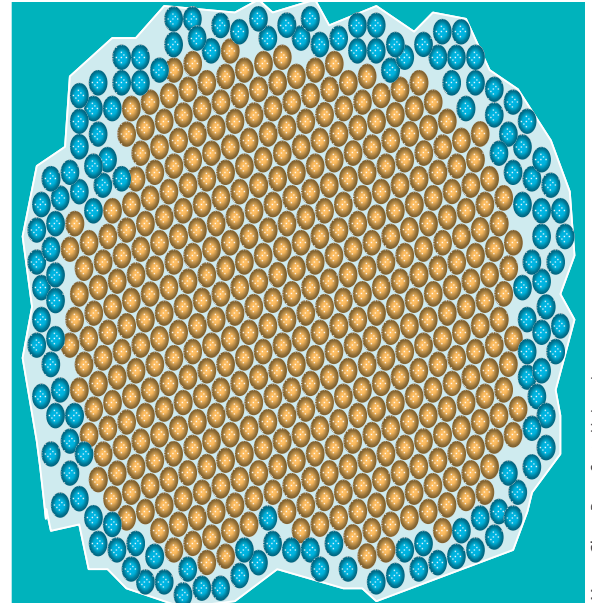
Vieles deutete darauf hin, dass Chan und Kim suprafluides Verhalten eines Festkörpers aus bosonischen Atomen beobachtet hatten. So gab es eine kritische Rotationsgeschwindigkeit, oberhalb der es keine suprafluide Strömung durch den Kristall mehr gab und sich das Helium wieder vollständig mit dem Behälter drehte. Wurde das Experiment mit kristallinem, fermionischen He-3 wiederholt, so trat überhaupt keine Suprafluidität auf. Der von Chan und Kim entdeckte

„suprasolide“ Quantenzustand hat bisher noch keine endgültige Erklärung gefunden, doch sollten Leerstellen im Heliumkristall eine wichtige Rolle dabei spielen. So hatten O. Penrose und L. Onsager gezeigt, dass es in einem perfekten Kristall mit lokalisierten bosonischen Atomen keine Bose-Einstein-Kondensation gibt, die zu einem suprafluiden Kondensat führen würde. Außerdem haben Chan und Kim beobachtet, dass der suprafluide Anteil im kristallinen Helium-4 bis 55 bar mit dem Druck zunimmt. Bei diesem Wert erreicht er ein Maximum von 1,5 %, um dann wieder abzunehmen. Dies könnte daran liegen, dass der zunehmende Druck zunächst Leerstellen im Kristall erzeugt, sie aber über 55 bar wieder verschwinden lässt.

Wie einzigartig ist nun dieser suprasolide He-4-Zustand? Von den bosonischen Molekülen des normalen Wasserstoffs vermutet man, dass sie unter geeigneten Bedingungen auch eine Suprafluidität bilden können. Der experimentelle Nachweis steht aber noch aus.

QED im Hohlraum

Wie man künstliche Atome herstellt und in einem eindimensionalen „Hohlraum“ mit einzelnen Photonen wechselwirken lässt, erläuterte Steven Girvin von der Yale University. Er beschrieb das Experiment seiner Kollegen Robert Schoelkopf und Andreas Wallraff. Es ist die Antwort der Festkörperphysik auf die Cavity-QED-Experimente der Atomphysik, bei denen ein Atom in einem Hohlraum ein einzelnes Photon wiederholt emittiert und absorbiert. Das künstliche Atom bestand aus einer Cooper-Paar-Box: einer schmalen supraleitenden Insel, die über zwei Jose-



Moses Chan, Penn State University

phson-Tunnelkontakte mit einem größeren, ebenfalls supraleitenden Reservoir verbunden war. Durch die Kontakte konnten die Cooper-Paare, zu denen sich Elektronen in einem Supraleiter zusammenschließen, vom Reservoir auf die Insel gelangen. Mit einer Gate-Spannung ließ sich erreichen, dass die Insel nur N oder $N+1$ Cooper-Paare aufnehmen konnte: Die Cooper-Paar-Box war ein Zwei-Niveau-System mit Grundzustand und angeregtem Zustand. Das künstliche Atom konnte also ein Qubit aufnehmen.

Um den Quantenzustand des künstlichen Atoms messen und verändern zu können, wurde es an einen „Hohlraum“ gekoppelt, der aus einem Mikrometerbreiten und einige Millimeter langen supraleitenden Streifen bestand. Dieser Resonator ließ normalerweise nur Mikrowellenstrahlung einer bestimmten Resonanzfrequenz durch. Doch wenn die Resonanzfrequenz mit der Anregungsfrequenz des künstlichen Atoms zusammenfiel, so verstimmte sich der Resonator. Das Atom konnte dann in schneller Folge ein Mikrowellenphoton

Suprasolid Helium: Wenn Helium-4 kristallisiert, ist ein geordneter Kern (gelb) von einer amorphen Schicht (blau) umgeben.

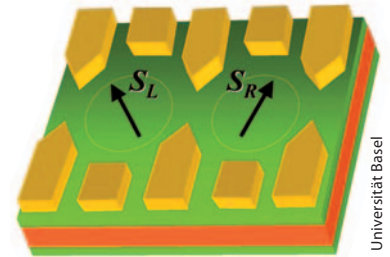
absorbieren, wieder abstrahlen, erneut absorbieren und so fort. An der Verstimmung des Resonators ließ sich die Frequenz dieser Rabi-Oszillationen ablesen. Das große Dipolmoment des künstlichen Atoms und die hohe Feldstärke im eindimensionalen Resonator führen zu einer viel stärkeren Kopplung zwischen Atom und Mikrowellenfeld als bei Cavity-QED-Experimenten mit „echten“ Atomen.

Die starke Kopplung zwischen künstlichem Atom und dem Mikrowellenfeld ermöglicht es, mit einzelnen Mikrowellenphotonen den Atomzustand abzufragen und das in ihm gespeicherte Qubit auszu-lesen. Darüber hinaus ist es Girvin und seinen Kollegen gelungen, den Quantenzustand des Atoms durch Mikrowellenpulse kohärent zu kontrollieren. Der störende Einfluss der Umwelt machte sich dabei erst nach einigen Mikrosekunden bemerkbar. Mit diesen Eigenschaften empfehlen sich die supraleitenden künstlichen Atome als Bausteine für künftige Quantencomputer. Dazu müssten mehrere dieser Atome auf einem Chip sitzen und über Mikrowellenphotonen miteinander kommunizieren. Das wiederum setzt eine möglichst photonengenaue Kontrolle des Mikrowellenfeldes im Resonator voraus. Kürzlich konnten die Yale-Forscher tatsächlich für das Mikrowellenfeld Zustände mit unterschiedlicher Photonenzahl auflösen.

Spin zum Speichern

Ein Elektronenspin in einem Magnetfeld ist das ideale Zwei-Niveau-System. Es liegt deshalb nahe, Qubits in Elektronenspins zu speichern. Wenn man Elektronen auf Quantenpunkten lokalisiert, kann man ihre Spins wesentlich besser kontrollieren und gegen störende Umwelteinflüsse abschirmen als das normalerweise in Festkörpern möglich ist. Daniel Loss von der Universität Basel berichtet über den Forschungsstand des Quanten-Computing mit Spin-Qubits in solchen Halbleiter-Nanostrukturen. Hält man ein einzelnes Elektron in einem Halbleiter-Quantenpunkt fest, so hat man ein lokalisiertes und adressierbares Spin-Qubit, das man z. B. durch ein starkes Magnetfeld oder durch optisches Pumpen mit zirkular polarisierter Laserstrahlung in einen definierten Anfangszustand bringen kann.

Die Verarbeitung von Qubits, kann man in einzelne Schritte zerlegen, die von Einzelspin- oder Zweispin-Gates erledigt werden. Wie die Implementierung solcher Spin-Gates mit Quantenpunkten aussehen könnte, hatten Daniel Loss und David DiVincenzo schon 1998 beschrieben. Ein einzelnes Spin-Qubit kann durch einen dosierten Magnetfeldpuls in gewünschter Weise gedreht werden. Beim Zweispin-Gate, das aus zwei benachbarten, mit je einem Elektron besetzten Quantenpunkten besteht, verändert man durch ein gepulstes



Universität Basel

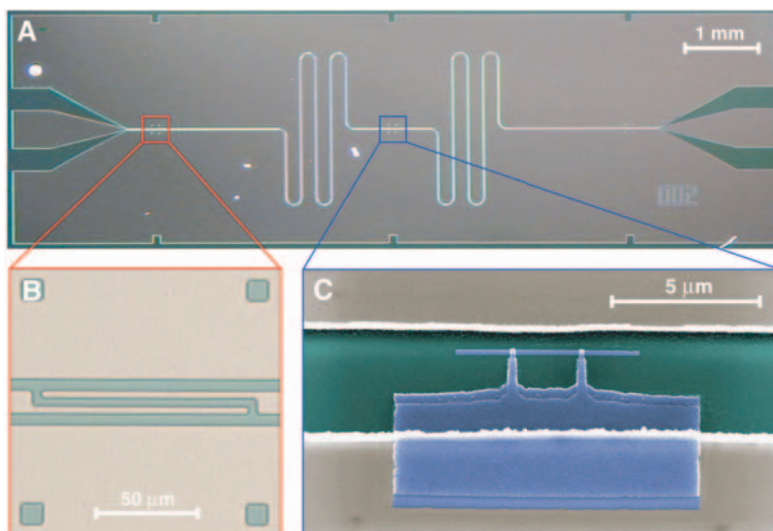
Zwei benachbarte Elektronenspins werden in Quantenpunkten festgehalten. Ein möglicher Schritt zum Quantencomputer.

elektrisches Feld vorübergehend die Tunnelbarriere zwischen den Punkten und bringt dadurch kurzfristig die magnetische Wechselwirkung zwischen den Spin-Qubits ins Spiel. Im vergangenen Jahr gelang es Jason Petta von der Harvard University und seinen Kollegen, auf diese Weise zwei gekoppelte Elektronenspins auf einem Galliumarsenid-Doppelquantenpunkt kohärent zu beeinflussen und ihre Quantenzustände auszutauschen. Dieser „Swap“ benötigte nur etwa 350 ps und war damit viel kürzer als die Kohärenzzeit, innerhalb der der Zustand eines Qubits zerstört wurde, die bis zu Mikrosekunden betragen kann.

Ein weiteres wichtiges Doppelspin-Gate ist das CNOT (kontrolliertes NOT), bei dem ein Bit invertiert wird oder nicht, je nachdem welchen Wert ein Kontrollbit hat. Kürzlich konnten Hans-Andreas Engel und Daniel Loss zeigen, dass man dieses Doppelspin-Gate verwirklichen kann, ohne die beiden Spins miteinander wechselwirken zu lassen. Vielmehr reichen dazu Bell-Messungen aus, bei denen man die Parität des Zustands der beiden Spins bestimmt. Dazu wird die Spin-Parität in Ladungsinformation umgewandelt, d. h. es wird gemessen, wie viele Elektronen auf jedem der beiden Quantenpunkte sitzen.

Der Spin eines Elektrons, das auf einem Galliumarsenid-Quantenpunkt sitzt, wird vor allem durch die Hyperfeinwechselwirkung mit den ca. 10^6 Kernspins des Quantenpunkts gestört. Der resultierende Kohärenzverlust lässt sich dadurch verringern, dass man die ungeordneten Kernspins ausrichtet, z. B. durch Polarisation oder durch Zustandsprojektion als

Der integrierte Schaltkreis für die Hohlraum-QED besteht aus einem mäandernden Resonator (A), der in der Mitte mit einer Cooper-Paar-Box (C, blau) verbunden ist. Diese enthält ein supraleitendes Niob-Reservoir, das über Josephson-Kontakte an eine schmale Nb-Insel gekoppelt ist.



Yale University

Folge einer Messung. Daniel Loss hat eine Methode vorgestellt, wie man durch Messung der Rabi-Oszillationen zwischen verschiedenen Spinzuständen zweier Elektronen auf einem Doppelquantenpunkt die statistische Verteilung der Kernspin-Resonanzen schmaler machen und das Quantensystem der Kernspins in einen spezifischen Zustand bringen kann. Die in Aussicht gestellt Quantenkontrolle von Millionen von Kernspins eröffnet für das Quanten-Computing ungeahnte Möglichkeiten.

Spin-Hall-Effekt

Der Elektronenspin spielt auch beim Spin-Hall-Effekt die entscheidende Rolle, über den Peter Schwab von der Universität Augsburg berichtete. Dabei sitzen die Elektronen nicht in Quantenpunkten fest, sondern können sich frei in einer dünnen Halbleiterschicht bewegen. Wird ein in der Schicht fließender Elektronenstrom einem äußeren elektrischen Feld ausgesetzt, das senkrecht zur Schicht steht, dann fließt – ähnlich wie beim Hall-Effekt – ein zusätzlicher Strom senkrecht zum Feld und zur Bewegungsrichtung der Elektronen. Beim Spin-Hall-Effekt ist dies jedoch kein Ladungsstrom, sondern ein Spinstrom. David Awschalom und seine Mitarbeiter hatten 2004 zum ersten Mal beobachtet, wie sich unter der Wirkung eines senkrechten elektrischen Feldes Spins, die parallel bzw. antiparallel zum Feld ausgerichtet waren, an den beiden gegenüberliegenden Rändern eines Galliumarsenidstreifens ansammelten.

Zur Erklärung des Spinstroms wurden zwei verschiedene Mechanismen vorgeschlagen, die beide auf die Spin-Bahn-Kopplung zurückgreifen. Da sich die Elektronen im äußeren elektrischen Feld bewegen, verspüren sie ein Magnetfeld senkrecht zum elektrischen Feld und zum Strom, das die Spins präzedieren lässt. Beim intrinsischen Mechanismus führt die neue Ausrichtung der Spins aufgrund der Spin-Bahn-Kopplung zu einem effektiven Spinstrom. Beim externen

Mechanismus werden Störstellen in der Schicht dafür verantwortlich gemacht, dass entgegengesetzte Spins in entgegengesetzte Richtungen abgelenkt werden und so zu einem Spinstrom führen. Awschalom und seine Mitarbeiter hatten ihre Beobachtungen dem externen Spin-Hall-Effekt zugerechnet.

Peter Schwab und seine Kollegen haben den Spin-Hall-Effekt in einem zweidimensionalen Elektrogenas theoretisch und numerisch untersucht. Dabei machten sie einen quasiklassischen Ansatz, der es ihnen gestattete, den Ladungstransport sowohl für ballistische Bewegung als auch für diffusive Ausbreitung zu studieren. Für eine Schicht ohne Störstellen war die Spin-Hall-Leitfähigkeit, die einen Zusammenhang zwischen Spinstromstärke und Stärke des äußeren elektrischen Feldes herstellt, das $e/8\pi$ -Fache einer Windungszahl. Diese Zahl ergab sich durch Integration des von der Spin-Bahn-Kopplung hervorgerufenen Magnetfeldes längs eines geschlossenen Pfades auf der Fermi-Fläche. Sie lässt sich als Berry-Phase im Impulsraum interpretieren.

QED im Bleistiftstrich

Während dünne Schichten auf Festkörperoberflächen schon seit langem erforscht werden, weiß man über die physikalischen Eigenschaften freistehender zweidimensionaler „Kristalle“ nur wenig. Entsprechend groß war das Interesse am Vortrag von Kostya Novoselov, der über Experimente an einzelnen Graphitschichten berichtete, die er in der Gruppe von Andre Geim an der University of Manchester durchgeführt hat. Solche Schichten bestehen aus einer oder wenigen Monolagen von Kohlenstoffatomen, die entrollten Kohlenstoff-Nanoröhren gleichen. Man stellt sie her, indem man von einem Graphitkristall einzelne Schuppen abnimmt, etwa so wie man mit Kreide auf einer Tafel schreibt. Diese zweidimensionalen Graphenkristalle waren erstaunlich robust. Sie lagen während der Experimente ledig-

lich auf schmalen Goldstreifen, bei Zimmertemperatur und beidseitig von Luft umgeben.

Noch erstaunlicher waren die elektrischen Eigenschaften der untersuchten Schichten. Graphen ist ein Halbleiter ohne Bandlücke und besitzt eine gute Leitfähigkeit. Das Valenzband und das Leitungsband haben in der Nähe des Ursprungs der Impulsebene die Form zweier übereinander stehender Kegel, deren Spitzen sich berühren. Dieser lineare Zusammenhang zwischen Energie und Impuls hat zur Folge, dass die Bewegung der Elektronen von einer zweidimensionalen Dirac-Gleichung für masselose Fermionen beschrieben wird, wobei die effektive „Lichtgeschwindigkeit“ etwa $c/300$ beträgt. Dadurch wird es möglich, an Graphenschichten ungewöhnliche Effekte zu studieren, denen die relativistische Quantenphysik zugrunde liegt.

Ein Beispiel dafür ist der unorthodoxe Quanten-Hall-Effekt des Graphen, den die Geim-Gruppe sowie Horst Störmer und seine Mitarbeiter im vergangenen Herbst beobachtet hatten. Setzt man eine dünne Schicht eines elektrischen Leiters einem senkrechten Magnetfeld aus und legt längs der Schicht eine elektrische Spannung an, so tritt quer zu dem dann fließenden Strom eine Hall-Spannung auf. Die Hall-Leitfähigkeit, die den linearen Zusammenhang zwischen Strom und Hall-Spannung beschreibt, nimmt normalerweise mit wachsender Stärke des Magnetfeldes stetig ab. Doch bei sehr tiefen Temperaturen beobachtet man den ganz-zahligen Quanten-Hall-Effekt: Die Leitfähigkeit hat Plateaus bei Vielfachen eines Leitfähigkeitsquantums. Solche Stufen zeigte auch der Hall-Widerstand der monoatomaren Graphenschichten, allerdings schon bei Zimmertemperatur. Die Stufen beim Graphen waren aber systematisch verschoben verglichen mit den Stufen für ein nichtrelativistisches Elektronengas. Der Grund: Die Dirac-Gleichung gibt den Elektronen in der Graphenschicht einen zusätzlichen Pseudospin. Wenn sich ein Elektron und sein Pseudospin längs einer geschlossenen

Zyklotronbahn um 360° gedreht haben, dann hat die Wellenfunktion des Elektrons ihr Vorzeichen geändert. Dies wiederum ändert die Quantisierungsbedingungen für die Landau-Niveaus, die dem Quanten-Hall-Effekt zugrunde liegen.

Geim und seine Kollegen haben auch bei Graphendoppelschichten mit zwei Atomlagen einen Quanten-Hall-Effekt beobachtet. Die Kopplung der Einzelschichten führt zu einem doppelten Vorzeichenwechsel, der die Verschiebung der Leitfähigkeitsstufen rückgängig macht. Dennoch ist auch dieser Quanten-Hall-Effekt unorthodox: Es fehlt die Stufe mit der Leitfähigkeit Null, d. h. die Doppelschicht ist auch in extrem starken Magnetfeldern ein metallischer Leiter.

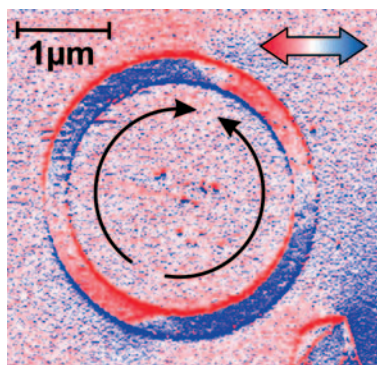
Transport durch Einzelmoleküle

Auch beim Ladungstransport durch einzelne Moleküle können überraschende Dinge passieren, wie Felix von Oppen von der Freien Universität Berlin berichtete. Anders als z. B. bei Quantenpunkten sind in Molekülen nur wenige, klar abgegrenzte Schwingungsmoden an den Ladungstransport gekoppelt. Die Anregung dieser Moden verrät sich durch Stufen in der Strom-Spannungscharakteristik, wie man sie z. B. für H_2 -Moleküle oder Polymere beobachtet hat. Eine Schwingung, die in einem stromdurchflossenen Molekül von einem Elektron angeregt worden ist, kann bis zu einigen Nanosekunden benötigen, um

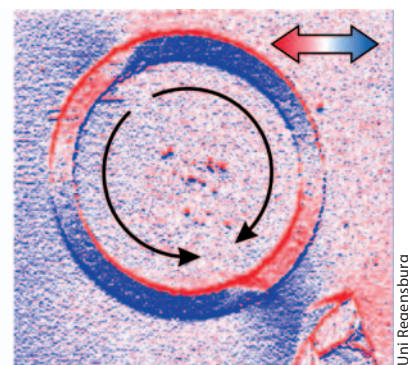
wieder abzuklingen. Wenn in dieser Zeit schon die nächsten anregenden Elektronen kommen, wird die Schwingung noch mehr angeregt und immer weiter aus dem Gleichgewicht getrieben.

Eine starke Kopplung zwischen Elektronen und Schwingungsmoden kann den Elektronentransport durch das Molekül unerwartet beeinflussen. Fügt man ihm ein Elektron hinzu, so verändern sich die Positionen der Atomkerne im Molekül und mit ihnen die Schwingungsmoden. Wie schnell das Elektron das Molekül wieder verlassen kann, hängt u. a. davon ab, wie groß der Überlapp der Schwingungsmoden mit und ohne Elektron ist. Dieser Überlapp, der durch die Franck-Condon-Matrixelemente gegeben wird, ist für Schwingungszustände in der Nähe (und einschließlich) des Grundzustandes viel kleiner als für höher angeregte Zustände. Da die Schwingungsmoden anfangs kaum angeregt sind, wird durch diese „Franck-Condon-Blockade“ der Ladungstransport zunächst stark behindert.

Doch wenn die Schwingungsanregungen nur sehr langsam abklingen, dann treibt der Strom die Schwingungsmoden aus dem thermischen Gleichgewicht, es sammeln sich immer mehr Phononen an und die Blockade wird aufgehoben. Plötzlich setzt ein lawinenartiger Ladungstransport ein, der allerdings wieder aufhört, sobald die Schwingungsmoden zum Grundzustand zurückgekehrt ist. Die Franck-Condon-Blockade führt



Mikromagnetische Strukturen in magnetischen Ringen, lassen sich mittels differentieller Phasenkontrast (DPC) im Elektronenmikroskop sichtbar machen. Die halbkreisartigen Pfeile zeigen schematisch



den Verlauf der Induktion innerhalb des Rings. Zwischen den beiden Bildern hat sich die Gesamtinduktion um ca. 60° Grad gedreht. Die lokale Induktionsstärke ist über die Farbintensität dargestellt.

zu einem erratischen Ladungstransport, bei dem sich längere Wartezeiten mit plötzlich auftretenden Lawinen abwechseln. Dieses Geschehen zeigt zudem Selbstähnlichkeit des Ladungstransports und führt zu einem charakteristischen Rauschen des Stroms durch das Molekül, dessen Frequenzspektrum wie $f^{-1/2}$ abfallen sollte.

Scharfer Blick auf Domänen

Ferromagnetische Mikrostrukturen haben vielfältige Anwendungen, z. B. in Datenspeichern oder Sensoren. Die in diesem Bereich rasch fortschreitende Miniaturisierung wirft jedoch ein Problem auf: Verhalten sich magnetische Mikrostrukturen so wie man es aufgrund der makroskopischen Eigenschaften der Materialien erwartet? Eine Antwort kann die Lorentz-Transmissionselektronenmikroskopie (L-TEM) geben. Sie ermöglicht es, die magnetische Domänenstruktur mikroskopischer Objekte mit bisher unerreichter Auflösung sichtbar zu machen, wie Josef Zweck von der Universität Regensburg an mehreren Beispielen zeigte. Die L-TEM beruht darauf, dass die Elektronenwellen beim Durchgang durch eine magnetische Domäne aufgrund der Lorentz-Kraft abgelenkt werden, was man alternativ auch durch eine Phasenverschiebung beschreiben kann. Dies ermöglicht es, magnetische Strukturen mit einer Auflösung von etwa 5 nm sichtbar zu machen.

Mit Hilfe der L-TEM kann man z. B. die Bewegung eines magnetischen Wirbels in einer mikrometergroßen ferromagnetischen Scheibe studieren. Der etwa 20 nm große Wirbelkern, in dem die Magnetisierung aus der Scheibenebene herauszeigte, war von einer zirkulären Magnetisierung in der Scheibenebene umgeben. Durch ein langsam anwachsendes äußeres Magnetfeld konnte der Wirbel kontinuierlich in der Scheibe verschoben werden. Hatte die Scheibe hingegen in der Mitte ein Loch, dann blieb der Wirbel an dieser Störstelle hängen. Bei langsam zunehmendem Magnetfeld

bewegte sich der Wirbelkern bis zum Lochrand und verschwand dann darin. Er blieb auch dann noch verschwunden, wenn auf ihn eine Feldstärke wirkte, für die man angesichts seiner Bewegung in der lochlosen Scheibe sein Wiederauftauchen erwartet hätte. Wurde er dann schließlich wieder sichtbar, so ging er – der erhöhten Feldstärke entsprechend – sogleich auf Distanz zum Rand des Loches. Das Pinning an Löchern und Störstellen kann dazu führen, dass Wirbel bis über 100 nm weit springen.

Mit Hilfe der Elektronenholographie, einer Weiterentwicklung der L-TEM, konnten Zweck und seine Mitarbeiter den Feldverlauf in 150-500 nm großen und 6-8 nm dicken Permalloy-Scheibchen beobachten, die ummagnetisiert wurden und dabei Hysterese zeigten. Für kleine Scheibchen, die aus nur einer magnetischen Domäne bestanden, war die Ummagnetisierung abrupt: Die Magnetisierungsrichtung der Domäne wechselte, für ein hinreichend starkes äußeres Magnetfeld, von antiparallel zu parallel. Dabei zeigte sie eine rechteckige Hysteresekurve. Bei größeren Scheibchen verlief die Ummagnetisierung komplizierter. Ein antiparallel ausgerichteter Einzeldomänenzustand konnte in einen Wirbelzustand oder in einen Zustand mit C-förmigen Feldlinienverlauf übergehen, aus denen dann wieder eine einzelne, jetzt parallel magnetisierte, Domäne hervorging. In beiden Fällen trat Hysterese auf, doch die Ummagnetisierung durch Wirbelbildung erforderte ein wesentlich stärkeres Magnetfeld als die durch Bildung eines C-förmigen Feldes. Solche detaillierten Einblicke können dabei helfen, magnetische Nanostrukturen für leistungsfähige Magnetspeicher zu entwickeln.

Nanoporen für DNA

Wie man Nanotechnologie zur Untersuchung von Biomolekülen einsetzen kann, war das Thema des Vortrags von Cees Dekker von der Universität Delft. Er und seine

Kollegen haben ein Verfahren entwickelt, mit dem sie extrem kleine Löcher in Membranen aus Siliziumdioxid „bohren“ können. Zunächst stellen sie mit Elektronenstrahlolithographie und nass-chemischer Ätzung in der Membran 50 nm große Löcher her. Anschließend bringen sie den Rand eines solchen Loches durch Beschuss mit einem Elektronenstrahl zum Schmelzen, woraufhin das Loch schrumpft. Wenn es eine Größe von etwa 2 nm erreicht hat, stellen sie den Beschuss ein.

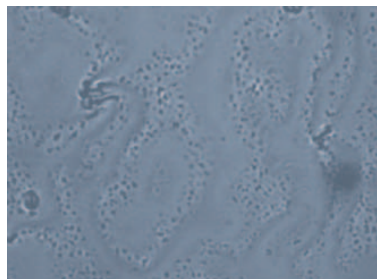
Solche „Nanoporen“ sind gerade groß genug, um ein DNA-Molekül durchzulassen. Um das zu zeigen, haben Dekker und seine Mitarbeiter einen wassergefüllten Behälter mithilfe einer einporigen Membran in zwei Kammern geteilt. In der einen Kammer wurden DNA-Moleküle im Wasser gelöst. Elektrophoretisch, also mit einer starken elektrischen Spannung, kann man die negativ geladenen DNA-Moleküle durch die Nanopore von einer Kammer in die andere ziehen. Wenn ein DNA-Molekül die Nanopore passiert, behindert es den Ionenstrom durch die Pore. An der Stärke des Ionenstroms lässt sich also ablesen, wann ein DNA-Molekül die Pore passiert und wie lange dies dauert. Dadurch erhält man auch Informationen über die Länge des DNA-Moleküls. Ziel ist es, ein DNA-Molekül mit Enzymen in Segmente zu zerlegen, deren Länge anhand des Ionenstromsignals zu messen und daraus die Basensequenz der DNA zu bestimmen.

Kürzlich gelang es der Dekker-Gruppe eine große Zahl DNA-Moleküle an einer mikroskopisch kleinen Perle zu befestigen, die in einem Laserfokus festgehalten wurde. Wenn eines der DNA-Moleküle elektrophoretisch in die Nanopore hereingezogen wurde, ließ sich an der Verschiebung der Perle im Laserfokus die auf das Molekül wirkende Kraft ablesen. Mit der Nanopore und der optischen Pinzette lassen sich auch DNA-Knäuel entwirren oder gefaltete RNA-Moleküle glätten. Auch andere Biomoleküle kann man bei ihrem Nanoporenterit beobachten und gezielt behindern, um die auftretenden Kräfte zu messen.

Gele und Granulate

Eine enorme Vielfalt von Strukturbildungsprozessen findet man in komplexen Kontinua, zu denen auch die Flüssigkristalle und Granulate gehören. Ingo Rehberg von der Universität Bayreuth hat aus dieser Vielfalt mehrere Beispiele vorgestellt, die er und seine Mitarbeiter experimentell untersucht haben. In chiral-nematischen Flüssigkristallen ordnen sich die Stäbchenmoleküle schraubenförmig an, wobei die Schraubenachse senkrecht zu den Molekülen steht. Bringt man den Flüssigkristall zwischen parallele Elektroden und legt eine Spannung an, so können sich drei Konfigurationen einstellen: (1) die Schraubenachse ist senkrecht zu den Elektroden orientiert oder (2) bei höheren Spannungen parallel; (3) bei sehr hohen Spannungen bricht die Schraubenstruktur zusammen. Während die erste Konfiguration optisch transparent ist, zeigt die zweite ein lichtundurchlässiges Muster ähnlich einem Fingerabdruck. Diesen elektrooptischen Effekt könnte man für Flüssigkristalldisplays nutzen, die mit unpolarisiertem Licht arbeiten und deshalb heller sind und einen größeren Betrachtungswinkel haben als gängige LC-Displays.

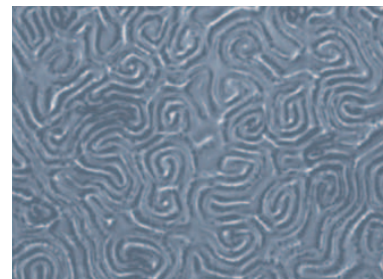
Rehberg und seine Mitarbeiter haben diesen Effekt an einem chiralen Gel untersucht, das aus einem nematischen Flüssigkristall und einem chiralen Geliermittel bestand. Setzten sie das Gel einer anwachsenden elektrischen Spannung aus, so ging es vom transparenten Zustand (1) in den Fingerabdruckzustand (2) über. Verringerten sie die Spannung wieder, so kehrt das Gel in den Zustand (1) zurück,



Bei einer Spannung von ca. 1,2 V bilden die Moleküle eines chiralen Gels ein Muster ähnlich eines Fingerabdrucks.

allerdings erst bei niedrigeren Spannungen: Das Gel zeigte also Multistabilität und Hysterese wie ein Ferromagnet, die für Flüssigkristalle unüblich ist. Die Relaxation des Gels in den Zustand (1) erfolgte nicht exponentiell wie bei reinen nematischen Flüssigkristallen sondern gestreckt exponentiell wie bei ungeordneten Systemen. Auch wenn chirale Gele sich noch nicht für Displays eignen, werfen sie viele interessante Fragen auf.

Eine Vielzahl von makroskopischen Strukturen kann man in Granulaten beobachten. Rehbergs Gruppe hat ein Granulat aus Glaskügelchen in einen ringförmigen Behälter („Bayreuther Ring“) gefüllt und in schnelle Vibrationen versetzt. Wenn die Beschleunigung des Behälters groß genug war, bildeten sich Bereiche, in denen das Granulat nicht länger den Behälterboden bedeckte, sondern mit großem Lärm umher sprang und eine Art „Modellgas“ bildete. Diese Bereiche bewegten sich mit hoher Geschwindigkeit (so wie „La Ola“ im Fußballstadion) den Behälter entlang. Bei sehr großer Beschleunigung war schließlich das ganze Granulat „gasförmig“ und blieb es zunächst auch dann, wenn die Beschleunigung wieder reduziert wurde: Es zeigte also Hysterese. Wurde die Beschleunigung unter den Wert abgesenkt, bei dem die ersten „gasförmigen“ Bereiche aufgetreten waren, so zeigte sich eine weitere Hysterese: Die „gasförmigen“ Bereiche blieben bestehen. Erst wenn die Beschleunigung noch weiter verringert wurde, kam das Granulat schließlich wieder zur Ruhe.



Die Spannung liegt senkrecht zur Bildebene (links: 0,12 V, rechts: 1,25 V).