

Monopole, Supraleiter, Drachenkönige

Highlights aus dem Programm der Sektion Kondensierte Materie (SKM)

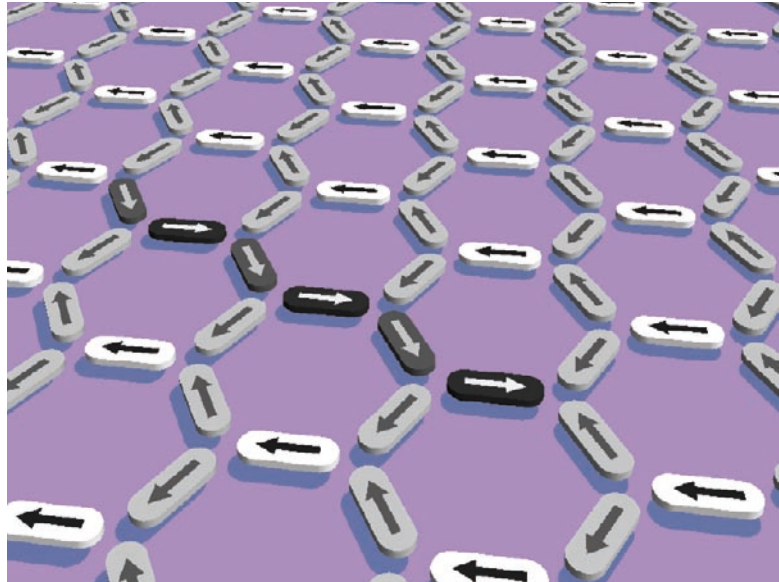
Rainer Scharf

Zu ihrer diesjährigen Frühjahrs-tagung hatte die Sektion Kondensierte Materie (SKM) gemeinsam mit der Sektion Atome, Moleküle, Quantenoptik und Plasmen (SAMOP) nach Dresden eingeladen. Mehr als 7600 Physikerinnen und Physiker nahmen an der Tagung teil, auf der 3980 Vorträge gehalten und 2349 Poster präsentiert wurden. Hier folgt eine Auswahl aus den Themen der SKM.

Monopole im Spineis

Bricht man einen Stabmagneten zwischen seinem Nord- und Südpol in der Mitte durch, so erhält man bekanntlich keine einzelnen Magnetpole. Doch Paul Dirac zufolge stünde die Existenz magnetischer Monopole, die durch „Dirac-Strings“ miteinander verbunden sind, durchaus in Einklang mit der Quantenmechanik. Bisher hat man jedoch noch keine „echten“ magnetischen Monopole gefunden. Erfolgreicher war die Suche nach Quasiteilchen, also an Materie gebundene elementare Anregungen, die sich wie magnetische Monopole verhalten. In bestimmten magnetischen Kristallen, die man als Spineis bezeichnet, treten magnetische Anregungen auf, bei denen sich der Nord- und der Südpol durch reihenweises Umklappen von Elektronenspins voneinander trennen, was allerdings bisher nicht direkt beobachtet wurde. Wie Laura Heyderman vom Paul-Scherrer-Institut in Villigen berichtete, treten auch in einem künstlichen Spineis aus Nanomagneten magnetische Monopole auf, deren Bewegungen sich detailliert verfolgen lassen.

Das künstliche Spineis, das Laura Heyderman und ihre Kollegen lithographisch gefertigt haben, besteht aus einer zweidimensionalen



H. B. Braun, UCD

Abb. 1 In einem hexagonalen Gitter aus Nanomagneten lassen sich sog. Dirac-

Strings erzeugen, deren Enden magnetische Monopole tragen.

Anordnung von stäbchenförmigen Nanomagneten, die jeweils eine magnetische Domäne enthalten. Die Nanomagnete bilden ein hexagonales Gitter: Jeweils sechs Stäbchen sind zu einem Ring angeordnet, wobei in jedem Gitterpunkt drei benachbarte Magnete mit einem Ende aneinanderstoßen (Abb. 1). Dadurch sind immer zwei benachbarte Magnete gezwungen, gleichnamige Pole einander zuzuwenden. Jeder Gitterpunkt trägt somit eine magnetische Ladung. Mit einem äußeren Magnetfeld parallel zur Gitterebene haben die Forscher die magnetischen Momente der Nanomagnete einheitlich ausgerichtet. Mithilfe von zirkular polarisierter Röntgenstrahlung konnten sie sichtbar machen, dass alle Momente soweit wie möglich in Feldrichtung orientiert waren und dass auf jeden Gitterpunkt mindestens ein und höchstens zwei Momente zeigten.

Wurde die Richtung des äußeren Magnetfeldes umgedreht, so orientierten sich die magnetischen Momente neu, indem sie

reihenweise umklappten. War ein Moment umgeklappt, so brachte es durch Dipolwechselwirkung seinen Nachbarn dazu, sich ebenfalls umzudrehen. Wie der Vergleich mit detaillierten Simulationen eines Teams um H. B. Braun am University College Dublin zeigte, traten Ummagnetisierungskaskaden längs eindimensionaler Wege auf. Dieses Verhalten unterschied sich von der bisher bekannten Ummagnetisierung in zwei- und dreidimensionalen Kristallen, die durch das Anwachsen von zwei- bzw. dreidimensionalen Domänen stattfindet. Die Ketten im künstlichen Spineis, entlang derer die magnetischen Momente umgeklappt waren, trugen an ihren Enden überschüssige Magnetpole. Diese Monopole waren durch die jeweilige Kette, die einem Dirac-String entsprach, locker miteinander verbunden. Sie konnten sich jedoch weitgehend ungehindert bewegen, wobei die Monopole je nach ihrer Ladung in oder entgegen der Feldrichtung liefen. Die Gruppe um Laura Heyderman kann die Bewegung dieser

+) Dieser Artikel wurde nach dem Druck des Heftes in der Online-Fassung geändert, um deutlich zu machen, dass die von L. Heyderman präsentierten Ergebnisse aus der Zusammenarbeit zwischen dem PSI und der Gruppe um H. B. Braun am University College Dublin hervorgegangen sind. Darüber hinaus wurde auch die Bildquelle korrigiert.

Monopole nicht nur beobachten, sondern auch beeinflussen. So ließe sich möglicherweise mit magnetischen Monopolen Information speichern.⁺⁾

Quantisiert gemessen

Dank des Quanten-Hall- und des Josephson-Effekts lassen sich elektrische Widerstände bzw. Spannungen sehr genau messen, indem man sie mit quantisierten Größen vergleicht. Für Stromstärken ist das bisher nicht möglich, da das Ampere über die Anziehungskraft zwischen stromdurchflossenen Drähten definiert ist. Doch auch die Stromstärke lässt sich auf quantisierte Größen zurückführen, indem man Elektronen einzeln mit einer Taktfrequenz f durch einen feinen Draht treibt. Der Strom ist dann durch $I = e \cdot f$ gegeben, wobei e die Elementarladung ist und die Frequenz f durch Vergleich mit einer Atomuhr gemessen werden kann. Für einen metrologisch nutzbaren Strom von einem Nanoampere müsste f im GHz-Bereich liegen. Die „Einzelelektronenpumpe“ dürfte sich dann in 10^9 Takten

nur einmal verzählen. Bisher sind die so herstellbaren Stromstärken noch zu gering oder zu ungenau, um sie metrologisch nutzen zu können. Doch es gibt Fortschritte, wie Bernd Kästner von der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) in Braunschweig berichtete.

Die an der PTB entwickelte Einzelelektronenpumpe besteht aus einem Halbleiter-Nanodraht mit abstimmbaren Tunnelbarrieren. Zwei auf dem Nanodraht sitzende Gates erzeugen im Draht einen Quantenpunkt. Wechsellspannungen auf den Gates modulieren die Eintritts- und die Austrittsbarriere des Quantenpunkts mit der Frequenz f . Zuerst senkt sich die Eintrittsbarriere, woraufhin Elektronen auf den Quantenpunkt gelangen. Dann hebt sie sich schnell, sodass die Elektronen nicht zurücktunneln können. Zugleich senkt sich die Austrittsbarriere, woraufhin die Elektronen den Quantenpunkt auf der anderen Seite verlassen. Durch Abstimmen der Spannungen versucht man zu erreichen, dass pro Takt genau ein Elektron den Quantenpunkt passiert. Mit mehreren Pumpen nebeneinander, die sich ein Eintrittsgate teilen, aber unter-

schiedliche Austrittsgates haben, ist die erforderliche Stromstärke auch bei einer niedrigeren Frequenz möglich, sodass sich die Fehlerrate verringern lässt. An der PTB wurden mit drei Pumpen bei 550 MHz Stromstärken von 265 Pikoampere erreicht.

Einzelelektronenpumpen ermöglichen auch quantisierte Spannungsnormale aus integrierten Halbleiter-Schaltkreisen. Das bisherige Spannungsnormale beruht auf dem Josephson-Effekt in schwach gekoppelten Supraleitern, der jedoch nicht in Halbleitern auftritt. Hier kann man stattdessen den Quanten-Hall-Effekt nutzen. Dabei ist der Hall-Widerstand quantisiert, sodass sich Widerstandswerte reproduzieren lassen, die ein Bruchteil R_K/n (n ganzzahlig) der von Klitzing-Konstanten $R_K = h/e^2$ sind. Liefert eine Einzelelektronenpumpe den Strom für das Hall-Element, so führen die Ladungs- und Widerstandsquantisierung zu einer quantisierten Hall-Spannung. Das hat den Vorteil, dass man die Elektronenpumpe und das Hall-Element in einen Halbleiter-Schaltkreis integrieren kann. Kästner zeigte ein Beispiel eines solchen integrierten Quantenschaltkreises, dessen Elektronenpumpe für eine Frequenz von einigen hundert MHz bis drei GHz betrieben wurde. Damit gelang es, die quantisierte Spannung $f \cdot h/e$ erstmals mit einem Halbleiterbauteil zu reproduzieren.

Fotoatelier Konvex

SKM-DISSERTATIONSPREIS

Deutsche Physikalische Gesellschaft



Den SKM-Dissertations-Preis 2011 erhielt Mathias Kolle (Mitte) für seine Dissertation über natürliche strukturelle Farben und bio-inspirierte photonische Strukturen. In Zusammenarbeit mit Biologen zeigte er, dass verschiedene blühende Pflanzen beugungsgit-

terähnliche Strukturen auf ihren Blütenblättern besitzen und die resultierenden richtungsabhängigen Farben von Bienen wahrgenommen werden. Den Preis überreichten der SKM-Sprecher Gerd Schön (rechts) und DPG-Präsident Wolfgang Sandner.

Reibung atomar gesehen

Reibungskräfte sind allgegenwärtig. Sie wirken beim Bremsen, führen zu Erdbeben und beeinflussen das Verhalten molekularer Motoren. Die Reibungskraft, die ein über eine Unterlage gleitender Körper verspürt, hängt bekanntlich nicht von seiner Geschwindigkeit und seiner Auflagefläche ab, sie ist jedoch proportional zur Normalkraft, mit der der Körper auf die Unterlage drückt. Diese einfachen Gesetzmäßigkeiten überraschen, da die Reibung auf komplizierten Nichtgleichgewichtsprozessen zwischen zahllosen Mikrokontakten

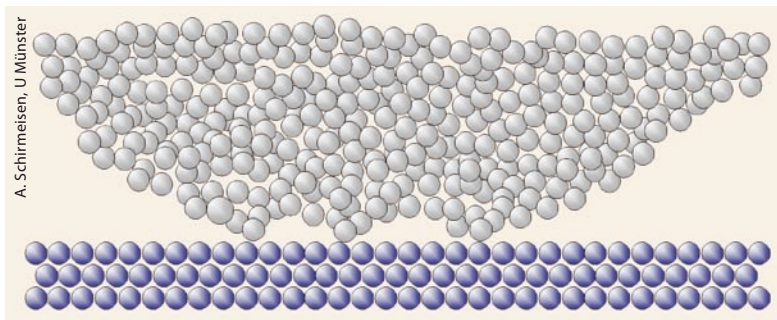


Abb. 2 Selbst eine wenige Nanometer große Mikroskopspitze (oben), die über eine atomar glatte Kristalloberfläche

gezogen wird, bildet viele atomare Kontaktstellen aus.

beruht. André Schirmeisen von der Universität Münster berichtete über Experimente und Computersimulationen, mit denen er und seine Kollegen die atomaren Grundlagen der Reibungskraft untersucht haben.

Zieht man die Spitze eines Rasterkraftmikroskops mit konstanter Geschwindigkeit über eine glatte Oberfläche, so bewegt sie sich ruckartig. Die Spitze bleibt immer wieder in einer der atomaren Mulden der Oberfläche hängen, bis sie sich sprunghaft weiter bewegt, sobald die Zugkraft groß genug ist. Bei dieser „Stick-Slip“-Bewegung nimmt die mittlere Reibungskraft mit zunehmender Oberflächentemperatur ab, während sie mit der Gleitgeschwindigkeit anwächst. Dies rührt daher, dass die in einer Potentialmulde festsitzende Spitze durch Wärmebewegung angeregt wieder freikommt. Die Anregungsversuche finden mit einer Frequenz von einigen zehn MHz statt. Je schneller sich die Spitze bewegt, desto weniger Zeit bleibt für die thermische Anregung. Die auf die festsitzende Spitze wirkende mittlere Zugkraft muss erst auf größere Werte anwachsen, bevor eine thermische Anregung sie befreit.

Selbst eine wenige Nanometer große Mikroskopspitze bildete auf einer Oberfläche eine Vielzahl von atomaren Kontaktstellen (Abb. 2). Wurde sie über eine atomar glatte Oberfläche gezogen, so nahm die Reibungskraft mit anwachsender Oberflächentemperatur erst zu, um oberhalb von 100 K wieder abzunehmen. Wie es dazu kam, untersuchten die Forscher an einem Modell: Thermisch aktiviert bildeten sich zwischen der Oberfläche

und der Spitze elastische molekulare Bindungen, die unter der Wirkung der an ihnen ziehenden Kräfte thermisch aktiviert rissen. Unterhalb von 50 K dominierte die Entstehung der Bindungen, sodass die Reibungskraft zunächst mit der Temperatur T zunahm. Doch oberhalb von 50 K waren bereits alle möglichen Bindungen hergestellt und die Reibung wurde nur durch das Zerreißen der Bindungen bestimmt, sodass die Reibungskraft nun mit T abnahm. Je höher die Gleitgeschwindigkeit war, umso weniger Bindungen konnten pro Zeiteinheit entstehen. Unterhalb von 50 K, wo die Bindungsentstehung dominiert, war die Reibungskraft deshalb umso kleiner, je schneller die Spitze bewegt wurde.

Ultraschnelle Strukturanalyse

Wie man mit ultrakurzen Laserpulsen extrem schnelle atomare Vorgänge in Kristallen und an DNS-Molekülen aufklären kann, stellte Thomas Elsässer vom Max-Born-Institut in Berlin vor. Durch Befeuchten einer Schicht aus DNS-Molekülen ließ sich regulieren, wie viele Wassermoleküle ein DNS-Molekül umgaben. Die Wassermoleküle bildeten untereinander und mit den DNS-Strängen Wasserstoffbrücken und wechselwirkten zudem über Coulomb-Kräfte. Mehrere fs-Laserpulse mit unterschiedlicher Frequenz und variablem Zeitabstand regten die Moleküle zu Schwingungen an und fragten diese zeitverzögert ab. Dabei nutzten die Forscher die OH-Streckschwingungen der Was-

sermoleküle als Sonde, da deren Anregungsfrequenz empfindlich von den umgebenden Wasserstoffbrücken abhängt. Für reines Wasser führten die fluktuierenden Coulomb-Kräfte zu extrem schnellen Schwankungen der Schwingungsfrequenzen. Diese spektrale Diffusion löschte die „Erinnerung“ an die ursprüngliche Anregungsfrequenz aus. Nach etwa 200 fs waren die Anregungen abgeklungen, ihre Energie hatte sich über die Wasserstoffbrücken auf die umliegenden Moleküle verteilt. Langlebiger waren die Schwingungen der Wassermoleküle in einer schwach befeuchteten DNS-Schicht: Sie dauerten etwa 500 fs und zeigten keine Frequenzschwankungen, vermutlich weil die Wassermoleküle isoliert an den Phosphatgruppen der DNS-Stränge saßen. Stärker befeuchtet war die DNS von weiteren Lagen aus Wassermolekülen umgeben, deren OH-Streckschwingungen wieder kurzlebig waren und spektral diffundierten. Demnach nahm das Wasser die überschüssige Energie eines gut befeuchteten DNS-Moleküls innerhalb von wenigen hundert Femtosekunden auf, während der Energietransport im DNS-Molekül viel langsamer ist und Pikosekunden benötigt.

Wie sich Kristallstrukturen ultraschnell ändern, haben die Berliner Forscher durch zeitaufgelöste Röntgenbeugung untersucht. Sie erzeugten ultrakurze harte Röntgenpulse, indem sie ein Kupferband mit IR-Laserpulsen von 35 fs Dauer bestrahlten. Jeder Puls rief an der Oberfläche des Bandes ein heißes Plasma hervor, dessen Elektronen mit den Kupferatomen kollidierten. Dabei entstand Röntgenstrahlung von 8 keV mit einer Pulsdauer von 100 fs. Ein Teil des Laserlichts regte pulverförmiges Ammoniumsulfat an, das dann mit der Röntgenstrahlung analysiert wurde. Die Zeitverzögerung zwischen Anregungs- und Röntgenpuls wurde zwischen null und fünf Pikosekunden in Schritten von etwa 100 fs verändert, um Änderungen der gemessenen Intensitäten der Röntgenbeugungsringe zeitaufgelöst zu verfolgen. Daraus ließ sich

ablesen, dass sich innerhalb von 100 fs nach dem Anregungspuls im Kristall Kanäle mit erhöhter Elektronendichte bildeten (Abb. 3). In diese Kanäle waren Protonen gewandert, die von den Ammoniumionen stammten und sich mit Elektronen vereinten, die von den Sulfationen kamen. Periodisch alle 650 fs bewegten sich Protonen und Elektronen, zu Wasserstoffatomen verbunden, aus den Kanälen heraus und wieder in sie hinein. Die dabei auftretende Strukturänderung unterschied sich von allen bekannten Phasenübergängen des Ammoniumsulfats.

Topologische Isolatoren und Supraleiter

Die verschiedenen Aggregatzustände kondensierter Materie lassen sich meist durch eine gebrochene Symmetrie charakterisieren. So bricht ein Kristall die Translationsinvarianz, ein Magnet die Rotationssymmetrie. Der 1980 von Klaus von Klitzing entdeckte Quanten-Hall-Zustand fällt aus dem Rahmen, da er keine Symmetrie bricht. Er ist ein topologischer Quantenzustand, der sich durch seine topologischen Eigenschaften von allen damals bekannten Zuständen unterscheidet. Ein zweidimensionales Material im Quanten-Hall-Zustand ist im Innern ein Isolator, während an seinem Rand dissipationlos Ströme fließen. Die dabei auftretende Hall-Leitfähigkeit ist eine topologische Invariante, deren Wert ein ganzzahliges Vielfaches des Leitfähigkeitsquantums e^2/h ist. Inzwischen sind weitere Quantenzustände mit interessanten topologischen Eigenschaften bekannt, wie Shoucheng Zhang von der Stanford University berichtete: topologische Isolatoren und Supraleiter.

Ein herkömmlicher Isolator ist durch eine Bandlücke zwischen Valenz- und Leitungsband charakterisiert. Bei einem topologischen Isolator treten am Rand oder an der Oberfläche auch Zustände ohne Bandlücke auf, die durch ihre Topologie gegen Störungen geschützt sind. Die Energien dieser

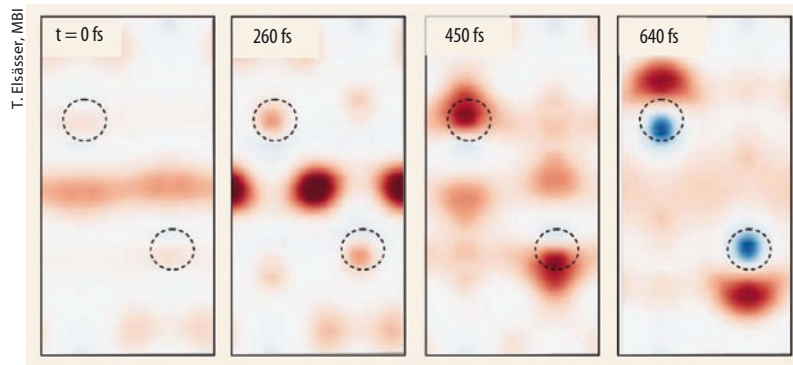


Abb. 3 Mit ultrakurzen Laserpulsen lassen sich Ladungssoszillationen in Ammo-

niumsulfat nachweisen (rot/blau: positive/negative Ladung).

Zustände bilden ein Band, das die Bandlücke des Isolators überbrückt und sich dabei um die Brillouin-Zone windet. In diesen Rand- oder Oberflächenzuständen fließen von selbst Spinströme, hervorgerufen durch die Spin-Bahn-Kopplung. Bei diesem Quanten-Spin-Hall-Effekt (QSHE) bewegen sich z. B. entlang des Randes eines zweidimensionalen topologischen Isolators Elektronen mit „Spin rauf“ im Uhrzeigersinn und Elektronen mit „Spin runter“ gegen den Uhrzeigersinn. Da es zu jeder Spinrichtung nur eine Bewegungsrichtung gibt, können unmagnetische Störstellen die Spinströme nicht zurückstreuen.

Zhang und seine Kollegen hatten 2006 vorhergesagt, dass man einen zweidimensionalen topologischen Isolator erhält, indem man einen Quantengraben aus einer dünnen HgTe-Schicht herstellt, die von CdTe umschlossen ist. Bald darauf konnte die Gruppe von Laurens Molenkamp an der Universität Würzburg diese Vorhersage experimentell bestätigen.¹⁾ In den folgenden Jahren wurden auch dreidimensionale topologische Isolatoren gefunden wie Bi_2Te_3 und Bi_2Se_3 . Hier bildet das Energieband der Oberflächenzustände einen Dirac-Kegel wie bei Graphen, das vier solche Kegel in der Brillouin-Zone hat. Ein einzelner Kegel ist nur für dreidimensionale topologische Isolatoren möglich. Topologische Supraleiter und Supraflüssigkeiten, deren Energie-Gap der Bandlücke eines topologischen Isolators entspricht, besitzen ebenfalls Oberflächenzustände ohne

Energielücke. Die suprafluide B-Phase von Helium-3 ist ein Beispiel für eine topologische Supraflüssigkeit, deren Randzustände vermutlich Majorana-Fermionen sind. Solche Teilchen, die ihre eigenen Antiteilchen sind, spielen bei der Erweiterung des Standardmodells eine Rolle und werden von Hochenergiephysikern intensiv gesucht. Vielleicht entdeckt man sie aber zuerst in der kondensierten Materie, meinte Zhang.

Elektronenspins als Qubit

Ein Qubit, die kleinste Einheit der Quanteninformation, lässt sich auf vielfältige Weise speichern, z. B. im Anregungszustand eines isolierten Atoms oder im Spinzustand eines Elektrons. Einflüsse der Umgebung zerstören die Qubits in Sekundenbruchteilen. Um möglichst viel Zeit zur Verarbeitung der zerbrechlichen Qubits zu haben, versucht man diese Störung so gering wie möglich zu halten. Bisher gelingt das für atomare Qubits in magneto-optischen Fallen etwas besser als für elektronische Spin-Qubits z. B. in Halbleiter-Nanostrukturen. Indes versprechen die Spin-Qubits „skalierbar“ zu sein, d. h. die Halbleitertechnologie sollte es ermöglichen, sie in großer Zahl herzustellen und zu integrierten Strukturen zusammenzufügen. Wie sich die Störungen der Spin-Qubits verringern lassen, haben Hendrik Bluhm von der RWTH Aachen und seine Kollegen in Harvard an Elektronenpaaren in Quantenpunkten untersucht.

1) vgl. Physik Journal, August/September 2009, S. 99

In einem zweidimensionalen Elektronengas in der Grenzfläche einer GaAs- und einer AlGaAs-Schicht wurden mit negativ geladenen Elektroden zwei nebeneinander liegende, 100 nm große Quantenpunkte abgetrennt. Sie konnten Elektronen aufnehmen, wobei sich ihr Ladungszustand und indirekt auch der Spinzustand mit einem elektrischen Sensor ermitteln ließen. In die beiden Quantenpunkte wurde je ein Elektron gebracht, dessen Spin mit einem Magnetfeld ausgerichtet wurde. Mit den Spinzuständen $|\uparrow\downarrow\rangle$ und $|\downarrow\uparrow\rangle$ des Elektronenpaares ließ sich ein Qubit speichern. Die Elektronenspins waren einem nuklearen Hyperfeinfeld von etwa 10 mT ausgesetzt, das von den Kernspins der rund eine Million Halbleiteratome herrührte, die ein Elektron im Quantenpunkt umgaben. Die langsam schwankenden Hyperfeinfelder zerstörten nach etwa 14 ns die Kohärenz der elektronischen Spinzustände und damit auch die Qubits. Durch Rückkopplung konnten die Forscher die Qubits langlebiger machen: Zuerst sondierten die Elektronenspins das Hyperfeinfeld, dann polarisierten sie es. Dadurch nahmen die Feldschwankungen ab und die Kohärenzzeit verlängerte sich auf 166 ns.

Mit der Spinecho-Technik ließ sich die Dekohärenz weiter verringern. Da die beiden Elektronenspins unterschiedlich starken Hyperfeinfeldern ausgesetzt waren, liefen ihre anfangs gleichen Phasen auseinander, wodurch sich der Zustand des Qubits änderte. Den Forschern gelang es, nach einer Zeit t im Mikrosekundenbereich die Phasendifferenz fast wieder auf null zu bringen. Sie vertauschten die beiden Elektronen zum Zeitpunkt $t/2$, indem sie die Energiebarriere zwischen den Quantenpunkten kurzfristig so weit absenkten, dass die Teilchen in den jeweils anderen Quantenpunkt tunnelten. Dadurch kehrte sich die Phasenentwicklung um, sodass zum Zeitpunkt t die Phasendifferenz fast verschwunden war und der ursprüngliche Zustand des Qubits wieder als „Echo“ auftrat. Wurden die Elektronenspins

mehrfach vertauscht, ließ sich der Anfangszustand des Qubits noch nach über 200 μs wieder herstellen. Dies entspricht der Dauer von mehr als 10^5 Rechenoperationen mit einem solchen Qubit. Für diese Operationen müssten mehrere Qubits miteinander kontrolliert wechselwirken. Das lässt sich dadurch erreichen, dass man zwei Doppelquantenpunkte, die jeweils ein Qubit speichern, kapazitiv koppelt. Erste Ergebnisse zeigen, dass es so möglich sein sollte, Qubits zu verschränken.

Verschränkt im Quantenpunkt

Paare von verschränkten Photonen sind eine wichtige Ressource, um Quanteninformationen zu verarbeiten und zu übertragen. Man stellt sie meist durch parametrische Abwärtskonversion her, wobei ein optisch nichtlinearer Kristall ein Photon in zwei „spaltet“. Die Ausbeute ist auf etwa 0,05 verschränkte Paare pro Anregungspuls begrenzt. Paarweise verschränkte Photonen lassen sich aber auch mit optisch angeregten Quantenpunkten erzeugen, berichtete Pascale Senellart vom Laboratoire de Photonique et de Nanostructures bei Paris. Im Quantenpunkt wandelt sich ein Biexziton aus zwei Elektron-Loch-Paaren schrittweise in zwei orthogonal polarisierte Photonen um. Sind die beiden möglichen Schrittfolgen ununterscheidbar, so sind die Photonen polarisationsverschränkt. Ein Quantenpunkt strahlt das Licht jedoch in alle Richtungen ab, sodass sich weniger als zwei Prozent der Photonenpaare nutzen lassen. Mit Quantenpunkten, die in mikrometergroße optische Resonatoren eingebettet sind, haben die französischen Forscher jetzt eine wesentlich höhere Ausbeute erreicht.

Für die Photonenpaarquelle wurde eine InAs-Schicht, in der sich Quantenpunkte selbständig gebildet hatten, beidseitig mit AlGaAs-Schichtstapeln eingeschlossen. Die Schichtstapel wirkten wie Bragg-Spiegel, die einen planaren Resonator bildeten. Pho-

tolithographisch wurden aus dem Resonator mehrere säulenförmige Mikroresonatoren herausmodelliert. Dabei standen jeweils zwei gleiche Säulen so dicht nebeneinander, dass sie sich teilweise durchdrangen und zwei gekoppelte Resonatoren bildeten. Jeweils eine Säule eines Paares enthielt einen Quantenpunkt, der im Mittelpunkt ihres Kreisquerschnitts saß. Der Durchmesser und der Abstand der Mikroresonatoren wurden so gewählt, dass ihre Anregungsenergien möglichst gut mit den Exziton- und Biexzitonenergien des Quantenpunkts übereinstimmten. Eine Feinabstimmung erreichten die Forscher dadurch, dass sie die Temperaturabhängigkeit des Brechungsindex der Resonatoren ausnutzten, indem sie sie auf 5 K abkühlten.

Mit einem IR-Laser mit 5 ps Pulsdauer regten die Forscher in den Quantenpunkten Biexzitonen an, die sich anschließend durch Rekombination der Elektron-Loch-Paare in verschränkte Photonen umwandelten. Die räumliche und spektrale Kopplung eines Quantenpunkts an seine beiden Mikroresonatoren führt aufgrund des Purcell-Effekts dazu, dass die Biexzitonen schneller zerfielen und sich dadurch die Intensität der abgegebenen Strahlung stark erhöhte. Fast alle erzeugten Photonen wurden von den Resonatormoden aufgenommen und anschließend von den Mikroresonatoren nach oben oder unten abgestrahlt. Die Ausbeute war mit 0,12 Photonenpaaren pro Anregungspuls sehr hoch. Wie eine Zustandstomographie zeigte, waren die Photonen tatsächlich paarweise polarisationsverschränkt: 73 Prozent aller Photonen wurden innerhalb von 500 ps nach einem Puls abgestrahlt und hatten einem Überlapp („Fidelity“) von 68 Prozent mit dem angestrebten verschränkten Zustand. Pascale Senellart hält es für möglich, dass man mit verbesserten Resonatoren polarisationsverschränkte Photonenpaare mit einer Rate von 800 MHz erzeugen kann.

Schwarze Schwäne und Drachenkönige

Extreme Ereignisse in der Natur oder der Gesellschaft treten überraschend häufig auf. Für viele quantifizierbare Prozesse finden sich Größenverteilungen, die einem Potenzgesetz folgen und auch großen Beobachtungswerten merkbare Wahrscheinlichkeit zumessen. Das gilt etwa für Erdbeben oder für die Eintreten extremer Ereignisse wird somit von derselben Wahrscheinlichkeitsverteilung beschrieben wie das Vorkommen „normaler“ Ereignisse. Demnach sollte ein extremes Ereignis, etwa ein verheerendes Erdbeben oder ein Börsencrash, nichts anderes sein als ein normales – nur eben viel größer. Krisenhafte Extremereignisse wären dann ebenso zufällig und unvorhersehbar wie normale Ereignisse. Sie wären „schwarze Schwäne“, von deren Existenz man vor der Entdeckung ihrer Heimat Australien nichts wusste. Die Ergebnisse, die Didier Sornette von der ETH Zürich präsentierte, zeichnen ein anderes Bild: Tatsächlich sind die extremen Ereignisse „Ausreißer“, die weder der Wahrscheinlichkeitsverteilung der anderen Ereignisse folgen noch unvorhersehbar sind.

Sornette gab einige Beispiele für aus dem Rahmen fallende Beobachtungsgrößen, die wie Wesen einer anderen Art oder „Drachenkönige“ auftreten. Die Verteilung der Einwohnerzahlen französischer Städte folgt einem Potenzgesetz: Trägt man die Einwohnerzahl einer jeden Stadt gegen ihre Rangnummer doppeltlogarithmisch auf, so liegen alle Punkte auf einer Geraden – mit Ausnahme von Paris, dessen Einwohnerzahl viel größer ist. Ein Potenzgesetz beschreibt auch die Verteilung der Energien, die bei Materialversagen durch einzelne Mikrobrüche frei werden – bis auf das letzte Ereignis, das so viel Energie freisetzt, dass das Material zerstört wird. Ähnliches gilt auch für Erdbeben, die normalerweise das Gutenberg-Richter-Gesetz erfüllen. Doch von diesem Potenzgesetz weichen die extrem starken Erdbeben

ab. „Drachenkönige“ treten auch bei den täglichen Kursverlusten auf, die der Nasdaq-Index verzeichnet hat. Auch hier folgt die Häufigkeit eines bestimmten prozentualen Verlusts einem Potenzgesetz. Doch es gibt „Ausreißer“ mit besonders hohen Tagesverlusten von über 25 Prozent, etwa beim Platzen der Dotcom-Blase 2000.

Extremereignisse in einem komplexen System haben meist innere Ursachen. Dabei bringt eine durch Rückkopplung verursachte Instabilität das System an den Rand einer Krise. Den meisten Extremereignissen bei Börsenverlusten gingen Marktblasen mit einem überexponentiellen Wachstum voraus, das zu einer Instabilität des Marktes führte, sodass schließlich eine zufällige Ursache die Blase zum Platzen brachte. Sobald ein komplexes System in eine Instabilität gerät, ändert sich sein Verhalten, sodass man hoffen kann, das Eintreten des bevorstehenden Extremereignisses vorherzusagen. Allerdings scheint es dafür keine universellen Methoden zu geben. Sornette und seine Mitarbeiter haben indes ein Verfahren entwickelt, mit dem man Kompositmaterialien auf drohendes Versagen hin untersuchen kann. Außerdem haben sie für verschiedene Marktblasen den Zeitpunkt ihres mehr oder weniger friedlichen Endes erfolgreich vorhergesagt. Im Gegensatz zu schwarzen Schwänen kündigen Drachenkönige ihr Erscheinen an. Man muss die Zeichen nur zu deuten wissen.