

Vom Flussquant zum Nobelpreis

Highlights aus dem Programm der Sektion kondensierte Materie (SKM)

Rainer Scharf

Zu ihrer diesjährigen Frühjahrstagung hatte die Sektion Kondensierte Materie (SKM) nach Regensburg eingeladen. Mehr als 5116 Physikerinnen und Physiker nahmen teil, hielten 2894 Vorträge und präsentierten 1646 Poster. Hier eine kleine Auswahl der Themen.

Mesoskopische Magnetmessung

Nicht nur in Supraleitern können elektrische Ströme unaufhörlich fließen, sondern auch in mikrometergroßen, normalleitenden Metallringen, durch die ein magnetischer Fluss strömt. Bei tiefen Temperaturen behalten die Leitungselektronen ihre Phasenkohärenz bei, sodass der vom magnetischen Fluss induzierte Strom „persistent“ ist. Solche Ströme sind jedoch schwer zu bestimmen, denn ein Amperemeter hätte eine Unterbrechung des Rings zur Folge, wodurch der persistente Strom zum Erliegen käme. Doch man kann das sehr schwache Magnetfeld messen, das er erzeugt. Kathryn Moler von der Stanford University und ihre Mitarbeiter haben dazu ein Raster-SQUID-Mikroskop gebaut, welches das lokale Magnetfeld mit einem $5\text{ }\mu\text{m}$ großen Metallring aufnimmt und zur Messung in ein SQUID (Superconducting Quantum Interference Device) einkoppelt. Der magnetische Fluss, der den persistenten Strom hervorruft, wird dabei von einer Spule in der Nähe des Aufnahmerrings erzeugt (Abb. 1).

Mit diesem Mikroskop maßen die Forscher die persistenten Ströme in 33 Goldringen auf einer Siliziumoberfläche und mit Durchmessern zwischen 1 und $2\text{ }\mu\text{m}$ (Abb. 1). Durch sie ging ein magnetischer Fluss, der stetig verändert wurde. Daraufhin zeigten die Ströme in den einzelnen Ringen

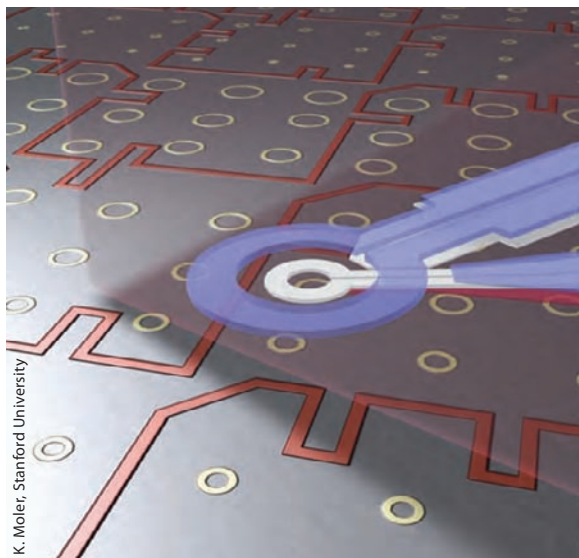


Abb. 1 Die Feldspule (blau) und die Messschleife (weiß) eines SQUID, platziert über einem nur mikrometergroßen Metallring auf einer Siliziumoberfläche, in dem ein persistenter Strom fließt.

deutliche periodische Oszillationen, wobei die Periode einem magnetischen Flussquant entsprach. Da in jedem Ring die Oszillation des Stroms eine zufällige Schwingungsphase besaß, hatte der gesamte persistente Strom über das Ensemble von Ringen einen Mittelwert nahe Null. Das quadratische Mittel kam dem theoretischen Wert für die Varianz des persistenten Stroms sehr nahe, während frühere Messungen überraschenderweise einen 10- bis 200-fach größeren Wert ergeben hatten. Darüber hinaus zeigte die jetzt gemessene Stärke die vorhergesagte exponentielle Abnahme mit steigender Temperatur.

Die mesoskopische Messung schwacher Magnetfelder mit dem Raster-SQUID-Mikroskop eröffnet noch viele weitere Möglichkeiten. So haben Moler und ihre Kollegen beobachtet, dass in dünnen Silber- oder Goldschichten bei tiefen Temperaturen überraschend viele ungepaarte Spins mit einer Dichte von $0,4\text{ nm}^{-2}$ auftraten. Durch ihre Fluktuation rufen sie wohl das in SQUIDS beobachtete $1/f$ -Rauschen hervor, das in supraleitenden Qubits Dekohärenz verursacht. Zudem konnte man mit dem Mikroskop

durch Messung in verschiedenen Höhen die Eindringtiefe eines Magnetfeldes in einen Supraleiter bestimmen. Für LaFePO mit $T_c = 6\text{ K}$ ändert sich die Eindringtiefe unterhalb von 2 K linear mit der Temperatur. Dies deutet auf eine d-Wellen-Symmetrie der Cooper-Paare hin, wie man sie von den Hochtemperatur-Supraleitern kennt.

Katalyse im Video

Katalytische Prozesse haben für die chemische Produktion, die effiziente Nutzung von Energie und Rohstoffen sowie für den Umwelt- und Klimaschutz eine überragende Bedeutung. Heterogene Katalysatoren dienen etwa zur Konvertierung der von Verbrennungsmotoren produzierten Schadstoffe. Sie bestehen aus zahllosen metallischen Nanoteilchen, die auf der Oberfläche eines porösen keramischen Materials sitzen. Die Prinzipien, nach denen an ihnen die katalytischen Prozesse ablaufen, sind auf der atomaren Ebene noch kaum verstanden. Ein an der Aarhus Universität in Dänemark entwickeltes Rastertunnelmikroskop, das pro Sekunde 50 Bil-

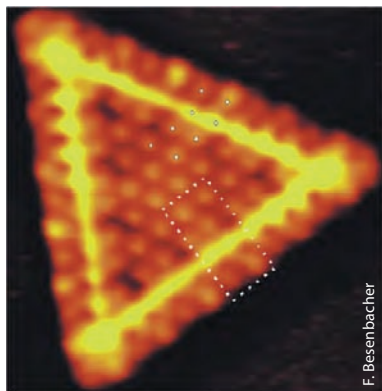


Abb. 2 Das STM-Bild zeigt in einem Abstand vom Rand des MoS₂-Nanoclusters einen metallisch leitenden Streifen.

der mit atomarer Auflösung macht, könnte hier Abhilfe schaffen, wie Flemming Besenbacher vom dortigen Interdisciplinary Nanoscience Center berichtete. Mit dem Mikroskop lassen sich Videos von den atomaren Vorgängen an katalytisch aktiven Plätzen auf einer Oberfläche erstellen.

Auf gängigen Katalysatoren zur Dampfreformierung (der Gewinnung von Wasserstoff aus Methan und Wasserdampf), die aus Nickelnanoclustern bestehen, setzt sich schnell Kohlenstoff fest und bildet Graphit, der die Katalyse beeinträchtigt. Besenbacher stellte einen neuartigen Katalysator aus Nickel und Gold vor, der dieses Problem umgeht. Zwar mischen sich normalerweise Nickel und Gold nicht, bringt man aber weniger als eine Monolage Gold auf eine heiße Nickel(III)-Oberfläche auf, so integrierten sich die Goldatome in die oberste Nickellage, und es entsteht eine ungeordnete Oberflächenlegierung, wie Aufnahmen mit dem Rastertunnelmikroskop zeigten. Außerdem war zu erkennen, dass Gold die Anlagerung des Kohlenstoffs stark behindert, sodass sich kaum Graphit bildete. Der neue Katalysator, der aus einem MgAl₂O₄-Substrat mit großer Oberfläche sowie aus 16 % Ni und 0,3 % Au bestand, war tatsächlich deutlich besser als herkömmliche Katalysatoren: Er behielt seine Funktion auch nach längerem Einsatz unvermindert bei.

Als zweites Beispiel diskutierte Besenbacher Hydrotreating-Katalysatoren, die in Erdölraffinerien das

Rohöl von Schwefel und Stickstoff befreien. Der gängigste Katalysator besteht aus MoS₂-Nanoteilchen, die eine Moleküllage dick sind und auf einer porösen Aluminiumoxidschicht sitzen. Man nimmt an, dass Fehlstellen am Rand der Teilchen, an denen ein H-Atom ein S ersetzt, katalytisch aktive Plätze sind. Besenbacher und seine Kollegen haben dies an einem Modellsystem untersucht. Sie ließen auf einer Goldoberfläche dreieckige MoS₂-Nanoteilchen wachsen, deren oberste Atomschicht aus Schwefelatomen bestand. Unter dem Rastertunnelmikroskop zeigte sich auf der Partikeloberfläche in deutlichem Abstand zum Teilchenrand ein metallisch leitender Streifen (**Abb. 2**). Hier traten weitere katalytisch aktive Plätze auf, die sich von den Schwefelfehlstellen unterschieden. Das Zusammenspiel der metallischen Zustände mit den Fehlstellen erhöhte die katalytische Wirkung.

Ultraschnell abgeregt

Die rasch zunehmende Speicherdichte der magnetischen Datenspeicher erfordert immer höhere Schreibgeschwindigkeiten. Gegenwärtig kann man die Magnetisierung eines Bits in ca. 200 ps umkehren. Durch Erhitzen der ferromagnetischen Bits mit Femtosekunden-Laserpulsen ließen sich noch wesentlich kürzere Umkehrzeiten erzielen. Dabei ist unklar, ob die magnetischen Momente, die vor allem von Elektronenspins herrühren, durch Spin-Bahn-Kopplung oder durch Spin-Kristallgitter-Relaxation abgebaut werden. Mit ultrakurzen Röntgenpulsen lassen sich tiefere Einblicke in die von gepulstem Laserlicht ausgelösten extrem schnellen Entmagnetisierungsvorgänge gewinnen, wie Hermann Dürr vom SLAC National Accelerator Laboratory, USA, berichtete. Die vorgestellten Messungen wurden an der Femtoslicing Experimentierstation der Synchrotronstrahlungsquelle Bessy II am Helmholtz-Zentrum Berlin durchgeführt.

Dürr und seine Kollegen bestrahlten eine 15 nm dicke ferromagnetische Nickelschicht mit optischen fs-Laserpulsen und analysierten die magnetischen Eigenschaften der Schicht mittels 100 fs langer Röntgenpulse. Um diese zu erzeugen, koppelten die Forscher einen Teil der Laserstrahlung aus und modulierten mit ihm die in Bessy II gespeicherten Elektronenpakete. Diese durchliefen einen schraubenförmigen Undulator, in dem sie zirkular polarisierte Röntgenpulse abstrahlten. So traf nach jedem Laserschuss auch ein Röntgenpuls die Nickelschicht. Schließlich wurde die von der optisch angeregten Schicht durchgelassene Röntgenintensität in Abhängigkeit von der Polarisierung und der Verzögerungszeit gemessen.

Die Röntgenpulse konnten – je nach ihrer Polarisierung – nur 3d-Elektronen mit einer bestimmten Spinrichtung anregen. Deshalb absorbierte die ferromagnetische Nickelschicht, in der eine Spinpopulation überwog, rechts- bzw. linkszirkular polarisierte Pulse unterschiedlich stark. Dieser zirkuläre Dichroismus klang jedoch etwa 120 fs nach Eintreffen des Laserpulses ab, weil die angeregte Schicht ihre Magnetisierung abbaut. Da sich dabei sowohl der Spin- als auch der Bahndrehimpuls der Elektronen verringerten, musste das Kristallgitter die Drehimpulsdifferenz aufgenommen haben. Dürr verglich dies mit dem Einstein-de Haas-Effekt, bei dem eine ferromagnetische Probe durch Ummagnetisierung ihren Spindrehimpuls umkehrt und die Drehimpulsänderung an das Kristallgitter abgibt. Der ultraschnelle Einstein-de Haas-Effekt in ferromagnetischen Schichten spielte sich auf der Nanoskala ab, sodass es möglich sein sollte, mikroskopische Magnetbits optisch zu beschreiben. Hellere Röntgenlaser, wie die Linac Coherent Light Source am SLAC und in Zukunft der European XFEL in Hamburg, dürften die Erforschung der dabei ablaufenden ultraschnellen Prozesse revolutionieren, meinte Dürr.

Molekulare Nanotechnologie

Eine wichtige Rolle spielt das Rastertunnelmikroskop auch bei der Untersuchung und Manipulation von funktionalisierten Molekülen, die als Bausteine für eine zukünftige molekulare Nanotechnologie interessant sind, erklärte Leonhard Grill vom Fritz-Haber-Institut in Berlin. Die molekularen Bausteine, die z. B. als elektrische Schalter oder Gleichrichter fungieren, könnte man auf einer Oberfläche zu molekular-elektronischen Schaltkreisen anordnen und verbinden. Dabei ließe sich ausnutzen, dass das Rastertunnelmikroskop einzelne Moleküle nicht nur abbilden, sondern sie auch mit chemischen oder elektrostatischen Kräften sowie durch elektronische Prozesse hinsichtlich ihrer spezifischen Funktion charakterisieren kann. Grill stellte experimentelle Beispiele für die Manipulation und Untersuchung einzelner Moleküle vor.

Er und seine Mitarbeiter haben Tetraphenylporphyrin (TPP) mit einem, zwei oder vier Bromatomen versehen. So erhielten sie molekulare Bausteine, die ein, zwei oder vier starke, kovalente Bindungen eingehen konnten. Sie brachten die Moleküle auf einer Goldoberfläche an, von der sie diffundieren konnten. Bei genügend hoher Temperatur gaben die dadurch angeregten Moleküle ihre Bromatome ab und verbanden sich miteinander, wenn sie zusammenstießen. Je nach der Zahl der Bindungen, die die Moleküle eingehen konnten, entstanden Dimere, lineare Molekülketten oder flächige Makromoleküle mit Quadratgitterstruktur (Abb. 3). Mit der Spitze des Rastertunnelmikroskops konnten die Forscher die Mole-

küllaggregate über die Oberfläche ziehen. Dabei erwiesen sich die kovalenten Bindungen zwischen den Molekülbausteinen als robust und sorgten für den nötigen Zusammenhalt. Schwächere, nicht-kovalente Verbindungen brachen hingegen auseinander.

Mit der Mikroskopspitze konnten Grill und seine Kollegen Molekülketten an einem Ende von einer elektrisch leitenden Unterlage abheben. So gelang es erstmals, die Leitfähigkeit eines einzelnen Polymers in Abhängigkeit vom Abstand der Spitze zur Unterlage zu messen. Demnach nahm der elektrische Widerstand dieses molekularen Drahtes nicht wie der eines makroskopischen Drahts linear mit seiner Länge zu, sondern exponentiell. Zudem zeigte der Widerstand Modulationen auf der Nanometerskala. Sie kamen dadurch zustande, dass sich die Molekülkette nicht kontinuierlich von der Unterlage löste, sondern gliedweise, ähnlich einer makroskopischen Kette. Dadurch änderte sich die Länge des molekularen Drahts sprunghaft und mit ihr der elektrische Widerstand. Grill beschrieb die Versuche, die molekularen Drähte elektrisch zu isolieren. Dazu kontaktierten sie eine einzelne Polymerkette an ihren Enden mit Gold, während ihr Mittelteil auf einer ultradünnen Insel auf zwei atomaren Lagen nichtleitenden Natriumchlorids lag. Floss ein Strom im Draht, so traten allerdings auch Tunnelströme durch die NaCl-Schicht auf. Mit entsprechend dickeren Lagen und leitfähigeren Polymeren wollen die Forscher besser isolierte molekulare Drähte herstellen.

Batterie der Zukunft

Können Elektroautos die von Verbrennungsmotoren getriebenen Fahrzeuge ersetzen? Sie emittieren keine Schadstoffe, fahren geräuschlos und lassen sich an der Steckdose auftanken (Abb. 4). Doch ihr Erfolg hängt davon ab, wie weit man mit einer Batterieladung fahren kann. Um 1000 km zurückzulegen, benötigt ein Mittelklasse-Pkw etwa

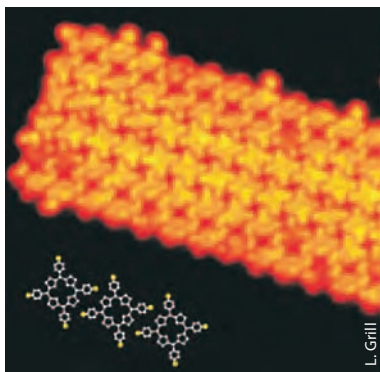


Abb. 4 Der Tesla Roadster hat als erstes serienmäßiges Elektrofahrzeug auf Lithion-Basis mehr als 6000 industrieübliche Akkus an Bord. Das Laden dauert laut Hersteller 3,5 Stunden und verschafft dem Stromer eine Reichweite von 100 bis 500 Kilometern.

180 kWh, erklärte Martin Winter von der Universität Münster. Ein Nickel-Metallhydrid-Akku, der diese Energie liefern kann, wäre mit 2250 kg viel zu schwer. Mit einer wiederaufladbaren Lithium-Ionen-Batterie, die derzeit einen Energieinhalt von 0,15 kWh/kg erreicht, käme man auf 1200 kg. Um das Problem zu lösen, müsse man neue Materialien für Lithium-Batterien einsetzen oder über diesen Typ hinausgehen, betonte Winter. So könnten „Super-Akkus“ wie Metall-Luft-Batterien, die durch Oxidation eines Metalls Elektrizität erzeugen, einen Energieinhalt von 1 kWh/kg bevorraten und Reichweiten von 1000 km ermöglichen.

Lithium-Ionen-Batterien haben eine negative Graphitelektrode und eine positive Elektrode aus einem Metalloxid LiMO_2 , wobei M für Co, Ni oder Mn steht. Beide Elektroden können positive Li-Ionen reversibel an den flüssigen Elektrolyten abgeben und aufnehmen. Um die Batterie zu verbessern, sucht man nach Materialien, die möglichst viele Li-Ionen aufnehmen und speichern können. Ersetzt man z. B. die Graphit- durch eine Siliziumanode, erhöht dies die Kapazität der Batterie um ein Vielfaches. Doch das Silizium vergrößert sein Volumen um bis zu 300 %, wenn es Li-Ionen aufnimmt. Die Lade- und Entladezyklen führen deshalb zur Zersetzung der Elektrode. Das will man verhindern, indem man sie aus einem Verbundwerkstoff herstellt, in dem z. B. Si-Nanopartikel als reaktive Phase in eine Graphitmatrix

Abb. 3 20×20 nm²-STM-Aufnahme einer molekularen Insel auf Au(111), die Grafik zeigt die Struktur der Br_4TPP -Moleküle.



eingebaut sind. Damit erreicht man über 50 Zyklen eine Kapazität von ca. 1000 Ah/kg, eine Graphitelektrode erreicht dagegen bestenfalls 370 Ah/kg.

Eine Anode aus einem Metall, das eine Li-Legierung bilden kann, könnte ebenfalls viel Lithium aufnehmen. Am besten wäre eine Li-Anode, die eine Kapazität von mehr als 3800 Ah/kg hat. Doch hier besteht die Gefahr, dass die auf der Anode abgeschiedenen Li-Ionen Dendriten bilden, die in den flüssigen Elektrolyten hineinwachsen und die Kathode erreichen. Ein Kurzschluss wäre die Folge. Das kann man mit einem festen Polymerelektrolyten verhindern, wie ihn Martin Winter zusammen mit Stefano Passerini und Wolfgang Kern an der Universität Graz entwickelt hat. Allerdings muss man den Elektrolyten durch Zugabe von ionischen Flüssigkeiten leitfähiger machen. Abschließend meinte Winter, das Problem der Elektromobilität ließe sich vielleicht dadurch lösen, dass man zwei Batterietypen einsetzt: eine verbesserte Lithium-Ionen-Batterie mit hoher Leistung für das dynamische Fahren und einen Super-Akku mit hoher spezifischer Energie für eine große Reichweite.

Graphentransistoren für Elektronenspins

Graphen, die zweidimensionale Form des Kohlenstoffs, hat ungewöhnliche physikalische Eigenschaften. In diesem Halbleiter bewegen sich die Elektronen wie relativistische Dirac-Teilchen mit 1/300 der Lichtgeschwindigkeit. Bei Zimmertemperatur hat man an Graphen den ganzzahligen Quanten-Hall-Effekt beobachtet, unterhalb von 20 K auch den fraktionalen Quanten-Hall-Effekt.^{*)} Vor drei Jahren haben Bart van Wees von der Universität Groningen und seine Kollegen nachgewiesen, dass bei Zimmertemperatur in einzelnen Graphenschichten Elektronenspins über mehrere Mikrometer transportiert werden konnten. Dies und die hohe Ladungsträgerbeweglich-

keit machen Graphen als Material für die Spintronik interessant. Van Wees beschrieb die Injektion von Elektronenspins in Graphenschichten, ihre Bewegung und wie sie in einem Magnetfeld präzedieren.

Bei den Experimenten verwendeten sie Graphen-Feldeffekttransistoren, die aus einer $10\text{ }\mu\text{m} \times 1\text{ }\mu\text{m}$ großen Graphenschuppe bestanden, deren Ladungsträgertyp (Elektronen oder Löcher) und -dichte sie durch eine Gatespannung beeinflussen konnten. Mehrere dünne Streifen aus ferromagnetischem Kobalt lagen quer über der Schuppe und dienten als Spininjektoren bzw. -detektoren, die je nach ihrer Magnetisierungsrichtung mehr Up- oder Down-Spins durchließen (Abb. 5). In eine der Co-Elektroden injizierten sie einen Strom und extrahierten ihn wieder aus einer benachbarten Elektrode. Zugleich maßen sie zwischen zwei anderen, weiter entfernten Elektroden die Spannungsdifferenz, welche die hierhin diffundierten Spins verursachten. Der sich daraus ergebende „nichtlokale“ Widerstand hing von der relativen Magnetisierung der vier Elektroden zueinander ab. Die unterschiedlich breiten Elektroden ließen sich durch ein variables Magnetfeld nacheinander ummagnetisieren, der Widerstand machte dabei jeweils einen Sprung.

Aus den gemessenen Widerstandskurven für unterschiedlich weit entfernte Elektroden schätzten die Forscher ab, dass die Spinrelaxationslänge etwa $2\text{ }\mu\text{m}$ betrug. Über diese Distanz konnte die Graphenschicht ein Spinsignal transportieren. Die injizierten Ströme waren zu etwa 20 % spinpolarisiert, doch es ließen sich über 30 % erreichen, wenn ein Ruhestrom floss, der die injizierten Ladungsträger von den Kontakten wegtransportierte. Wurden Spins parallel zur Graphenschicht injiziert und einem senkrecht zur Schicht orientierten Magnetfeld ausgesetzt, so präzedierten sie auf dem Weg zur Spindetektorelektrode und änderten ihre Ausrichtung. Mit der Stärke des Magnetfeldes änderte sich die

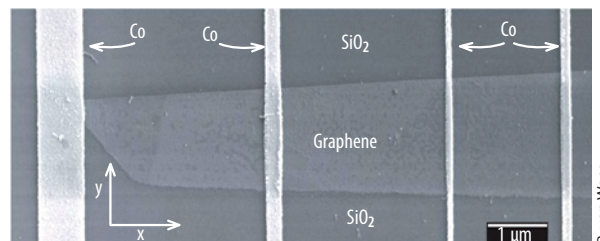


Abb. 5 Elektromikroskopaufnahme des Graphen-Feldeffekttransistors. Die beiden linken Kobaltelektroden dienen der Spannungsmessung, die rechten der Strominjektion und dem Abgriff.

Präzessionsfrequenz und damit die Ausrichtung der Spins bei Ankunft an der Detektorelektrode. Dies führte zu einer charakteristischen Magnetfeldabhängigkeit des nicht-lokalen Widerstands. Aus ihr ließen sich die Diffusionskonstante und die Relaxationslänge der Spins ermitteln, die sich als zueinander proportional erwiesen. Van Wees erwartet, dass für Graphenfloccen mit höherer Ladungsträgerbeweglichkeit selbst bei Zimmertemperatur Spindiffusionslängen von bis zu 0,1 mm möglich sein könnten.

Quantenpunkt-Flash-Speicher

Ein neues Konzept für einen elektronischen Datenspeicher, der die Vorteile der DRAM- und Flash-Speicher miteinander verbindet, stellte Andreas Marent von der TU Berlin vor. DRAMs zeichnen sich durch sehr kurze Zugriffszeiten von etwa 10 ns und eine hohe Lebensdauer von mehr als 10^{15} Schreibzyklen aus. Es sind jedoch flüchtige Speicher, die alle paar Millisekunden aufgefrischt werden müssen und dabei Energie verbrauchen. Hingegen können die nichtflüchtigen Flash-Speicher Daten ohne Energieverbrauch mehr als zehn Jahre lang speichern. Nachteilig sind ihre relativ lange Schreibzeit im Bereich von Mikrosekunden und die geringe Lebensdauer von unter 10^6 Schreibzyklen. In Zusammenarbeit mit Dieter Bimberg^{*)} entwickelt Andreas Marent einen nichtflüchtigen Quantenpunkt-Flash-Speicher, dessen Lebensdauer und Schnelligkeit mit denen des DRAM konkurrieren sollen.

Die Flüchtigkeit eines DRAM wird durch Leckströme verursacht, die sich kaum verhindern lassen. Hingegen könnte man den

*) vgl. den Artikel von Thomas Seyller auf S. 53 in diesem Heft.

#) vgl. das Interview mit Dieter Bimberg auf S. 102 in diesem Heft.

nichtflüchtigen Flash-Speicher durchaus schneller und langlebiger machen, betonte Marent. Beim Flash-Speicher nimmt ein Floating Gate in einem MOSFET die einem Bit entsprechende Ladungsmenge auf. Das Gate ist von einer Silizium-oxidschicht umgeben, deren Energiebarriere von 3,2 eV für die Nichtflüchtigkeit sorgt. Um diese starre Barriere beim Schreib- oder Löschvorgang zu überwinden, sind starke elektrische Felder nötig, die die Ladungsträger auf hohe Energien bringen. Dies verlangsamt das Schreiben und Löschen und verringert die Lebensdauer des Speicherelements. Mit Halbleiter-Nanopunkten aus einer III-V-Halbleiterverbindung, die die Rolle des Floating Gates spielen, könnte man dieses Problem lösen. Auf einer geeigneten Oberfläche wachsen solche Nanopunkte mit Dichten von über $10^{11}/\text{cm}^2$ oder Tbit/inch² von selbst. Außerdem lässt sich durch die Wahl der für den Quantenpunkt und das Substrat verwendeten Halbleiter die Energiebarriere anpassen.

Den Schreib- bzw. Löschvorgang kann man durch Absenken oder Schmälern der Barriere im richtigen Moment beschleunigen. Dazu bedarf es der Positionierung des

Quantenpunkts in der Ladungsträgerverarmungszone einer p-n-Diode oder einer MODFET-Struktur (modulationsdotierter FET), wo die Barriere normalerweise so hoch ist, dass der Speicher nichtflüchtig ist. Mit einer Vorwärtsspannung ließ sich der Quantenpunkt jedoch aus der Verarmungszone heraushalten, sodass die Barriere verschwand. Der Quantenpunkt fing dann innerhalb von Picosekunden Ladungen ein, und das Speicherelement wurde beschrieben. Um es zu löschen, legte man an die Diode eine starke Sperrvorspannung, die es den Ladungen ermöglichte, aus dem Quantenpunkt herauszutunneln. So haben Marent und seine Kollegen Speicherelemente aus Quantenpunkten hergestellt, deren Beschreiben 6 ns dauerte. Andere konnten in 1,5 ms gelöscht werden. Zudem wurden bei Zimmertemperatur Speicherzeiten von 1,6 s erreicht. Mit der richtigen Halbleiterkombination sollten Speicherzeiten von über zehn Jahren bei Schreib- und Löschenzeiten von unter 10 ns möglich sein.

Wer zitiert wen?

Wie misst man den Einfluss wissenschaftlicher Veröffentlichungen und ihrer Autoren? Dieser Frage ging die Sitzung „Science of Science“ nach, die der FV Physik sozio-ökonomischer Systeme (SOE) organisiert hatte. Eine oft angewandte Methode besteht darin, zu zählen, wie oft eine Veröffentlichung oder ein Autor in der Fachliteratur zitiert wird. Doch dabei gibt es einige Probleme, wie Santo Fortunato von der ISI Foundation in Turin darlegte. Oft sagt ein Zitat nichts über die Bedeutung des betreffenden Artikels aus. Selbstzitate oder solche von Freunden verfälschen das Ergebnis. Je älter eine Veröffentlichung ist oder je mehr Autoren sie hat, umso häufiger wird sie zitiert. Und schließlich treten in unterschiedlichen Fachdisziplinen sehr unterschiedliche Zitierhäufigkeiten auf, wodurch ein direkter Vergleich oft unmöglich ist.

Fortunato und seine Kollegen haben die Zitierhäufigkeiten für verschiedene Fachdisziplinen wie Astronomie, Biologie, Kernphysik, Mathematik oder Tropenmedizin untersucht. Dazu wählten sie Veröffentlichungen, die in einem bestimmten Jahr erschienen. Für jede Disziplin stellten sie ein Histogramm auf, das die Anzahl der Artikel angab, die jeweils eine bestimmte Zahl von Zitaten hatten. Die Histogramme für die verschiedenen Disziplinen unterschieden sich sehr stark voneinander und ließen sich nicht direkt vergleichen. Als die Forscher aber für jede Disziplin das zugehörige Histogramm skalierten, indem sie die Zahl der Zitate durch die mittlere Zitzahl dividierten und gegen die relativen Häufigkeiten auftrugen, folgten alle Histogramme einer universellen Kurve. Diese Universalität galt auch beim Vergleich von Publikationen aus verschiedenen Jahren.

Doch Zitat ist nicht gleich Zitat. Es hat ein größeres Gewicht, wenn ein Autor von einem vielzitierten Nobelpreisträger angeführt wird als von einem unbekannten Neuling. Fortunato und seine Kollegen haben deshalb ein Bewertungsverfahren für wissenschaftliche Autoren entwickelt, das dem Page-Ranking von Google ähnelt. Vom Zitierenden diffundiert „wissenschaftliche Reputation“ zum Zitierten. Dabei bleiben Selbstzitate unberücksichtigt. Außerdem muss sich das Autorenteam einer zitierten Veröffentlichung die daraus erwachsende Reputation teilen. Sobald in diesem diffusiven Reputationsnetz ein stationärer Zustand vorliegt, erhält man eine Rangfolge der Autoren. Fortunato gab ein interessantes Beispiel: Ausgehend von der Datenbasis des Physical Review waren unter den 20 bestplatzierten Physikern im Jahr 1973 allein elf Nobelpreisträger. Es zeigte sich, dass das neue Ranking-Verfahren aussagekräftiger ist als andere, nur auf Zitierhäufigkeit aufbauende Verfahren. Das ermöglicht eine gerechtere Bewertung der Karrierechancen – bis hin zur Vorhersage, wer die besten Aussichten auf den Physik-Nobelpreis hat.

SKM-DISSERTATIONSPREIS

Den Dissertationspreis der Sektion kondensierte Materie (SKM) erhielten Lena Ivanova (TU Berlin) für neue Erkenntnisse über Materialien aus der Gruppe der stickstoffhaltigen III-V-Halbleiter sowie Michael Wimmer für seine an der Universität Regensburg angefertigte Dissertation, in der sich mit der Berechnung der elektronischen und magnetischen Eigenschaften von Nanomaterialien wie Graphen beschäftigt.

