

Gesamtspinstrom reduzieren (Abb. 2). Ein Spinstrom hängt deshalb im Allgemeinen von der Coulomb-Wechselwirkung ab und kann nicht durch eine einfache „Spin-Kontinuitätsgleichung“ beschrieben werden.

Coulomb-Streuung beeinflusst nicht nur Drift-Spinströme, die durch spinabhängige Potentialdifferenzen getrieben werden, sondern auch den diffusiven Spintransport,

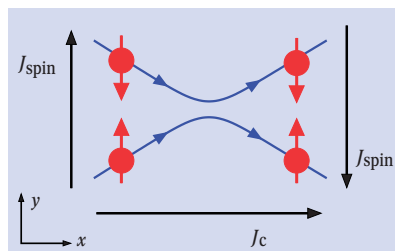


Abb. 2: Ein Stoß zwischen zwei Elektronen, die sich hier in x-Richtung bewegen, kann die Richtung des Spinstroms J_{spin} umkehren, obwohl der elektrische Strom J_c unverändert bleibt.

der durch Konzentrationsgefälle hervorgerufen wird. In zeitaufgelösten optischen Messungen haben Weber und Mitarbeiter die Spindiffusion in zweidimensionalen (2D) Elektronengasen in GaAs-Quantentrögen untersucht [3]. Sie lassen zwei nahezu parallele, aber zueinander senkrecht polarisierte Lichtpulse derart miteinander interferieren, dass im 2D-Elektronengas ein Spingitter entsteht, bei dem sich Streifen mit Elektronenspin up und down regelmäßig abwechseln. Mithilfe des Kerr-Effekts haben Weber und Mitarbeiter dann beobachtet, wie die Spinpolarisation aufgrund von Spindiffusion und -relaxation langsam wieder abklingt. Im Vergleich zur Ladungsdiffusion erhalten sie für die ausgerichteten Spins wesentlich kleinere Diffusionskoeffizienten. Die Messwerte stimmen mit theoretischen Vorhersagen von Irene D'Amico und Giovanni Vignale gut überein [5].

Die vorgestellten Arbeiten illustrieren einerseits das bemerkenswerte Potenzial der Spintronik. Sahoo und Mitarbeiter haben einen Spin-Feldeffekttransistor vorgestellt, der den Grundbaustein für komplexere Funktionen einer spinbasierten Informationsverarbeitung bilden kann. Andererseits macht Webers Arbeit die grundlegend andersartigen Merkmale einer spinbasierten Technologie deutlich.

ROLAND WINKLER

- [1] R. Winkler und M. Oestreich, *Physik Journal*, November 2004, S. 39
- [2] S. Sahoo et al., *Nature Phys.* **1**, 99 (2005)
- [3] Th. Schäpers et al., *Phys. Rev. B* **64**, 125314 (2001)
- [4] C. P. Weber et al., *Nature* **437**, 1330 (2005)
- [5] I. D'Amico und G. Vignale, *Europhys. Lett.* **55**, 566 (2001)

■ C_{60} aus der Nähe betrachtet

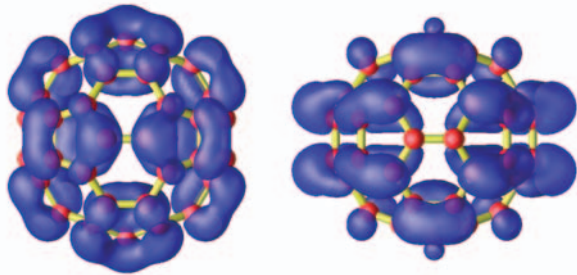
Mittels einer Kombination aus Rastertunnelspektroskopie und theoretischen Rechnungen ist es gelungen, die Jahn-Teller-Verzerrung geladener Fullerenmoleküle direkt zu beobachten.

Nicht zuletzt wegen seiner hohen Symmetrie ist das Fulleren C_{60} eines der faszinierendsten Moleküle. Die 60 Kohlenstoffatome bilden ein kugelförmiges Molekül, das mit seinen 12 Fünf- und 20 Sechsringen das molekulare Ebenbild eines Fußballs ist. Die außerordentliche Symmetrie des Moleküls spiegelt sich natürlich auch in seiner elektronischen Struktur wider: Die Energieniveaus sind hochgradig entartet. So weist etwa das niedrigste unbesetzte Orbital, das t_{1u} -Orbital, eine dreifache Entartung auf, es kann also bis zu sechs Elektronen fassen. Und weil C_{60} sehr elektronegativer Natur ist, nimmt dieses Orbital auch begierig Elektronen auf. Die so entstehenden C_{60} -Anionen mit teilweise gefülltem t_{1u} -Niveau scheinen also einen entarteten Grundzustand zu besitzen.

Bereits 1937 haben sich Hermann Jahn und Edward Teller mit genau solchen Situationen beschäftigt [1]. Sie sagten voraus, dass ein entarteter Grundzustand in der Regel nicht stabil ist. Um ihr Argument zu verstehen, stellen wir uns vor, dass wir die Symmetrie des C_{60} -Moleküls reduzieren, etwa indem wir den „Fußball“ zusammendrücken. Die Entartung des t_{1u} -Orbitals wird dann bereits in erster Ordnung Störungstheorie gebrochen. Betrachten wir beispielsweise das C_{60}^{4-} -Ion, so werden dann die vier zusätzlichen Elektronen die beiden niedrigsten Orbitale auffüllen. Sind diese gegenüber dem entarteten t_{1u} -Niveau abgesenkt, so sinkt die elektronische Energie linear mit der Deformation ab. Andererseits kostet die Verformung des Moleküls elastische Energie, die quadratisch mit der Deformation ansteigt. Im Grundzustand wird das Molekül-Ion also eine endliche Deformation

aufweisen – das bezeichnet man als den statischen Jahn-Teller-Effekt.

Die Jahn-Teller-Verzerrung tritt im Prinzip immer auf. Sie lässt sich jedoch nur dann beobachten, wenn der Energiegewinn durch die Sym-



Molekülorbitale des C_{60}^{4-} -Anions mit statischer Jahn-Teller-Deformation in D_{2h} -Symmetrie. Während sich die Atompositionen um weniger als 0,05 Å ändern, lassen sich die über das ganze Molekül (Durchmesser etwa 7 Å) ausgedehnten Molekülorbitale aufgrund ihrer charakteristischen Elektronendichten mittels Rastertunnel-Spektroskopie klar identifizieren. Links das gefüllte, rechts das leere Molekülorbital.

metriebrechung hinreichend groß ist, etwa im Vergleich zu kT . Im Festkörper gibt es weitere konkurrierende Energieskalen. Betrachten wir dazu einen K_4C_{60} -Kristall, ein Salz aus K^+ - und C_{60}^{4-} -Ionen. Ohne Jahn-Teller-Deformation sollte es sich um ein Metall mit teilweise gefülltem t_{1u} -Band handeln. Dominiert jedoch der Jahn-Teller-Effekt, so spaltet das t_{1u} -Band auf. Das höchste besetzte Band ist dann

komplett gefüllt, sodass ein Isolator vorliegt. Der Jahn-Teller-Effekt konkurriert also mit der kinetischen Energie der metallischen Elektronen. Zudem spielt die Coulomb-Abstoßung zwischen den Elektronen in den t_{1u} -Orbitalen eine wichtige Rolle [2]. K_4C_{60} ist daher durch ein kompliziertes Wechselspiel zwischen kinetischer Energie, Korrelationen und Jahn-Teller-Effekt charakterisiert [3]. Allerdings war es bislang nicht möglich, den Einfluss des Jahn-Teller-Effekts experimentell nachzuweisen.

Um einen Einblick in die elektronische Struktur der Fullereane zu erhalten, hat jetzt ein Team um Mike Crommie von der UC Berkeley eine Monolage K_4C_{60} genauer unter die Lupe genommen [4]. Dazu wird die Monolage mit einer atomar feinen Metallschicht abgetastet. Natürlich lässt sich so eine Jahn-Teller-Verzerrung der Moleküle nicht direkt nachweisen, da die Änderung der Atompositionen bei weitem zu klein ist. Außerdem bildet die Rastertunnelmikroskopie ohnehin nicht einfach die Atompositionen ab; vielmehr macht sie die Zahl der elektronischen Zustände sichtbar, die zum Tunnelstrom zwischen Spitze und Probe beitragen. Diesen Sachverhalt nutzt man bei der Rastertunnelspektroskopie: Bildet

man die Ableitung des Tunnelstroms nach der Spannung zwischen Spitze und Probe, so findet man die Zustandsdichte bei der Energie, die der gewählten Tunnelspannung entspricht. Für Moleküle ist diese Zustandsdichte einfach durch das Quadrat der Eigenfunktionen gegeben. Die Rastertunnelspektroskopie ermöglicht also die Bestimmung von Energie und räumlicher Struktur der Molekülorbitale und wurde bereits erfolgreich zur Abbildung der Wellenfunktionen kurzer Kohlenstoff-Nanoröhrchen eingesetzt [5].

Dem Team der UC Berkeley ist jetzt die Abbildung der Molekülorbitale von C_{60} gelungen. Dabei zeigt sich im Spektrum einer Monolage K_4C_{60} auf Silber (111) eine Energielücke von etwa 0,1 eV. Die Existenz einer Lücke und ihre Kleinheit legt eine Jahn-Teller-Aufspaltung des t_{1u} -Orbitals nahe. Vergleicht man nun die Rastertunnel-Bilder mit theoretisch berechneten Molekülorbitalen (s. Abb.), so findet man, dass sie dasselbe charakteristische Aussehen haben und sich deutlich vom ursprünglichen t_{1u} -Orbital unterscheiden. Damit ist der Nachweis erbracht, dass sich der Jahn-Teller-Effekt in einer K_4C_{60} -Monolage gegenüber der kinetischen Energie durchsetzt und das Material zu einem Isolator macht.

Wichtiger noch als das konkrete Ergebnis sind die Aussichten, die die neue Arbeit eröffnet: Molekulare Kristalle zeichnen sich durch eine große Zahl interner Freiheitsgrade und konkurrierender Energieskalen aus. Gerade deshalb sind diese Materialien so interessant und vielseitig. Andererseits macht es aber das Verständnis ihrer Eigenschaften außerordentlich schwierig. Hier eröffnet der Ansatz von Crommie und Mitarbeitern neue Möglichkeiten, die elektronische Struktur molekularer Systeme direkt in Augenschein zu nehmen und mittels Simulationsrechnungen zu verstehen.

ERIK KOCH

- [1] H. A. Jahn, E. Teller, Proc. Royal Soc. A **161**, 220 (1937)
- [2] E. Koch, O. Gunnarsson, R. M. Martin, Phys. Rev. B **60**, 15714 (1999)
- [3] J. E. Han, E. Koch, O. Gunnarsson, Phys. Rev. Lett. **84**, 1276 (2000)
- [4] A. Wachowiak et al., Science **310**, 468 (2005)
- [5] S. G. Lemay et al., Nature **412**, 617 (2001)

Dr. Erik Koch,
Institut für Festkörperforschung,
Forschungszentrum
Jülich, 52425 Jülich

Briefwechsel zeigen Skalenverhalten

Charles Darwin (1809 – 1882) und Albert Einstein (1879 – 1955) waren emsige Briefschreiber. Während Darwin im Laufe seines Lebens etwa 7600 Briefe schrieb und rund 6500 empfing, kommt Einstein gar auf mehr als 14500 geschriebene und über 16200 emp-

fangene Briefe. Die Physiker João Gama Oliveira und Albert-László Barabási von der University of Notre Dame (Indiana, USA) haben nun Einsteins und Darwins Briefwechsel genauer unter die Lupe genommen. Dabei haben sie ermittelt, dass die Wahrscheinlichkeit $P(\tau)$ für die Beantwortung eines Briefes innerhalb einer Zeit τ einem einfachen Potenzgesetz folgt: $P(\tau) \approx \tau^{-\alpha}$. Sowohl bei Darwin als auch bei Einstein liegt der Exponent α nahe bei 3/2. Das sei, so Oliveira und Barabási, Ausdruck eines universellen Skalengesetzes. Das schließe auch späte Antwortbriefe und erst nach langer Zeit wieder aufgenommene Korrespondenzen ein, die somit keine unruhmlichen Ausnahmen seien. Bei E-Mail-Wechseln lieferten Analysen übrigens für den Exponenten α den Wert 1, eine Folge der wesentlich kürzer Beantwortungszeiten. J. G. Oliveira und A.-L. Barabási, Nature **437**, 1251 (2005)



QUELLE: J. RENN (HRSG.) ALBERT EINSTEIN. INGENIEUR DES UNIVERSUMS. DOKUMENTE EINES LEBENSWEGES, WILEY-VCH, BERLIN 2005