

### Formationstanz der Kreisel

Wandernde Pulks aus einheitlich rotierenden Elektronen könnten die Basis künftiger Computer bilden. Physiker an der Universität Marburg haben das Verhalten solcher »Spinströme« in Halbleitern rechnerisch simuliert.

Von Joachim Eiding

Da Elektronen eine Ladung tragen, lassen sie sich durch elektrische Felder steuern. Darauf beruht letztlich die moderne Halbleitertechnik mit Silizium. Durch stetige Verkleinerung der elektronischen Schaltkreise ließ sich in der Vergangenheit die Leistungsfähigkeit der Computerchips stetig steigern. Schon in wenigen Jahren dürfte die Miniaturisierung jedoch an physikalische Grenzen stoßen. Deshalb denken Physiker bereits seit Längerem über Alternativen zur heutigen Elektronik nach. Dabei bietet sich an, eine andere Eigenschaft des Elektrons zu nutzen: den Spin.

Darunter kann man sich anschaulich eine Kreisbewegung vorstellen – ähnlich dem Drall eines angeschnittenen Tennisballs. Sie verleiht dem elektrisch geladenen Teilchen zusätzlich ein magnetisches Moment. Die genauen Eigenschaften dieses Spins lassen sich allerdings nicht mit der klassischen Physik, sondern nur mit einer Kombination aus Quantenmechanik und Relativitätstheorie verstehen. Demnach kann das magnetische Moment des Elektrons nur zwei verschiedene Werte annehmen: Je nachdem, ob sich das Teilchen rechts- oder linksherum dreht, spricht man von »spin-up« oder »spin-down«. In einem

Magnetfeld haben die beiden Zustände verschiedene Energie und lassen sich so unterscheiden.

Diese Zusammenhänge nutzt ein neuer Zweig der Informatik, der vor rund zwanzig Jahren aufkam: die Spintronik. Die heutige Elektronik assoziiert die An- und Abwesenheit eines Stroms mit den Binärziffern »1« und »0«. Eine analoge Zahldarstellung lässt sich mit den Zuständen »spin-up« und »spin-down« realisieren. Voraussetzung dafür ist allerdings eine hohe Spinpolarisation: Der Drall möglichst vieler Elektronen sollte gleich ausgerichtet sein. »Das Traummaterial für die Spintronik würde eine hundertprozentige Spinpolarisation an der Fermi-Kante zeigen«, erklärt die Chemikerin Claudia Felser von der Universität Mainz. Unter dieser Kante verstehen Physiker die Trennlinie zwischen mit Elektronen besetzten und unbesetzten Energiezuständen.

#### Polonaise paralleler Spins

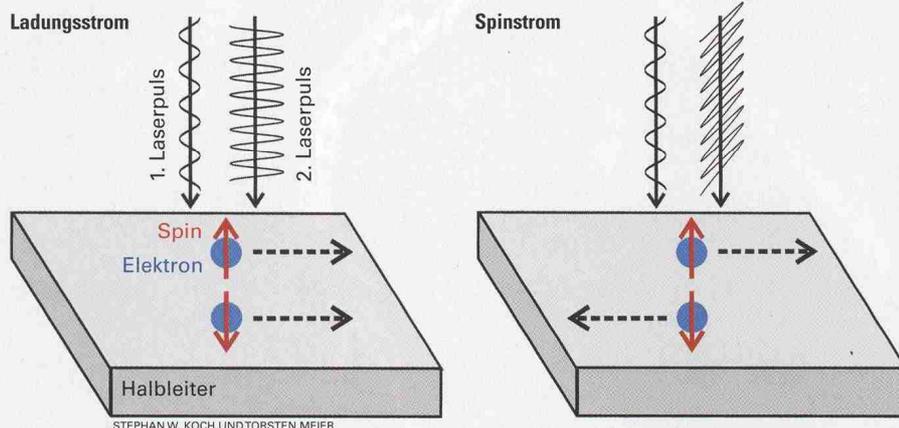
Eine Möglichkeit zur Realisierung spintronischer Schaltkreise besteht darin, statt der in der Elektronik genutzten Ladungsströme so genannte Spinströme zu erzeugen, in denen die wandernden Teilchen alle dieselbe Spinrichtung haben. US-Forschern um David Awschalom an der Universität von Kalifornien ist das



erstmalig 1997 gelungen, indem sie in Halbleitern durch Zugabe von Mangan ferromagnetisches Verhalten induzierten und dann ein äußeres Magnetfeld anlegten. Vor drei Jahren schafften es dann deutsche Wissenschaftler um Wolfgang Rühle an der Universität Marburg, Spinströme auch rein optisch anzuregen.

Das hat viele Vorteile. Man kann normale, nicht vorbehandelte Halbleiter verwenden, braucht weder mechanische Kontakte noch äußere Felder und hat die Möglichkeit, die Ströme durch ultrakurze Laserpulse – im Bereich von Femtosekunden ( $10^{-15}$  Sekunden) – sehr schnell anzuschalten.

Kürzlich hat die Forschergruppe um die Physiker Stephan W. Koch und Torsten Meier von der Universität Marburg das Verhalten solcher Spinströme in einem Festkörper erstmals auch im Computer simuliert (*Physical Review Letters*, Bd. 95, Artikel 086606). Dazu schrieb das Team ein umfangreiches Programm, das



Mit zwei gekoppelten Laserstrahlen unterschiedlicher Frequenz lassen sich, je nachdem, ob sie parallel oder senkrecht zueinander polarisiert sind, Ladungs- oder Spinströme hervorrufen. Im ersten Fall bewegen sich alle Elektronen in dieselbe Richtung. Im zweiten Fall dagegen wandern die Teilchen, deren Spin nach oben weist, nach rechts, die anderen nach links. An der Ladungsverteilung insgesamt ändert sich dabei nichts.



In dieser Versuchsanordnung konnten Marburger Physiker mit Laserlicht in Halbleitern Ströme von Elektronen erzeugen, deren Spins alle in dieselbe Richtung wiesen.

WOLFGANG RÜHLE

es auf Parallelrechnern laufen ließ. Dabei wurden nicht nur Spin-, sondern zum Vergleich auch Ladungsströme simuliert.

Beide können entstehen, wenn man einen Halbleiter mit sehr kurzen Zweifarben-Laserpulsen beleuchtet. Die Strahlung katapultiert Elektronen aus dem Valenzband – unter Hinterlassung von Löchern – ins energetisch höhere Leitungsband des Festkörpers, wo die Teilchen dank einer gewissen Überschussenergie relativ weit oben landen. Dort können sie dann wandern. Allerdings wird ihre Energie durch den Zusammenstoß mit anderen Partikeln und die Wechselwirkung mit dem Kristallgitter allmählich aufgezehrt. Dadurch purzeln die Elektronen mit der Zeit zunächst auf die Unterkante des Leitungsbands herunter. Von dort fallen sie schließlich ins Valenzband zurück und landen wieder in einem der bei der Anregung entstandenen Löcher.

Das bloße Anheben von Elektronen ins Leitungsband ließe sich auch mit einem einfachen, einfarbigen Laserpuls erreichen. Damit die gewünschten Spin- und Ladungsströme entstehen, brauchen die angeregten Teilchen jedoch gewissermaßen einen Extraschub. Den liefert der zweite Puls, dessen Strahlungsfrequenz nur halb so groß ist. Er muss eng mit dem ersten abgestimmt sein, sodass sich beide in definierter Weise überlagern.

Eine entscheidende Rolle spielt auch die Polarisation, das heißt die Orientierung der Ebene, in der die Lichtwellen der beiden Pulse schwingen. Wenn sie übereinstimmt, bilden sich Ladungsströ-

me. Stehen die Polarisierungsebenen der beiden Lichtwellen senkrecht zueinander, kommt es dagegen zu Spinströmen.

Hierbei werden die Elektronen nach der Orientierung ihres magnetischen Moments in zwei gleich große Gruppen getrennt, die sich in entgegengesetzte Richtungen bewegen: Diejenigen Teilchen, deren Spin nach oben zeigt, fließen zum Beispiel nach rechts und die mit nach unten gerichtetem Spin nach

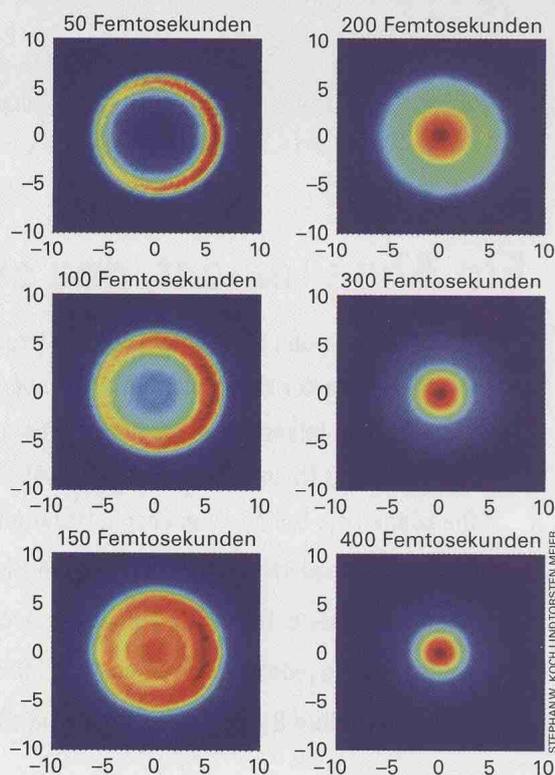
links. Weil dabei gleich viele Elektronen zur einen wie zur anderen Seite wandern, kommt es zu keiner Nettoverschiebung der elektrischen Ladungen. Es fließt also kein Ladungsstrom.

Mit ihren Simulationen konnten die Marburger Physiker wichtige Details über das Verhalten der Spinströme ermitteln. So zeigte sich, dass die Polarisation sehr lange erhalten bleibt – ein erfreulicher Befund. Außerdem wandern die Elektronen in Spin- und Ladungsströmen den Berechnungen zufolge im Mittel gleich schnell. Es gab allerdings auch ein eher negatives Ergebnis: Die Spinströme kamen schon nach ungefähr 125 Femtosekunden zum Erliegen. Damit klangen sie schneller ab als die Ladungsströme, deren Lebensdauer immerhin rund 150 Femtosekunden beträgt.

Die Marburger Forscher konnten bei ihren Simulationen auch den Grund für diesen zunächst überraschenden Unterschied herausfinden. In beiden Fällen verlieren die wandernden Elektronen Energie durch Kollisionen mit den Atomen des Kristallgitters. Die Spinströme werden jedoch zusätzlich durch Zusammenstöße zwischen den wandernden Teilchen selbst gebremst, da die eine Hälfte von ihnen in die entgegengesetzte Richtung wie die andere strebt. Bei La- ▷

## Abklingen eines Ladungsstroms

**Per Computer** ließ sich das Abklingen eines optisch angeregten Ladungsstroms zweidimensional nachvollziehen. In den gezeigten Momentaufnahmen der Simulation ist mittels Farbkode die Anzahl der Elektronen angedeutet, die jeweils den auf den Achsen angegebenen Impuls (in willkürlichen Einheiten) in horizontaler und vertikaler Richtung haben: Sie nimmt von blau über grün und gelb nach rot zu. Kurz nach der Laser-Anregung ist der Impuls noch bei den meisten Elektronen nach rechts gerichtet und nur bei wenigen nach links. Die Komponenten nach oben oder unten gleichen sich aus. Durch Stöße mit dem Kristallgitter verringert sich der Impuls der Teilchen schon nach wenigen hundert Femtosekunden und verteilt sich einheitlich auf alle Raumrichtungen. In der Visualisierung erhält dadurch der anfänglich inhomogene Ring eine einheitliche Farbe, füllt sich und schrumpft schließlich.



STEPHAN W. KOCH UND TORSTEN MEIER

▷ dungsströmen kommt es zwar auch zu Kollisionen zwischen einzelnen Elektronen, aber weil diese sich in die gleiche Richtung bewegen, wird dabei nur Impuls zwischen ihnen übertragen, während sich an der Strömungsgeschwindigkeit insgesamt nichts ändert.

Die Simulationen zeigten ferner, wie sich die stärksten Ladungs- und Spinströme erzeugen lassen. Der niederfrequente Laserpuls sollte dazu wesentlich intensiver sein als der hochfrequente, wobei das optimale Intensitätsverhältnis, das jedoch von zahlreichen Faktoren abhängt, etwa bei vier liegt.

Diese Erkenntnis nutzt den Informatikern, die auf die Spintronik als Com-

putertechnik der Zukunft setzen und dazu möglichst starke und langlebige Spinströme brauchen. »Unsere theoretischen Ergebnisse werden zum einen weitere Experimente motivieren und sind zum anderen sehr hilfreich, um das mögliche Anwendungspotenzial von ultraschnell erzeugten Ladungs- und Spinströmen besser zu verstehen«, erläutert Koch die Bedeutung seiner Arbeit.

Bis zu neuartigen Rechnern, die auf der Spintronik beruhen, ist es allerdings noch ein weiter Weg. »Momentan sind die meisten Untersuchungen auf Laborniveau«, gesteht der Marburger Forscher. Es geht also primär um Grundlagenforschung mit dem Ziel, die Physik hinter

den Effekten zu verstehen. Bis Informatiker das neue Prinzip technisch anwenden können, dürften nach Einschätzung von Koch einige Jahre vergehen.

Praktiker wie George Bourianoff vom Chip-Hersteller Intel geben sich noch zurückhaltender. Er rechnet nicht vor 2020 mit den ersten einsatzfähigen Spintronik-Computern. Für die Marburger Forscher ist die nächste große Herausforderung nun, die Lebensdauer der optisch erzeugten Spinströme entscheidend zu vergrößern; denn ein paar hundert Femtosekunden reichen keinesfalls aus.

---

**Joachim Eiding** ist promovierter Chemiker und freier Wissenschaftsjournalist in München.