

Spin-Elektronik

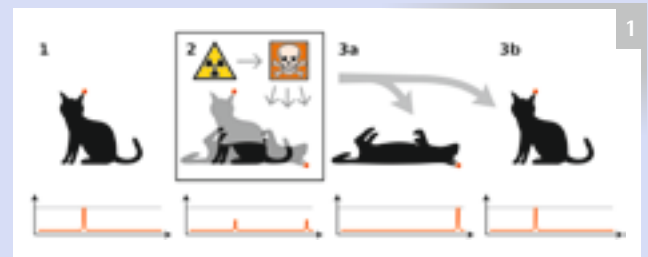
ODER WIE ICH LERNTÉ, DAS RAUSCHEN ZU LIEBEN

Im Gegensatz zur Halbleiter-
elektronik nutzt das
noch junge Forschungsgebiet
der Spin-Elektronik nicht nur
die elektrische Ladung von
Elektronen, sondern ebenso
deren Eigendrehimpuls zur
Informationsdarstellung und
-verarbeitung. Sie verspricht
damit unter anderem die
Entwicklung neuer Computer,
die schneller und leistungs-
fähiger sein können
als herkömmliche.
Wie die Spin-Elektronik
für die Technologie
dieser Quantencomputer
eingesetzt werden kann,
zeigen drei Wissenschaftler vom
Institut für Festkörperphysik.

Seit Beginn des Computerzeitalters wird die elektrische Ladung von Elektronen für die Informationsverarbeitung genutzt. Viele Elektronen an einer Stelle entsprechen einer hohen Spannung (eins), wenige Elektronen einer niedrigen Spannung (null). Elektronen besitzen aber nicht nur eine elektrische Ladung, sondern auch einen Drehimpuls, den Spin. Er beschreibt anschaulich die Drehung des Elektrons um seine eigene Achse. Das Elektron dreht sich mit konstanter Geschwindigkeit im oder gegen den Uhrzeigersinn. Die Quantenmechanik erlaubt, wenn der Spin gemessen wird, nur diese beiden Zustände. Das will eine zukünftige Spin-Elektronik nutzen: Nicht die Ladung, sondern die Drehrichtung der Elektronen repräsentiert die Nullen und Einsen.

Unverändert seit dem ersten programmierbaren Binärrechner von Konrad Zuse aus dem Jahr 1941 bedienen Computer sich des von Gottfried Wilhelm Leibniz etablierten Binärsystems aus Nullen und Einsen. Der Einsatz des Spins der Elektronen verspricht mehr. Der Elektronenspin ist ein äußerst stabiles quantenmechanisches System und kann nicht nur die Werte Null und Eins annehmen, sondern auch eine beliebige Überlagerung von Null und Eins. Der Spin kann also gleichzeitig Null und Eins sein – genau wie in dem berühmten

Schrödingers Katze ist ein berühmtes Gedankenexperiment, das die Vorhersagen der Quantenmechanik für atomare Teilchen anschaulich auf unsere alltägliche makroskopische Welt überträgt. Eine Katze sitzt in einer geschlossenen Kiste. In der Kiste befinden sich ein radioaktives Atom und Giftgas, das beim zufälligen radioaktiven Zerfall des Atoms freigesetzt wird und die Katze tötet. Das radioaktive Atom befindet sich entsprechend der Quantenmechanik nach einer gewissen Zeitspanne in einem Zustand, der aus der Überlagerung »zerfallen« und »nicht zerfallen« besteht. Entsprechend muss die Katze in einem Zustand sein, in dem sie gleichzeitig tot und lebendig ist. Erst wenn wir die Kiste öffnen und nachschauen (messen), kollabiert nach der Kopenhagener Deutung der Quantenmechanik der Überlagerungszustand. Erst der Messprozess macht aus einer Katze, die *gleichzeitig* tot und lebendig ist, eine Katze, die *eindeutig* tot oder *eindeutig* lebendig ist. Dieses scheinbar paradoxe Verhalten in der Quantenmechanik wurde in zahlreichen Experimenten für atomare Teilchen bestätigt.



Gedankenexperiment von Schrödinger die Katze gleichzeitig lebend und tot sein kann. Der Spin von Elektronen ist damit ein vielversprechender Kandidat für zukünftige Quantencomputer. Diese Quantencomputer sollen Probleme berechnen, die herkömmlichen Computern auf Grund ihrer Komplexität für immer verschlossen bleiben werden.

Computerprozessoren sind aus halbleitenden Materialien aufgebaut, da in diesen Materialien die Elektronendichte sehr leicht eingestellt und verändert werden kann. Eine zukünftige Spin-Elektronik wird aus den gleichen Gründen wahrscheinlich ebenfalls auf Halbleitermaterialien basieren. Der Weg dorthin ist aber noch spannend und ungewiss,

da viele grundlegende Probleme ungelöst sind. Schließlich muss der Elektronenspin zunächst in einen bekannten Anfangszustand gebracht (initialisiert), anschließend für die eigentlichen Rechenoperationen gezielt manipuliert und letztendlich ausgelesen werden. Die dafür notwendige Grundlagenforschung wird gemeinsam von über 30 Arbeitsgruppen aus Deutschland im Rahmen des DFG-Schwerpunktprogramms »Halbleiter-

Quantenzustandes verändert grundsätzlich diesen Zustand. Eine bedeutende Frage ist daher, wie der Spin von Elektronen in Halbleitern mit der geringsten möglichen Störung gemessen werden kann. Eine Antwort darauf ist in der Quantenoptik zu finden, die so genannte Spinrauschspektroskopie.

Stellen Sie sich vor, Sie wollen einen ohmschen Widerstand vermessen. Sie legen da-

tenmechanischen Messungen schon. Sie können den Widerstand aber auch störungsfreier messen, indem Sie das thermische Rauschen des Widerstandes beobachten. Freie Elektronen bewegen sich auch ohne angelegte Spannung aufgrund ihrer thermischen Energie. Diese Bewegung ist zufällig (stochastisch), so dass sich manchmal mehr und manchmal weniger Elektronen an dem einen Ende des Widerstandes befinden als am anderen Ende. Mehr oder weniger Elektronen entsprechen einer positiven oder negativen elektrischen Spannung zwischen Eingang und Ausgang des Widerstandes. Diese Spannung kann gemessen werden und sie ändert sich zeitlich aufgrund der thermischen Bewegung der Elektronen. Die Spannung rauscht und die Stärke und die Frequenz dieses Rauschen verrät viel über die Dynamik der Elektronen und den Wert des Widerstandes. Sehr ähnlich verrät das Rauschen der Elektronenspins in Halbleitern die für quantenmechanische Bauelemente wichtige Dynamik der Spins.

Bei der Spinrauschspektroskopie wird keine Spannung gemessen, sondern die Drehung der linearen Polarisation von Laserlicht. Halbleiter absorbieren kein Licht, dessen Energie kleiner gewählt ist als die Bandlücke des Halbleiters, so dass Lichtabsorption unser quantenmechanisches System nicht stört. Gleichzeitig hat jedes freie Elektron im Halbleiter einen Spin mit einer zufälligen Orientierung und jeder dieser Spins ändert den Brechungsindex des Halbleiters und dreht die Polarisation des Laserlichtes. Das Rauschen der Polarisationsrichtung verrät somit die Dynamik der stochastischen Spinorientierung der Elektronen bei geringster möglicher Störung des Systems. Keine Absorption, aber einen hohen Brechungsindex



Abbildung 1
Schrödingers Katzenexperiment
Quelle: Christian Schirm

Abbildung 2a
Konventionelle Untersuchungsmethoden
Quelle: Chris Hellyar – istockphoto.com



Abbildung 2b
Spinrauschspektroskopie
Quelle: Edyta Pawlowska – Fotolia.com

Spintronik« erforscht. Wissenschaftler des Instituts für Festkörperphysik in Hannover koordinieren das Programm.

Während »konventionelle« Spin-Computer noch prinzipiell einfach erscheinen, hält die Quantenmechanik für die Quanteninformationsverarbeitung eine reizvolle Hürde parat. Das Messen eines

für normalerweise eine Spannung U an den Widerstand R an, messen den Strom I und berechnen den Widerstand nach dem ohmschen Gesetz $R = U/I$. Sehen Sie das Problem? Der Strom in dem Widerstand heizt den Widerstand auf und beeinflusst damit den Messwert. Bei Widerstandsmessungen ist dies in der Regel kein Problem, bei quan-



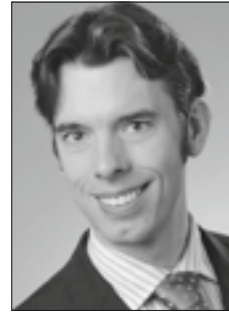
Prof. Dr. Michael Oestreich

Jahrgang 1965, lehrt seit 2000 am Institut für Festkörperphysik an der Leibniz Universität Hannover. Seine Forschungsschwerpunkte sind die Spin-Elektronik in Halbleitern, Physik der Nanostrukturen und die Ultrakurzzeitspektroskopie. Kontakt: Michael.Oestreich@nano.uni-hannover.de



Dr. Georg Müller

Jahrgang 1982, ist seit 2007 Mitarbeiter am Institut für Festkörperphysik und untersucht die Dynamik von Elektronenspins in Halbleitern.



Dr. Jens Hübner

Jahrgang 1972, ist seit 2006 als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Festkörperphysik in der Lehre und Forschung tätig. Seine Forschungsschwerpunkte sind die komplexe Spin-Dynamik in Halbleiternanostrukturen sowie die Erforschung von bekannten und neuartigen Halbleitermaterialien mittels Ultrakurzzeitspektroskopie. Kontakt: jhuebner@nano.uni-hannover.de

Wo wird uns die Spinrauschspektroskopie in Zukunft hinführen? Tiefenaufgelöste Experimente haben im angewandten Bereich bereits gezeigt, dass die Spinrauschspektroskopie im Prinzip zerstörungsfrei die Dotierung von Halbleitern dreidimensional darstellen kann. Messungen der Spindynamik in verschiedenen Halbleiternanostrukturen legen die Grundlagen für eine zukünftige Halbleiter-Spintronik. Im Rahmen eines BMBF-Projektes wird in Hannover mittels der Spinrauschspektroskopie die

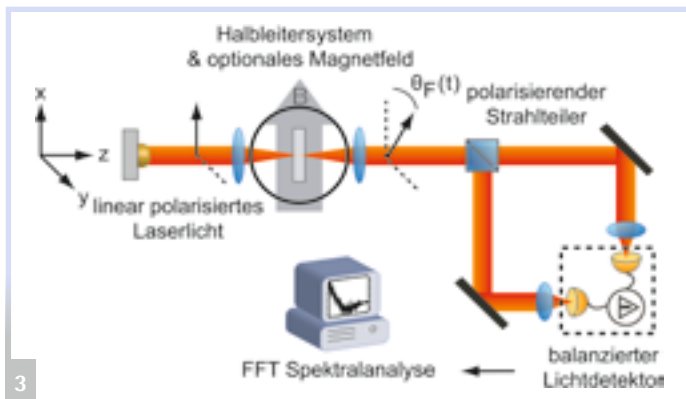


Abbildung 3 Schematischer Aufbau einer Spinrauschmessung

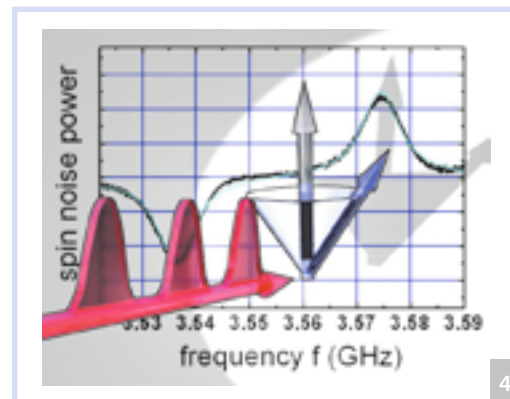


Abbildung 4 Ultrakurze Laserpulse erlauben Messungen wie mit einem Stroboskop und machen die Spindynamik von Elektronen auch bei höchsten Frequenzen sichtbar.

kennen wir übrigens aus dem Alltag von unseren Brillengläsern, die transparent sind und gleichzeitig eine hohe Brechkraft für Licht besitzen.

Die Methode der Spinrauschspektroskopie wurde in Halbleitern erstmals in Hannover erfolgreich demonstriert, und zwar im Jahr 2005 an einem Ensemble aus 50 Milliarden Elektronen. Fortlaufende experimentelle Verbesserungen haben bereits im Jahr 2008

die Sensitivität auf 150 Elektronenspins erhöht und in Kürze wird im Laboratorium für Nano- und Quantenengineering der Nachweis einzelner Elektronenspins mittels Spinrauschspektroskopie erwartet. Die Spinrauschspektroskopie dringt damit in die Welt der Nanostrukturen ein. Tricks aus der Kurzzeitspektroskopie ermöglichen zudem trotz langsamer elektrischer Detektoren Messungen der Spindynamik im hohen Gigahertz-Bereich.

die Verschränkung zweier makroskopischer Spinsensibles untersucht. Diese Art der Verschränkung ist ein Grundbaustein für die so genannte Quanteninformationsübertragung, die eine abhörsichere Kommunikation sicherstellen soll. Ob Spinrauschspektroskopie auch in Silizium anwendbar ist, wird mithilfe des Instituts für Solarenergieforschung in Hameln aktuell erforscht. Und ob Spinrauschspektroskopie Bose-Einstein-Kondensation von Magnonen bei Raumtemperatur sichtbar machen kann, ist ebenfalls Teil der Forschung. Sicher ist nur, dass das Rauschen der Spins noch viele Geheimnisse ver-raten wird.