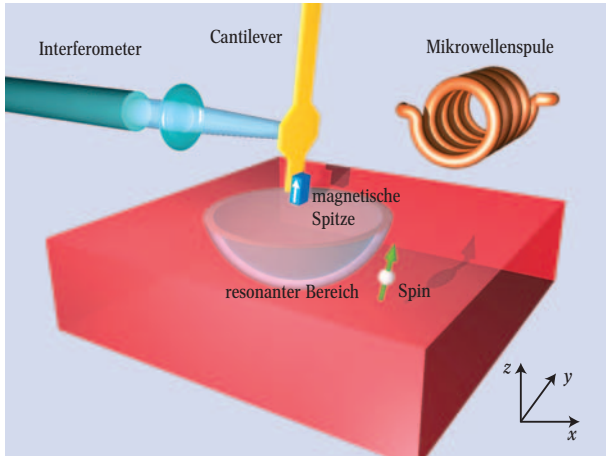


Ein Blick auf einzelne Spins

Mit Magnetresonanz-Kraftmikroskopie lässt sich ein einzelner Elektronenspin mechanisch nachweisen.

Die räumliche Abbildung mit Hilfe der Magnetresonanz wird heute in der Biologie und Medizin vielfach angewendet. Dabei wird ohne Strahlenbelastung ein dreidimensionales



Aufbau des Einzelspin-MRFM Experimentes [1]: Die magnetische Spitze wird 125 nm über der SiO₂-Probe positioniert. Der graue Bereich entspricht dem resonanten Bereich der Probe. Durch Schwingen des mechanischen Oszillators (Cantilever) wird der resonante Bereich verschoben und der Spin invertiert. Dies führt zu einer Frequenzverschiebung des mechanischen Oszillators im mHz-Bereich. Mit dieser Technik lassen sich Spins bis zu einer Tiefe von 100 nm unter der Probenoberfläche nachweisen. (Quelle: IBM)

nales Bild der Spindichten erzeugt. Mit der Magnetresonanz-Bildgebung lässt sich z. B. – im Gegensatz etwa zu Röntgenmethoden – ein hoher Kontrast zwischen verschiedenen „weichen“ Gewebetypen im Körper erzielen.

Die Empfindlichkeit der heutzutage eingesetzten Spulen begrenzt allerdings die räumliche Auflösung. So benötigt man etwa 10¹² Kernspins bzw. 10⁷ Elektronenspins, um ein Signal zu erhalten. Dan Rugar und seinen Kollegen vom IBM Forschungslabor in Almaden, USA, ist es nun gelungen, mit Hilfe der Magnetresonanz-Kraftmikroskopie (Magnetic Resonance Force Microscopy, MRFM) einen einzelnen Elektronenspin mechanisch zu detektieren [1]. Diese außerordentliche Errungenschaft eröffnet verschiedene Perspektiven, wie etwa die Möglichkeit, einzelne Proteine mit atomarer Auflösung dreidimensional abzubilden. Auch angesichts des Vorschlags, dass ein ähnlicher Aufbau geeignet sein könnte, um den Spin-Zustand eines Quantencomputers auszulesen, ist es verständlich, dass dieses Experiment großes Aufsehen erregt hat.

1) Mit einer Sensitivität von 10⁻¹⁸ N/√Hz kann mit einer Bandbreite von 1 Hz eine Kraft von 10⁻¹⁸ N gemessen werden.

2) Aufgrund des speziellen Spin-Manipulations-Protokolles kommt es zu einer zyklischen Spininversion, bei welcher der Elektronenspin adiabatisch umgeklappt wird.

Die Geschichte der MRFM, die gewissermaßen die dreidimensionale Magnetresonanz-Bildgebung mit der enormen Empfindlichkeit des Rasterkraftmikroskops kombiniert, ist noch relativ jung. 1991 schlug John A. Sidles vor, die Sensitivität der Magnetresonanz dadurch zu verbessern, dass man die Spulen durch mechanische Oszillatoren hoher Güte ersetzt [2]. Im Gegensatz zur Spule, deren Induktionssignal proportional zur Querschnittsfläche ist, haben die hochempfindlichen mechanischen Oszillatoren den Vorteil, dass sie sich miniaturisieren lassen. Im Rasterkraftmikroskop nutzt man diese Oszillatoren, auch Cantilever genannt, um Oberflächen mit atomarer Auflösung abzutasten. Dabei verändern die zwischenatomaren Kräfte (z. B. Coulomb- und van der Waals-) zwischen Abstapfe und Probenoberfläche das Schwingungsverhalten des Cantilevers.

Beim MRFM wird nun eine magnetische Spitze auf dem mechanischen Oszillator fixiert (Abb.). Im Vergleich zum „normalen“ Rasterkraftmikroskop (AFM) verwendet man sehr kleine Federkonstanten von 10⁻² bis 10⁻⁴ N/m. Damit lassen sich noch wesentlich schwächere Kräfte als mit dem AFM nachweisen (dort liegt die Empfindlichkeit im Bereich von 10⁻¹² N). Ein äußeres statisches Feld wird nun

mit demjenigen der magnetischen Spitze überlagert, sodass insgesamt ein inhomogenes Feld im Probenbereich entsteht. Ein gleichzeitig angelegtes Mikrowellenfeld versetzt bestimmte Probenbereiche in magnetische Resonanz. Dies führt zu einer Änderung der magnetischen Wechselwirkung zwischen Spitze und Probe. Dabei lassen sich Feldgradienten von einigen Gauß/nm (10⁵ T/m) erreichen, sodass das in Resonanz befindliche Volumen sehr klein werden kann.

Theoretische Abschätzungen deuteten darauf hin, dass es mit dieser Methode auch möglich sein sollte, einzelne Spins auf atomarer Skala nachzuweisen. 1992 präsentierte D. Rugar die ersten MRFM-Experimente mit dem Nachweis von 10⁷ Elektronenspins [3]. In der Folge haben verschiedene Gruppen diese Resultate reproduziert und die Anzahl nachgewiesener Spins weiter reduziert. Dies gelang durch wesentliche Verbesserungen im Bereich der Mikromechanik, indem man kleine Federkonstanten von 10⁻⁴ N/m und hohe Güten von 10⁴ bis 10⁶ miteinander kombinierte [4]. Durch den Betrieb der Instrumente bei tiefen Temperaturen von 1 bis 5 K ließ sich zudem das thermische Rauschen der Spins und der mechanischen Sensoren verringern. Die erreichten Kraftsensitivitäten im Bereich von 10⁻¹⁸ N/√Hz¹) bedeu-

KURZGEFASST...

Variable Halbwertszeit

Die Halbwertszeit eines Elements kann von seiner chemischen Umgebung abhängen. Das haben japanische Physiker nun besonders deutlich bei Beryllium gezeigt. ⁷Be zerfällt normalerweise innerhalb einer Halbwertszeit von 53,1 Tagen in ⁷Li. Dabei fängt ein Proton im Kern ein Elektron ein und wandelt sich in ein Neutron um. Sperrt man das Beryllium-Atom jedoch in das Innere eines C₆₀-Käfigs ein, so erniedrigt sich die Halbwertszeit um rund 1 % auf 52,7 Tage. Ursache für diesen ungewöhnlichen Effekt ist die veränderte Elektronen-Wellenfunktion innerhalb des Kohlenstoff-Käfigs.

T. Ohtsuki et al., Phys. Rev. Lett. 93, 112501 (2004)

Blick in den Laserpuls

Erstmals haben Physiker direkt beobachtet, wie sich das schnell veränderliche elektromagnetische Feld eines kurzen Laserpulses von sichtbarem Licht aufbaut und wieder abklingt. Das Forscherteam aus Wien, Bielefeld und Garching schickte dazu den Laserpuls, dessen Schwingungsdauer nur rund eine fs (10⁻¹⁵ s) beträgt, in eine Wolke aus Neon-Atomen, deren Elektronen da-

durch eine feldinduzierte Impulsänderung erfahren. Mit einem zweiten nur 250 as (10⁻¹⁸ s) langen Puls im extremen UV-Bereich werden die Neon-Atome ionisiert. Variiert man nun die Zeitverschiebung zwischen beiden Pulsen und detektiert die Elektronen nach der Ionisierung, so ist deren kinetische Energie direkt ein Maß für die elektrische Feldstärke des fs-Pulses. E. Goulielmakis et al., Science 305, 1267 (2004)

Längenrekord bei Nanoröhrchen

Um z. B. die ungewöhnlichen mechanischen Eigenschaften von Kohlenstoff-Nanoröhrchen ausnützen zu können, müssen diese möglichst lang sein. Amerikanische Forscher ist es nun gelungen, bei einer Wachstumsrate von 11 μm/s bis zu 4 cm lange Röhrchen zu erzeugen. Dafür beschleunigten sie das Verfahren der *Chemical Vapour Deposition*, bei dem Feststoffe aus der Gasphase abgeschieden werden, mit einem metallischen Katalysator. Die Forscher sind davon überzeugt, dass sich auf diese Weise kontinuierliche Röhrchen mit fast beliebiger Länge wachsen lassen. L.X. Zheng et al., Nature Materials doi:10.1038/nmat1216

teten eine Verbesserung um sieben Größenordnungen gegenüber konventionellen Kraftsensoren! Dies eröffnete den Wettlauf um die mechanische Detektion von einzelnen Elektronenspins, den – nachdem Bruland et al. 1998 bereits 2×10^2 Spins detektieren konnten [5] – D. Rugar et al. nun für sich entscheiden konnten [1].

Ein wichtiger Schritt, um dieses Ziel zu erreichen, war dabei die Neuentwicklung eines speziellen Spin-Manipulations-Protokolles. Im Gegensatz zu konventionellen Magnetresonanz-Experimenten, wo Modulationstechniken und Pulssequenzen zum Einsatz kommen, welche für die Messung von Spinensembles entwickelt wurden, verwendet man bei der Magnetresonanz-Kraftmikroskopie den mechanischen Oszillator als Taktgeber und misst kleine Frequenzverschiebungen im mHz-Bereich: Unter Einfluss des Mikrowellenfeldes klappt der Spin des Elektrons um, sobald es vom resonanten Bereich passiert wird. Dabei ändert sich jedesmal auch die magnetische Kraft zwischen Magnetspitze und dem Elektron.²⁾ Dadurch verschiebt sich die Schwingungsfre-

quenz des mechanischen Oszillators im mHz-Bereich, was man mit Hilfe eines Laserinterferometers präzise messen kann.

Als Probe haben Rugar und seine Mitarbeiter eine Glasprobe mit Defekten (sog. E'-Zentren) im SiO₂-Gitter verwendet, welche ungepaarte Elektronen binden. Die Probe besitzt dabei eine relativ geringe Spindichte von 10^{15} bis 10^{14} cm⁻³. Die hervorragende Leistung von Rugar et al. ist der Nachweis eines Elektronenspins mit einer räumlichen Auflösung von 20 nm.

Im Experiment konnten die IBM-Forscher eine Spin-Relaxationszeit von 760 ms messen. Diese relativ lange Relaxationszeit lässt auch hoffen, dass es möglich werden könnte, Spins zu präparieren, anschließend quantenmechanische Operationen durchzuführen und dann wieder auszulesen. Im Moment scheint dies allerdings noch in weiter Ferne zu liegen, wenn man bedenkt, dass Rugar et al. Mittelungszeiten von 13 Stunden pro Punkt benötigten.

Dennoch erscheinen die Verbesserungsmöglichkeiten noch lange nicht ausgeschöpft. So könnten sich

nicht nur die magnetischen Feldgradienten erhöhen lassen, sondern auch die Sensitivität der mechanischen Sensoren, etwa durch thermische Behandlung.

Ein weiteres Ziel der MRFM ist der Nachweis eines einzelnen Kernspins. Hierzu ist es aber nötig, die Sensitivität um einen Faktor 1000 zu steigern, was angesichts der bereits erreichten Verbesserung um sieben Größenordnungen nicht unmöglich erscheint. Die Verwendung von Kernspins würde es erlauben, biologische Moleküle mit atomarer Auflösung abzubilden und ihre chemische Zusammensetzung zu bestimmen. Damit hätte man dann gewissermaßen ein chemisches Rasterkraftmikroskop realisiert.

ERNST MEYER UND SIMON RAST

- [1] D. Rugar, R. Budakian, H. J. Mannin und B. W. Chui, *Nature* **430**, 329 (2004)
- [2] J. A. Sidles, *Appl. Phys. Lett.* **58**, 2854 (1991)
- [3] D. Rugar, C. S. Yannoni und J. A. Sidles, *Nature* **360**, 563 (1992)
- [4] T. D. Stowe et al., *Appl. Phys. Lett.* **71**, 288 (1997)
- [5] K. J. Bruland et al., *Appl. Phys. Lett.* **73**, 3159 (1998)

Prof. Dr. Ernst Meyer und Dr. Simon Rast, Institut für Physik, Universität Basel, Klingelbergstr. 82, CH-4056 Basel