

Künstlerische Darstellung der Elektronenspinresonanz an einzelnen Spins auf Oberflächen. Der Spin wird mittels einer Radiofrequenzspannung – angelegt an die Spitze eines Rastertunnelmikroskops – gedreht und über die Tunnelstromelektronen ausgelesen.

OBERFLÄCHENPHYSIK

In Resonanz – Atom für Atom

Die Einzelatom-Elektronenspinresonanz erlaubt es, Atome und Moleküle mit sehr hoher Auflösung zu charakterisieren.

Philip Willke und Andreas Heinrich

Die Spinresonanz kommt in Kernspintomografen und in Analysegeräten in der Physik, Chemie und Biologie, sowohl in Forschung als auch Industrie zum Einsatz. Eine neue Methode erlaubt Elektronenspinresonanz an einzelnen Atomen und Molekülen in einem Rastertunnelmikroskop und liefert Einblicke in die Wechselwirkungen zwischen Atomen, in die Dynamik ihrer magnetischen Zustände und in die Eigenschaften einzelner Kernspins. Dieser neue Zugang zu atomaren Quantenzuständen könnte auch für die Quanteninformationsverarbeitung interessant sein.

Der Eigendrehimpuls oder auch Spin von fundamentalen Teilchen wie Elektronen ist ein Standardbeispiel für ein quantenmechanisches Zwei-Niveau-System und bildet die Basis für magnetische

Phänomene. Auch sind Einzelelektronenspins in verschiedenen Quantenarchitekturen die Basis für Quantenbits für Quantencomputer und andere Quanteninformationsexperimente. Wenn Spins auf der Nanoskala genügend isoliert sind, können sie ihre quantenkohärenten Eigenschaften relativ lange beibehalten. Jedoch ist es dann oft ziemlich schwierig, ihre Zustände zu messen und kohärent zu steuern.

In diesem Artikel stellen wir eine neuartige Methode vor, mit der sich einzelne Spins auf atomarer Skala messen und steuern lassen. Diese basiert auf dem Rastertunnelmikroskop (Scanning Tunneling Microscope, STM), das seit fast vier Jahrzehnten Einblicke in die Nanowelt erlaubt. Für die erste Realisierung erhielten Gerd Binnig und Heinrich Rohrer 1986 den Physik-Nobelpreis. Salopp gesagt funktioniert die Rastertunnelmikroskopie wie das Lesen von

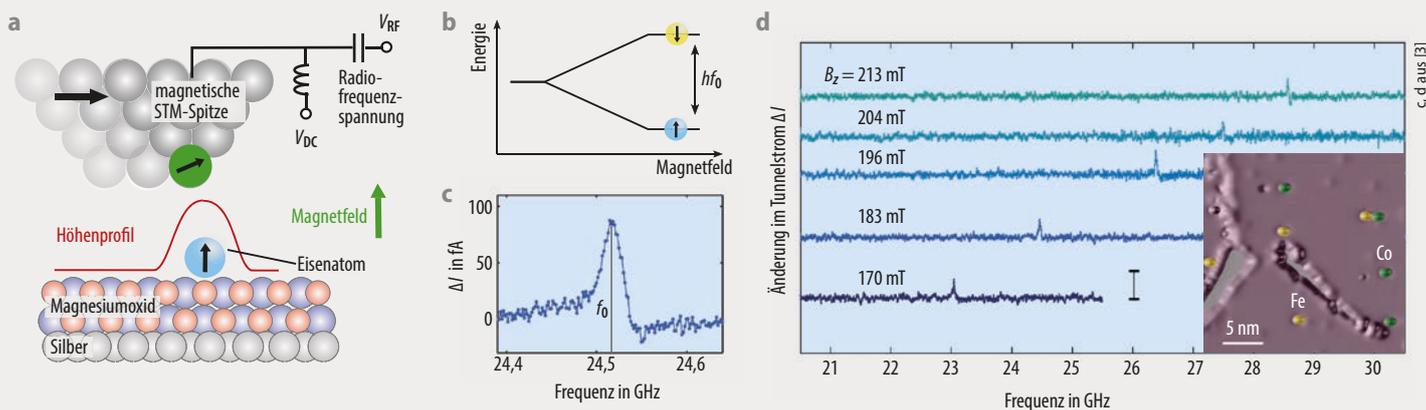


Abb. 1 Die Spitze des Rastertunnelmikroskops dient dazu, Atome auf einer Oberfläche sichtbar zu machen (a). Das magnetische Feld spaltet die Spinzustände durch Zeeman-Wechselwirkung auf (b). Durch die magnetische Spitze lassen sich die Spinzustände der Atome auslesen und mittels einer Radiofrequenzspannung V_{RF} durch Spinresonanz anregen (c). Hierbei wird die Frequenz durchgeföhren und die Änderung des Tunnelstroms gemessen. Dieser ändert sich, wenn der Spin durch Resonanz verändert wird. Die Resonanz ist durch die Zeeman-Aufspaltung sehr sensitiv auf das externe magnetische Feld und ändert sich linear (d). Das Inset zeigt eine STM-Aufnahme einzelner Eisen- (gelb) und Kobaltatome (grün) auf einer Magnesiumoxid-Oberfläche.

Blindenschrift. Allerdings „rastert“ statt des Fingers eine sehr feine Metallspitze über eine Oberfläche (**Abb. 1**). Mit Hilfe von Piezomaterialien ist dies so präzise möglich, dass Bilder mit atomarer Auflösung entstehen. Das eigentliche Messsignal ist hier der quantenmechanische Tunnelstrom. Dieser tritt auf, wenn zwischen Probe und Spitze eine elektrische Spannung anliegt und die Spitze durch Adjustieren des Abstandes sehr nah – auf Größenordnungen von einem Nanometer – an die Probe gelangt. Dann können Elektronen von der einen zur anderen Seite tunneln. Durch Regelung des Tunnelstroms auf einen konstanten Wert lässt sich ein Höhenprofil der Oberfläche erzeugen. Dies macht einzelne Objekte wie Atome sichtbar (**Abb.** auf Seite 39). Damit erlaubte das STM – zusammen mit dem Rasterkraftmikroskop [1] – neue Einblicke in die Welt der kleinsten Materiebausteine, was in Bereichen wie der Festkörperphysik, der Physikalischen Chemie oder auch der Biologie Anwendung fand. Zudem kann die Spitze die Atome auf der Oberfläche präzise „herumschieben“ (Atommanipulation) [2].

In diesem Artikel wollen wir uns insbesondere auf den Spin von Atomen und Molekülen konzentrieren. Um deren magnetische Eigenschaften zu erforschen, kommen oft magnetische Spitzen zum Einsatz, bei denen der Tunnelstrom spinpolarisiert ist. Ein generelles Problem spektroskopischer STM-Messungen besteht darin, dass die gemessenen Zustände thermisch verschmiert sind, da die Energie der thermisch angeregten Elektronen statistisch variiert (Fermi-Dirac-Statistik). Um die Energie-Auflösung zu verbessern, finden die STM-Experimente daher oft bei tiefen Temperaturen nahe des absoluten Nullpunkts statt. Dies erlaubt es, Energie-Zustände bis hinunter zu mehreren hundert Mikroelektronenvolt aufzulösen. Aber selbst das reicht häufig nicht aus, um schwache magnetische Wechselwirkungen im Bereich von Nanoelektronenvolt zu vermessen.

Hier helfen Spinresonanz-Techniken wie Kernspin- oder Elektronenspinresonanz (ESR), welche die thermische Ver-

breiterung durch Resonanz „austricksen“. Dazu wird eine elektromagnetische Welle mit exakt der Frequenz f_0 passend zum Übergang eines magnetischen Zwei-Niveau-Systems eingebracht. Für einen einzelnen Elektronenspin in einem magnetischen Feld B bedeutet dies

$$hf_0 = g\mu_B B. \quad (1)$$

Hierbei sind h das Plancksche Wirkungsquantum, μ_B das Bohrsche Magneton und g der gyromagnetische Faktor. Für ein freies Elektron gilt $g \approx 2$. Die linke Seite beschreibt die Energie einer Mikrowelle mit Frequenz f_0 , die rechte Seite die magnetische Zeeman-Aufspaltung – beides muss zueinander passen. Die Resonanz ermöglicht energetisch hochauflösende Messungen selbst bei Raumtemperatur. Auf diesem Prinzip beruhen Magnetresonanztomografen, die in vielen Krankenhäusern zum Einsatz kommen. Allerdings ist es bei konventionellen Resonanzmethoden notwendig, über sehr viele Spins ($\sim 10^{14}$ und mehr) zu mitteln, um ein ausreichend großes Signal zu bekommen.

Eine ungewöhnliche Hochzeit

Vor einigen Jahren gelang es erstmals, die Rastertunnelmikroskopie mit der Elektronenspinresonanz zu vereinen [3] (**Abb. 1**). Entscheidend hierfür war das Einkoppeln von Radiofrequenzen in ein Rastertunnelmikroskop [4] und die Nutzung anderer STM-Techniken, um die magnetischen Eigenschaften der atomaren Spins vorzucharakterisieren [5]. Das Rastertunnelmikroskop mit seiner hohen Ortsauflösung erlaubte es, einzelne Atome zu adressieren und das Messsignal genügend zu verstärken für die Elektronenspinresonanz an einem einzelnen magnetischen Atom auf einer Oberfläche. Hierbei wird eine magnetische STM-Spitze über ein Atom bewegt und zusätzlich zur DC-Tunnelspannung eine Radiofrequenz-Spannung angelegt, um den Spinzustand des Atoms anzuregen. Dieses befindet

sich in der Regel auf einer dünnen isolierenden Schicht aus Magnesiumoxid (MgO) auf einem Silbersubstrat. Für die Anregung wird die Frequenz der RF-Spannung durchgefahren. Wenn diese mit der Resonanzfrequenz der beiden niedrigsten Spinzustände des Atoms übereinstimmt, ändert sich die Spinpopulation der Zustände. Diese lässt sich direkt durch eine Änderung des spinpolarisierten Tunnelstroms auslesen, da die Größe des Widerstands der Tunnelbarriere von der Spinrichtung des Atoms abhängt. Dieser Tunnelmagnetwiderstand findet sich in ähnlicher Form auch bei planaren Tunnelbarrieren, beispielsweise zum Auslesen der klassischen Bits in einer Festplatte.

Der Aufwand lohnt sich: Denn die Energieauflösung ist bei der Einzelatom-Elektronenspinresonanz nicht mehr durch die Temperatur, sondern nur durch die Linienbreite der Resonanz begrenzt. Das führt zu einer Energieauflösung von etwa 10 neV – statt 300 µeV bei Temperaturen um 1 Kelvin. Dies bedeutet eine Verbesserung um einen Faktor von fast einer Million!

Nimm Zwei: Magnetische Wechselwirkung

Eine direkte Anwendung dieser neuen Methode ist es, einzelne Atome als Magnetfeldsensoren zu benutzen. Denn so wie sich die Resonanzfrequenz durch das makroskopische Magnetfeld verändert, verschiebt sie sich auch durch je-

des lokale Magnetfeld in der Umgebung eines Atoms. In einem einfachen Beispiel befinden sich zwei Atome nahe beieinander (**Abb. 2**) [6]. Ein am ersten Atom (Sensoratom) aufgenommenes ESR-Spektrum besitzt zwei Resonanzen, die durch magnetische Kopplung mit dem Nachbaratom entstehen, abhängig von dessen Spinzustand. Da thermische Anregungen die Resonanzen verursachen, ist neben dem magnetischen Grundzustand (Spin up) auch der erste angeregte Zustand (Spin down) des Nachbaratoms besetzt. Die Aufspaltung der ESR-Signale am Sensoratom entsteht durch magnetische Dipolkopplung. Abstandsabhängige Messungen zwischen Atomen zeigen in der Tat ein r^{-3} -Potenzgesetz der Signalaufspaltung, das für die magnetische Dipol-Dipol-Wechselwirkung charakteristisch ist. Mehr noch: Durch Fits der abstandsabhängigen Frequenzaufspaltung $\Delta f(r)$ lässt sich das magnetische Moment des Nachbaratoms mit einer hohen Genauigkeit von rund einem Prozent bestimmen.

Auf diese Weise gelang es, die magnetischen Momente verschiedener Atome wie Kobalt und Eisen „remote“, also aus einer Entfernung von ein bis zwei Nanometern, zu bestimmen. Beträgt der Abstand zwischen zwei Spins jedoch weniger als ein Nanometer, treten Abweichungen vom perfekten r^{-3} -Verhalten auf. Diese gehen auf einen zusätzlichen Beitrag der Austauschwechselwirkung zurück, die vom Überlapp der atomaren Wellenfunktionen her-

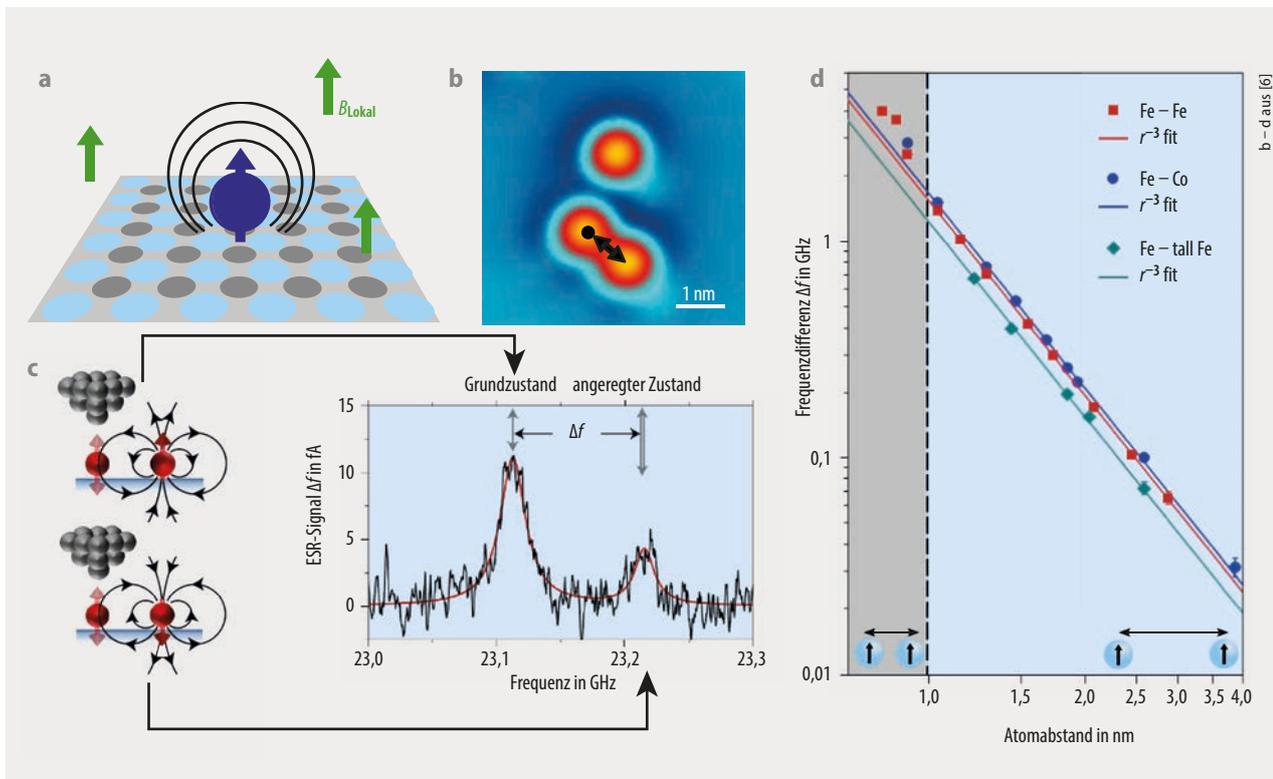


Abb. 2 Neben dem makroskopischen Magnetfeld beeinflussen auch lokale Beiträge zum Magnetfeld die Resonanzfrequenz eines atomaren Spins (a). Ein Beispiel können benachbarte Atome sein, wie die drei gezeigten Eisenatome (b). Abhängig von der Spin-Orientierung des benachbarten Atoms (Grund- oder angeregter Zustand) verschiebt sich die Resonanz zu niedrigeren oder höheren Frequenzen, wobei der Grundzustand bei niedrigeren Temperaturen stärker besetzt ist (c). Die Aufspaltung Δf der beiden Resonanzen ist ein Maß für die Stärke des magnetischen Feldes des Nachbaratoms. Dieses nimmt für kleine Abstände zu und folgt dem Gesetz der magnetischen Dipol-Dipol-Kopplung (d). Unterschiedlich starker Magnetismus der Nachbaratome führt zu verschiedenen Vorfaktoren (gegeben durch unterschiedliche γ -Werte im gezeigten Log-Log-Plot). Hierdurch kann deren magnetisches Moment abgeleitet werden.

rührt und ein komplexes Wechselspiel zwischen Coulomb-Wechselwirkung und Pauli-Prinzip ist. Die Fähigkeit der Einzelatom-Elektronenspinresonanz, das magnetische Moment nahegelegener Spinzentren mit hoher Genauigkeit zu erfassen, befindet sich noch in den Kinderschuhen. Langfristig könnte es hiermit jedoch möglich sein, die Spinverteilung in Nanostrukturen und komplexen Molekülen abzubilden.

Anwendungen im Spitzenfeld

Neben der magnetischen Kopplung von Atomen auf Oberflächen erlaubt es die Einzelatom-Elektronenspinresonanz, die magnetische Wechselwirkung mit der magnetischen Spitze zu vermessen [7]. Da sich magnetische Atome auch am Ende der Spitze (Spitzenapex, **Abb. 3a**) befinden, zeigt diese eine ähnliche Kopplung mit Atomen auf der Oberfläche wie die Oberflächenatome untereinander. Jedoch kann sich die Spitze kontinuierlich bewegen (auch im Abstand zur Oberfläche) – im Gegensatz zu den Atomen auf der Oberfläche, die auf diskreten Gitterplätzen sitzen. Oft lässt sich die Spitze daher als ein zusätzliches magnetisches Feld $B_{\text{tip}}(x, y, z)$ beschreiben, dessen Stärke über seine Position und seinen Abstand zum Atom auf der Oberfläche justierbar ist. In diesem Fall ist der Modus Operandi auf interessante Art und Weise veränderbar: Fixiert man zum Beispiel die Frequenz f und rastert mit der Spitze die Oberfläche ab, gerät der Elektronenspin durch das richtige „Spitzenfeld“ in Resonanz (**Abb. 3**). Das Spitzenfeld ist durch unterschiedliche Positionen der Spitze einstellbar, was den Abstand zum Spin auf der Oberfläche und das wirkende Magnetfeld ändert. Dies funktioniert, weil es nach Gleichung (1) egal ist, ob man die Frequenz f durchfährt oder das Magnetfeld.

In der Tat wird in konventionellen ESR-Experimenten öfter das (globale) Magnetfeld und nicht die Frequenz verändert.

Durch Rastern des lokalen Spitzenfeldes entstehen Bilder, welche die Wechselwirkung zwischen dem Spin auf der Oberfläche und dem Spincluster (bestehend aus Eisenatomen) an der Spitze kartografieren. Dies kann in bis zu drei Dimensionen geschehen, und zwar energetisch aufgelöst (**Abb. 3c**). Diese Art der Magnetresonanztomografie ist konzeptionell die gleiche wie die Kernspintomografie in der Medizintechnik. Jedoch werden hier nicht Milliarden von Wasserstoff-Kernspins angeregt wie bei MRT-Aufnahmen unseres Körpers, sondern es wird lediglich ein Spinsystem auf der Oberfläche in Resonanz gebracht und die magnetische Wechselwirkung mit einem zweiten an der Spitze abgebildet.

Neben der räumlichen Abbildung der magnetischen Kopplung bietet ein auf der Nanoskala wirkendes Magnetfeld wie das der Spitze weitere Vorteile. Zum Beispiel lässt sich Spinresonanz auch in Rastertunnelmikroskopen ohne starke, in der Regel supraleitende, Elektromagnete betreiben [7]. Zudem erlaubt es das Spitzenfeld, intrinsische magnetische Phänomene und Eigenschaften in Abwesenheit eines externen Magnetfelds zu untersuchen. Außerdem ist es sehr wichtig für die Resonanz. Dafür ist – auch in konventioneller Spinresonanz – eine zeitlich modulierte Magnetfeld-Komponente nötig [8]. Einfache Abschätzungen zeigen, dass die Beiträge des Spitzenfeldes stärker sind als eine direkte Anregung durch magnetische Dipolstrahlung. Das liegt daran, dass der Einfluss des Spitzenfeldes durch den geringen Abstand sehr groß werden kann: bis zu Äquivalenten von 10 Tesla [9], was um ein Vielfaches stärker ist als in einem gewöhnlichen Krankenhaus-MRT.

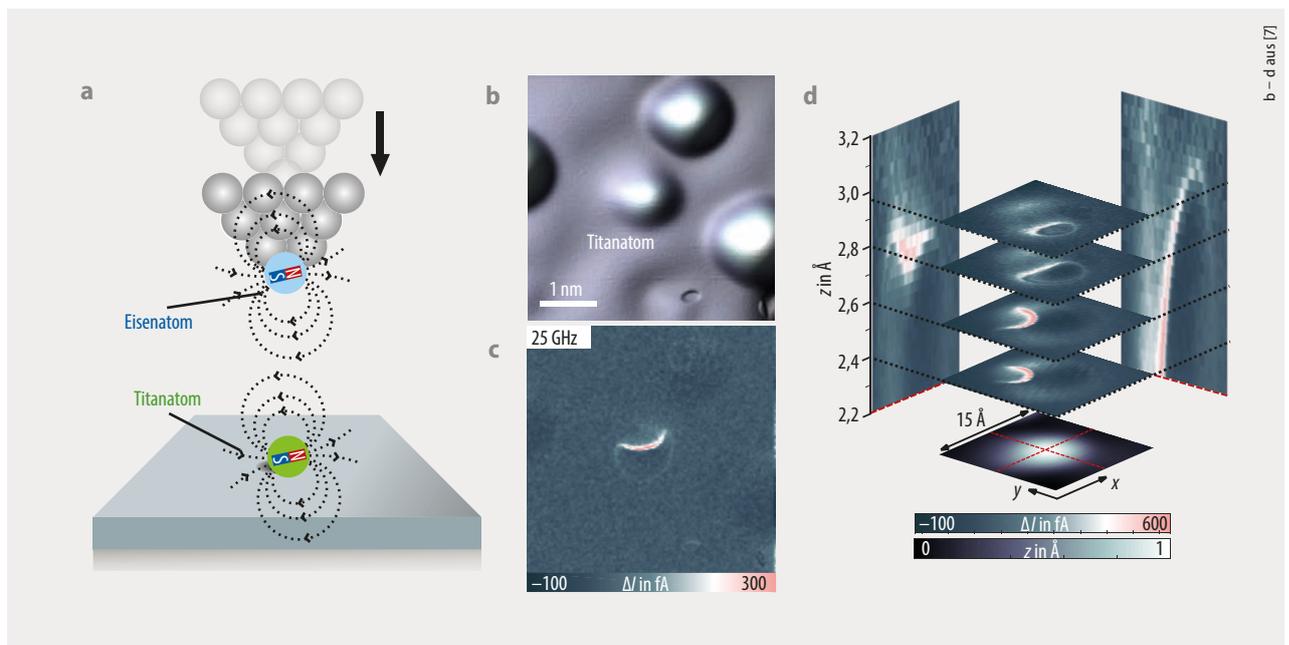


Abb. 3 Die Magnetresonanz-Tomografie an einzelnen Atomen beruht darauf, dass auch die STM-Spitze ein magnetisches Feld generiert (a). Dies erlaubt es durch Scannen über die Oberfläche bei konstanter Frequenz f , Resonanzen an bestimmten Positionen zu detektieren, wie hier für das zentrale Titanatom (b, c). Diese Änderung lässt sich in drei Dimensionen ausdehnen, um die Wechselwirkung beider Spins zu kartografieren (d). Aus den Daten leitet sich die magnetische Dipol-Dipol-Kopplung zwischen beiden Spinzentren auf der Nanometerskala ab.

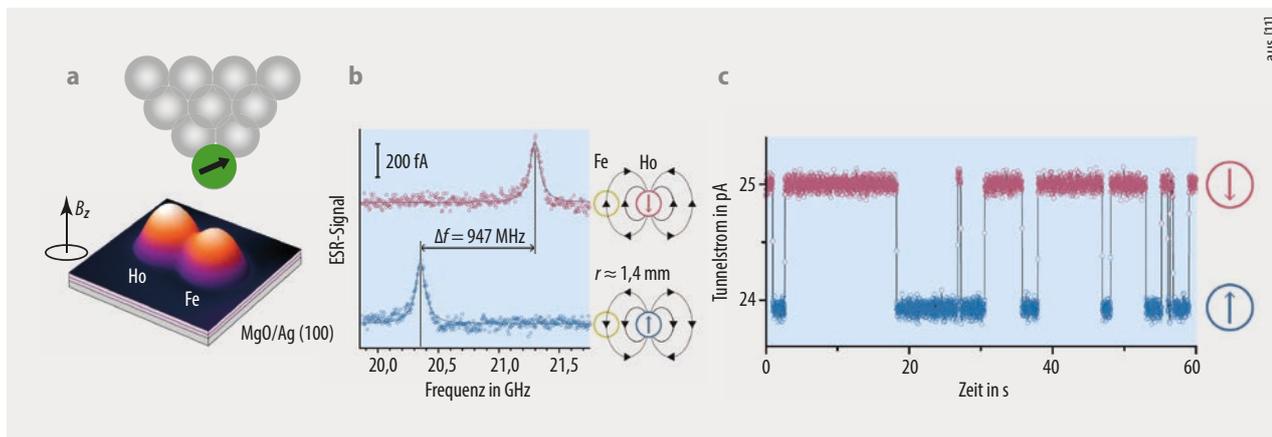


Abb. 4 Bei der Vermessung einzelner stabiler Magnete auf Basis seltener Erden wird zunächst ein Holmiumatom neben ein Eisenatom platziert, das als ESR-Sensoratom dient (a). Das zugehörige ESR-Spektrum des Eisenatoms zeigt lediglich eine Resonanz, da der Holmiummagnet über sehr lange Zeit stabil bleibt (b). Die Resonanz kann sich jedoch durch ein aktives Schalten des Holmiummagneten verschieben, was dessen Orientierung umpolt. Das Schalten geschieht durch hochenergetische Tunnelelektronen (c). Mittels einer spinpolarisierten Spitze lässt sich im Strom zwischen den zwei Zuständen des Holmiumatoms unterscheiden.

Der kleinste Permanentmagnet der Welt

Eine weitere Anwendung war die Charakterisierung von langzeitstabilen Einzelatom-Magneten in Holmium. Dieses Element gehört zur Klasse der seltenen Erden, die oft für Permanentmagneten zum Einsatz kommen. Erste Ergebnisse aus Synchrotron-Messungen zeigten, dass Holmiumatome auf einer MgO-Oberfläche einen langlebigen magnetischen Zustand besitzen [10]. Jedoch haben erst Einzelatom-ESR-Messungen klar belegt, dass die zwei magnetischen Zustände von Holmium über Stunden und sogar Tage stabil bleiben können. Hierfür wurde ein Holmiumatom neben ein Eisen-Sensoratom platziert. Mittels Einzelatom-Elektronenspinresonanz und der magnetischen Dipolkopplung ließ sich identifizieren, in welchem Zustand sich das benachbarte Holmiumatom befindet – Spin up oder Spin down (**Abb. 4a, b**). Hierbei war lediglich eine Resonanz zu sehen, was indirekt auf die Stabilität der Holmiumatome hindeutet, da diese nicht so schnell wie andere Atome ihren Zustand ändern, sondern viel langsamer als die Dauer einer Messung.

Diese Stabilität ist keinesfalls trivial, denn sowohl thermische Anregungen als auch Quanteneffekte verhindern oft die Stabilität eines einzelnen magnetischen Zustands und verkürzen seine Lebenszeit drastisch. Dennoch lassen sich Holmiumatome kontrolliert schalten. Hierfür wurden die Spinzustände mithilfe von Tunnelstrom-Elektronen geflippt und über den Tunnelmagnetwiderstand ausgelesen (**Abb. 4c**) [11]. Das Schalten der Holmiumzustände erfolgt durch kurzzeitiges Erhöhen der Tunnelspannung, damit die Tunnelelektronen genügend Energie erhalten, um den Holmiumspin zu verändern. Die Stabilität der Holmiumatome rührt vor allem von der Symmetrie der Oberfläche her, dem Kristallfeld. Dieses verschiebt einige Zustände der *f*-Elektronen zu höheren Energien, da diese mit den Ladungen des MgO überlappen.

Somit besteht der kleinste stabile Magnet tatsächlich aus lediglich einem magnetischen Atom. Diese atomaren Bits beeinflussen sich selbst bei einem Abstand von nur einem

Nanometer nicht. Weiterführende Messungen zeigten kürzlich, dass auch Dysprosiumatome, die im Periodensystem neben Holmium liegen, über lange Zeiten stabil bleiben [12]. Sie sind sogar magnetisch noch stabiler als Holmium und blieben auch ohne externes magnetisches Feld stabil. Um dies nachzuweisen, kam erstmals die Spitzenfeld-Elektronenspinresonanz zum Einsatz.

Ab in den Kern

Die hohe Energieauflösung der Spinresonanz erlaubt es auch, den Kernspin zu detektieren, da dieser mit dem Elektronenspin seines Wirtsatoms magnetisch koppelt. Diese

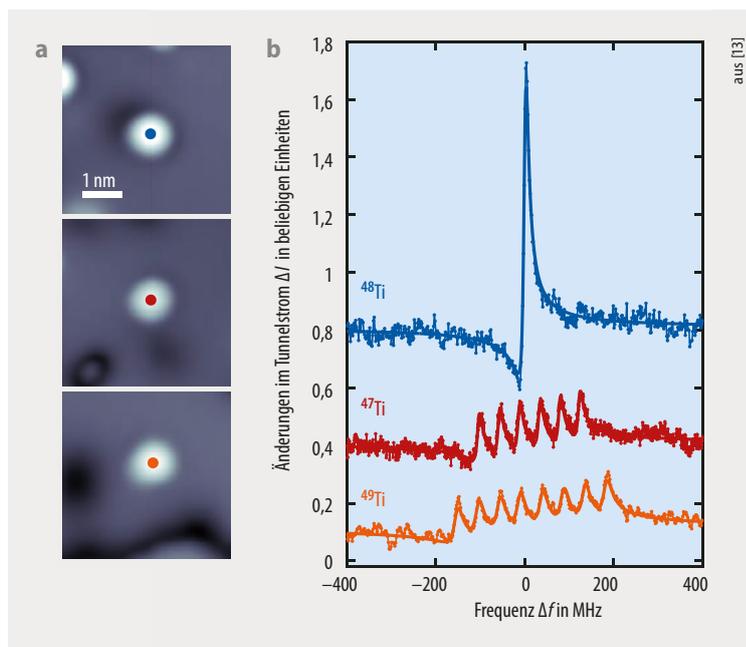


Abb. 5 Die verschiedenen Titanatome sehen auf den ersten Blick gleich aus (a), besitzen aber gänzlich unterschiedliche ESR-Spektren (b). Dies geht auf unterschiedliche Isotope des Titans zurück, wovon einige ein magnetisches Kernmoment besitzen. Durch die Hyperfeinkopplung spalten die Resonanzen weiter auf.

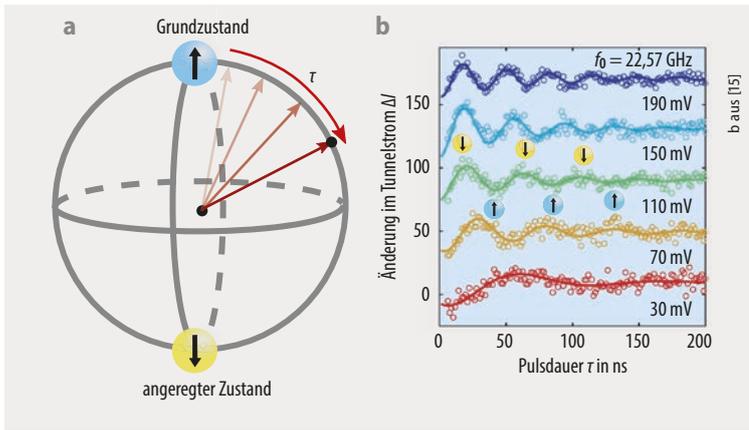


Abb. 6 Die kohärente Manipulation einzelner atomarer Spins geschieht mittels gepulster Elektronenspinresonanz. Hierbei wird das Radiofrequenzsignal gepulst angeregt. Während dieser Zeitspanne wird der Spin kohärent vom Grund- in den angeregten Zustand gedreht (a). Im Experiment treten Rabi-Oszillationen auf (b), also die Änderung des Stroms für unterschiedlich lange Pulse. Dadurch wird das System in unterschiedlichen Superpositionen zwischen 0 und 1 detektiert. Für wachsende RF-Spannungsamplituden erfolgt diese Rotation schneller.

historisch als Hyperfeinaufspaltung bezeichnete Kopplung wurde bereits vor über hundert Jahren in atomaren Spektrallinien beobachtet. Hier war sie deutlich feiner (hyperfein) als die Feinstrukturaufspaltung. Die Hyperfeinwechselwirkung kann ähnlich stark sein wie die bisher diskutierten Beiträge (etwa 10 bis 10^3 MHz). Allerdings ist durch diese Wechselwirkung nicht mehr jedes Atom gleich, sondern verschiedene Isotope zeigen unterschiedliche ESR-Spektren, beispielsweise im Fall von Titan (**Abb. 5**) [13]. Hier kommen in der Natur fünf stabile Isotope vor – mit den Massenzahlen 46 bis 50. Lediglich Titan-47 und -49 tragen einen Kernspin ($I = 5/2$ bzw. $7/2$), die anderen drei nicht ($I = 0$). Da die magnetische Quantenzahl Werte von $m_I = -I$ bis $m_I = +I$ in ganzzahligen Schritten annehmen kann, ergeben sich jeweils sechs und acht mögliche Kernspin-Orientierungen für Titan-47 und -49, für Titan-48 nur eine.

Wie bei einem externen Magnetfeld oder dem Dipolfeld benachbarter Atome ähnelt der Einfluss des Kernspins einem zusätzlichen Kernfeld B_{Kern} , das die rechte Seite von Gleichung (1) zu $g\mu_B(B + B_{\text{Kern}}) = g\mu_B B + A \cdot m_I$ erweitert. Die Größe der beobachteten Hyperfeinaufspaltung A erlaubt Rückschlüsse auf die elektronischen und magnetischen Eigenschaften des Atoms und hängt auch von der Spinpolarisation um den Kern ab und davon, welches elektronische Orbital den Grundzustand bildet. Der Kernspin ist quasi ein Spion im Atom, der viel über seinen Wirt verraten kann.

Ferner lässt sich der Kernspin nicht nur auslesen, sondern auch gezielt über den Tunnelstrom beeinflussen [14]. Dieser Prozess ähnelt dem Schalten der Holmium-Elektronenspins, bei dem ein Tunnelelektron mit dem Elektronenspin auf der Oberfläche die Spinorientierung tauscht. Dies erhöht oder erniedrigt die Verteilung der Kernspinzustände im Vergleich zum thermischen Gleichgewicht. Der Kern-

spin wird sozusagen in eine Richtung „gepumpt“, abhängig von der Richtung und Polarisierung der Tunnelelektronen. Somit erlaubt es die Rastertunnelmikroskopie, den Kernspin anzusteuern und zu kontrollieren.

Auf dem Weg zu atomaren Quantenbits

Die Spinresonanz eignet sich auch dazu, ein Zwei-Niveau-System kohärent zu verändern und beliebige Superpositionen zwischen zwei Spinzuständen herzustellen. Dies ist eine Grundvoraussetzung für die Quanteninformationsverarbeitung. Dass sich Superpositionszustände auch für einzelne magnetische Atome auf Oberflächen einstellen lassen, zeigten Experimente mit gepulster Elektronenspinresonanz. Dabei wird das Spinsystem für nur zehn bis ein paar hundert Nanosekunden mit dem Radiofrequenzpuls angeregt – anstatt kontinuierlich (**Abb. 6a**). Dadurch rotiert der Spin kohärent zwischen dem Grund- und angeregten Zustand. Diese Rotationen werden oft auf der Bloch-Kugel dargestellt, welche die Amplituden der Zustände und ihre relative Phase kodiert (**Abb. 6b**). Als Resultat treten Rabi-Oszillationen zwischen den beiden Zuständen auf [15]. Deren Periodizität hängt von der Stärke der Anregung ab (Rabi-Rate), die in diesen Experimenten durch die Stärke der Radiofrequenz-Spannung einstellbar ist. Jedoch klingen die Oszillationen aufgrund der Wechselwirkung mit der Umgebung – der gefürchteten Dekohärenz – nach rund 100 Nanosekunden ab. Denn bei jeder Kopplung mit der Außenwelt bekommt der Spinzustand auf der Bloch-Kugel einen „Schubs“, also einen Phasenschub, der den Zustand unkontrolliert beeinflusst. Dadurch klingt die Kurve, gemittelt über viele Messungen, ab.

Dekohärenz bewirkt aber auch, dass Schrödingers Katze doch nicht zugleich lebendig und tot ist. Für die atomaren Spins auf Oberflächen stellt die Wechselwirkung mit Elektronen in der Umgebung der atomaren Spins den dominanten Dekohärenzprozess dar [15]. Dies betrifft insbesondere die Tunnelstrom-Elektronen. Daher gilt es, deren Einfluss zu reduzieren.

Ein isoliertes atomares Quantenbit nützt natürlich wenig. Daher ist ein logischer nächster Schritt die Kopplung benachbarter Quantenspins. Diese Verschränkung ist ein weiterer Grundbaustein in der Quanteninformationsverarbeitung und bewirkt, dass zwei Spins nicht mehr unabhängig voneinander zu betrachten sind. Für Spins auf Oberflächen sind erste Schritte in diese Richtung bereits erfolgt. So gelang es, kohärente Oszillationen zwischen zwei Titanatomen zu realisieren [16] und selektiv unterschiedliche Übergänge in diesen Dimeren anzuregen [15].

Quo vadis?

Ein Quantencomputer basierend auf magnetischen Atomen auf Oberflächen wird wohl noch etwas auf sich warten lassen. Dennoch bleibt die Einzelatom-Elektronenspinresonanz als neue Quantenarchitektur spannend, beispielsweise für die Quantensensorik. Die Experimente, in denen einzelne Atome als Magnetfeldsensoren dienen, zeigen das Potenzial, auf der atomaren Skala magnetische Felder

und andere Phänomene zu vermessen. Dies ließe sich in Zukunft mit den Methoden zur kohärenten Manipulation erweitern, um beispielsweise die Energieauflösung zu erhöhen. Darüber hinaus wurde kürzlich die Elektronenspinresonanz an einzelnen Molekülen gezeigt [17], was die Methode auch für komplexere Spinsysteme und chemische Prozesse interessant macht.

So eröffnet die Kombination aus hoher räumlicher, zeitlicher und Energieauflösung von Einzelatom-Elektronenspinresonanz – kombiniert mit atomarer Kontrolle – einen vielversprechenden Pfad, um grundlegende Quantenphänomene auf der Nanometerskala zu erforschen.

Literatur

[1] L. Gross und J. Repp, Physik Journal, Mai 2020, S. 35
 [2] D. M. Eigler und E. K. Schweizer, Nature **344**, 524 (1990)
 [3] S. Baumann et al., Science **350**, 417 (2015)
 [4] W. Paul et al., Rev. Sci. Instr. **87**, 074703 (2016)
 [5] A. Heinrich et al. Science **306**, 466 (2004)
 [6] T. Choi et al., Nat. Nano **12**, 420 (2017)
 [7] P. Willke et al., Nat. Phys. **15**, 1005 (2019)
 [8] T. Seifert et al., Sci. Adv. **6**, eabc5511 (2020)
 [9] K. Yang et al., Phys. Rev. Lett. **122**, 227203 (2019)
 [10] F. Donati et al., Science **352**, 318 (2016)
 [11] F. Natterer et al., Nature **543**, 226 (2017)
 [12] A. Singha et al., ResearchSquare 10.21203/rs.3.rs-144019/v1 (2021)
 [13] P. Willke et al., Science **362**, 336 (2018)
 [14] K. Yang et al., Nat. Nano **13**, 1120 (2018)
 [15] K. Yang et al., Science **366**, 509 (2019)
 [16] L. Veldman et al., arXiv:2101.10765 (2021)
 [17] X. Zhang et al., ResearchSquare 10.21203/rs.3.rs-134144/v1 (2021)

Die Autoren



Philip Willke (FV Oberflächenphysik) studierte Physik an der Universität Göttingen, wo er 2017 promovierte. Nach Postdokoraten am IBM Forschungslabor (San Jose, Kalifornien) und dem Center for Quantum Nanoscience in Seoul, Südkorea, wechselte er 2020 ans Karlsruher Institut für Technologie. Hier leitet er eine Emmy Noether-

Nachwuchsgruppe für quantenkohärente Kontrolle von Spins auf Oberflächen.

Andreas Heinrich (FV Oberflächenphysik) promovierte an der Universität Göttingen. Von 2005 bis 2016 war er Arbeitsgruppenleiter am IBM Forschungslabor in San Jose, Kalifornien. Seitdem ist er Professor an der Ewha Womans University in Seoul, Südkorea. Seit 2017 leitet er dort als Direktor das Center for Quantum Nanoscience.



Dr. Philip Willke, Karlsruher Institut für Technologie, Wolfgang-Gaede-Str. 1, 76131 Karlsruhe und **Prof. Dr. Andreas Heinrich**, Center for Quantum Nanoscience, 52 Ewhayeodae-gil, Daehyeon-dong, Seodaemun-gu, 03760 Seoul, South Korea

Physik Journal

Newsletter

Sehr geehrter Herr Einstein,

für die erste [DPG-Herbsttagung](#) in Freiburg steht mittlerweile das Programm zur Verfügung. Auch in unser [Doppelpost August/September](#) können Sie schon jetzt online einen Blick werfen.

Eine spannende Lektüre wünscht Ihnen

Ihr Physik Journal Team

Physik Journal Nachrichten

Den Horizont erweitern

15.08.2019 - Mit zwei Online-Umfragen fordert die Europäische Kommission auf, Horizon Europe mitzugestalten.

Pionier der angewandten Mathematik

13.08.2019 - Zum 200. Geburtstag des britischen Mathematikers und Physikers George Gabriel Stokes

WEBINAR Fluid-Struktur-Interaktion simulieren | 19. September, 14:00 Uhr

- ▶ Online-Meldungen der Redaktion,
- ▶ Neuigkeiten aus der DPG, TV-Tipps und mehr finden Sie in unserem Newsletter.

Sie möchten ihn erhalten?

Hinterlegen Sie Ihre E-Mail-Adresse und bestellen Sie den Newsletter unter: www.dpg-physik.de/ueber-uns/mitgliedschaft/dpg-mitgliedschaft-aendern