

Abbildung von Spinstrukturen auf atomarer Ebene

Eine neue Mikroskopie-Methode löst Spinstrukturen auf Isolatoroberflächen auf



► Prof. Dr. Roland Wiesendanger, Geschäftsführender Direktor des Instituts für Angewandte Physik (IAP) und Interdisziplinäres Nanowissenschafts-Centrum Hamburg (INCH), Sprecher des DFG Sonderforschungsbereichs SFB 668

Ein fundamentales Verständnis von magnetischen und spinabhängigen Phänomenen erfordert die Bestimmung von Spinstrukturen und Spinanregungen auf atomarer Ebene. Die direkte Visualisierung von atomaren Spinstrukturen [1-4] wurde erstmalig für magnetische Metalle durch die Kombination von atomarem Auflösungsvermögen der Rastersondenmikroskopie (RTM) und Spinempfindlichkeit, basierend auf dem Vakuumtunneln von spinpolarisierten Elektronen [7], erreicht. Die resultierende Technik, die Spinpolarisierte Rastertunnelmikroskopie (SP-RTM), liefert heutzutage beispiellose Einblicke in kollineare und nicht-kollineare Spinstrukturen an Oberflächen von magnetischen Nanostrukturen und hat bereits zur Entdeckung neuer Arten von magnetischer Ordnung auf Nanoebene (Abb. 1 und [8]) geführt. Der Nachweis von spinabhängigen Austausch- und Korrelationskräften erlaubte erst vor kurzem eine erste direkte Beobachtung von Spinstrukturen an Oberflächen von antiferromagnetischen Isolatoren [9]. Diese neue Art von Rastertunnelmikroskopie, genannt Magnetische Austauschkraftmikroskopie (Magnetic Exchange Force Microscopy – MExFM), stellt ein leistungsfähiges neues Werkzeug dar, um unterschiedliche Arten von Spin-Spin-Wechselwirkungen, basierend auf dem Direkt-, Super-, oder RKKY-Austausch, atomar aufgelöst zu untersuchen.

Spinpolarisierte Rastertunnelmikroskopie (SP-RTM) und Spektroskopie

Die Technik der SP-RTM beruht auf dem Vakuumtunneln von spinpolarisierten Elektronen, wie es in Tunnelübergängen mit einer magnetischen Spitze und einer magnetischen Probe beobachtet werden kann. Der Tunnelstrom hängt in diesem Fall nicht nur vom Abstand Spitze – Oberfläche und der angelegten Vorspannung zwischen Spitze und Probe ab, sondern auch von der Spinpolarisation der Elektronenzustände in der Nähe des Fermi-Niveaus von beiden Elektroden sowie von der relativen Orientierung der lokalen Magnetisierung der Probe und des magnetischen Moments an der Spitze. Frühere Experimente basierend auf planaren Tunnelübergängen mit magnetischen Elektroden wurden von Jullière in der Mitte der 70er Jahre durchgeführt [10]. Die Erfindung der RTM durch G. Binnig und H. Rohrer [5] gestattete es, die schlecht-definierte Tunnelbarriere des planaren Tunnelübergangs durch eine gut-definierte Vakuumbarriere und eine der planaren Elektroden durch eine frei bewegliche und positionierbare Probenspitze zu ersetzen. Magnetische Spitzen wurden erstmalig in der Sondenmikroskopie eingesetzt, um räumlich aufgelöste Messungen von magnetischen Dipolkräf-

ten durchzuführen [11]. Die entsprechende Technik, die magnetische Kraftmikroskopie (Magnetic Force Microscopy – MFM) ist zu einer Routine-methode für die Bildgebung von magnetischen Domänen geworden [12]. Die räumliche Auflösung der MFM ist jedoch begrenzt auf 10-20 nm infolge der lang-reichweitigen Natur der magnetischen Dipolkräfte [6]. Um die räumliche Auflösung der magnet-sensitiven Rastermikroskopie bis auf die atomare Ebene auszudehnen, wurden am Ende der 80er Jahre zwei unterschiedliche Verfahren vorgeschlagen: Entweder den spinabhängigen Tunnelstrom zu messen, die starke exponentielle Abhängigkeit des Tunnelstroms vom Abstand Spitze – Oberfläche ausnutzend, um die atomare Auflösung mit der Spinauflösung zu kombinieren, oder den spinabhängigen Austausch und die Korrelationskräfte bei sehr kurzen Abständen zwischen magnetischer Probenspitze und einer magnetischen Probe basierend auf der Technik der Rasterkraftmikroskopie (AFM) zu messen [13].

Die erste erfolgreiche Beobachtung des Vakuumtunnelns von spinpolarisierten Elektronen in einem RTM Experiment wurde 1990 [7] mit einer hoch spinpolarisierten CrO₂ Dünnschicht-Probenspitze an einer antiferromagnetischen Cr(001) Probe

gemacht, um einen störenden Einfluss von überlagernden magnetischen Dipolwechselwirkungen auszuschließen. In diesen ersten SP-RTM Experimenten wurde die Konstantstrom-Betriebsart angewendet, wobei die spinpolarisierten Tunnelstrom-Effekte als deutliche Höhendifferenzen in den Konstantstrom-RTM-Konturen erschienen. Diese Betriebsart erwies sich als nützlich für SP-RTM Untersuchungen von Oberflächen-Spinkonfigurationen auf atomarer Ebene, wie durch die Auflösung der Spinstrukturen an Oberflächen von ferromagnetischen Oxiden [1], zwei-dimensionalen antiferromagnetischen Metallschichten (Abb. 2 und [2-4]) und antiferromagnetischen Nitriden gezeigt wurde. Für die Bildgebung von magnetischen Domänen im Nanobereich wurde gefunden, dass die spektroskopische Betriebsart der SP-RTM, eingeführt 1998 [15], besser im Vergleich zur Konstantstrom Betriebsart ist, besonders bezüglich einer klaren Separation zwischen topographischen, elektronischen und magnetischen Kontrasteffekten [16]. In der spektroskopischen Betriebsart der SP-RTM wird die spin-aufgelöste differentielle Tunnel-Leitfähigkeit dI/dU mit räumlicher Auflösung gemessen. Die Vorspannung, die zwischen magnetischer Spitze und der magnetischen Probe anliegt, wird derart gewählt, dass

das Tunneln in einen oder aus einem hoch spinpolarisierten elektronischen Zustand zu einer hohen Spinkontrast-Abbildung führt. Ein schönes Beispiel ist die Beobachtung der magnetischen Domänenstruktur von Seltenerdmetall-Filmen, wie Dy(0001) epitaktisch gewachsen auf W(110) Einkristallsubstraten (Abb. 3 und [17]).

Magnetische Austauschkraftmikroskopie

Obwohl die SP-RTM Methode einen noch nie da gewesenen Einblick in die atomaren Spinkonfigurationen an magnetischen Oberflächen liefert, ist deren Anwendung auf elektrisch leitende Proben, wie magnetische Metallfilme oder magnetische Halbleiter, begrenzt.

Um atomare Spinstrukturen an Oberflächen von Isolatoren aufzulösen und um die hochinteressante Möglichkeit zu erschließen, Spinordnungseffekte mit atomarer Auflösung bei Metall-Isolator-Übergängen zu untersuchen, haben wir die Technik der magnetischen Austauschkraftmikroskopie (Magnetic Exchange Force Microscopy – MExFM) entwickelt. Diese Technik beruht auf dem Nachweis von kurz-reichweitigen spinabhängigen Austausch- und Korrelationskräften bei sehr kleinen Spitze-Probe Abständen (einige Ångström) im Gegensatz zur MFM, mit der die magnetischen Dipolkräfte mit einer ferromagnetischen Sondenspitze bei einem typischen Spitze zu Oberflächen Abstand von 10–20 nm untersucht werden. Ein wichtiger Ausgangspunkt für das Erreichen des anspruchsvollen Ziels der Spinabbildung auf atomarer Ebene auf Oberflächen von Isolatoren ist die Entwicklung der Nicht-Kontakt Rasterkraftmikroskopie (Non-Contact Atomic Force Microscopy – NC-AFM) gewesen [18]. Die NC-AFM gestattet heutzutage atomar aufgelöste Untersuchungen an beliebigen Materialsystemen [19], selbst bei gekrümmten Oberflächen-

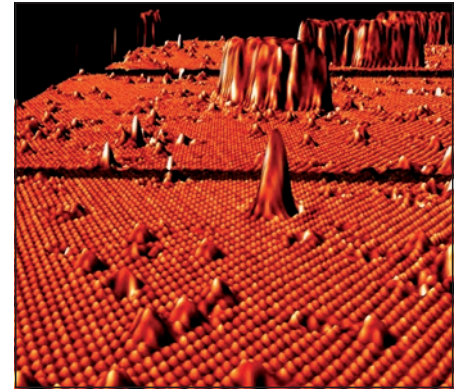


Abb. 1: Perspektivische Ansicht mehrerer atomar aufgelöster SP-RTM Abbildungen der antiferromagnetischen Monoschicht von Fe auf W(001). Die Abbildungen wurden zusammengesetzt, um die perfekte antiferromagnetische Spinanordnung über große Bereiche zu zeigen. Zu bemerken ist die geringe Signalstärke des periodischen Spingitters im Vergleich zum Signal von einzelnen adsorbierten Atomen oder atomaren Stufen.

topographien [20]. Die MExFM verknüpft die Möglichkeiten der NC-AFM und der Spinauflösung auf atomarer Ebene durch den Einsatz einer atomar scharfen Messspitze mit einem sehr gut definierten Spinzustand des vordersten Spitzenaoms. Gestützt auf die Kenntnisse, die bei der Entwicklung solcher Spitzen für die SP-RTM gewonnen wurden, waren wir kürzlich erfolgreich bei der Auflösung von Spinstrukturen des antiferromagnetischen Isolators NiO(001) [9]. Abbildung 4a zeigt ein topographisches NC-AFM Abbild auf atomarer Ebene, das den chemischen Kontrast zwischen den Sauerstoffatomen (helle Stellen) und den Nickelatomen (dunkle Stellen) deutlich macht. Dieser Kontrast rührt von einer unterschiedlichen Gesamtladungsdichte über den O- und Ni-Stellen her. Zwischen den magnetisch nicht-äquivalenten Ni-Stellen, d.h. Ni-Atome mit unterschiedlicher Orientierung ihrer magnetischen Momente, wird kein Kontrast beobachtet.

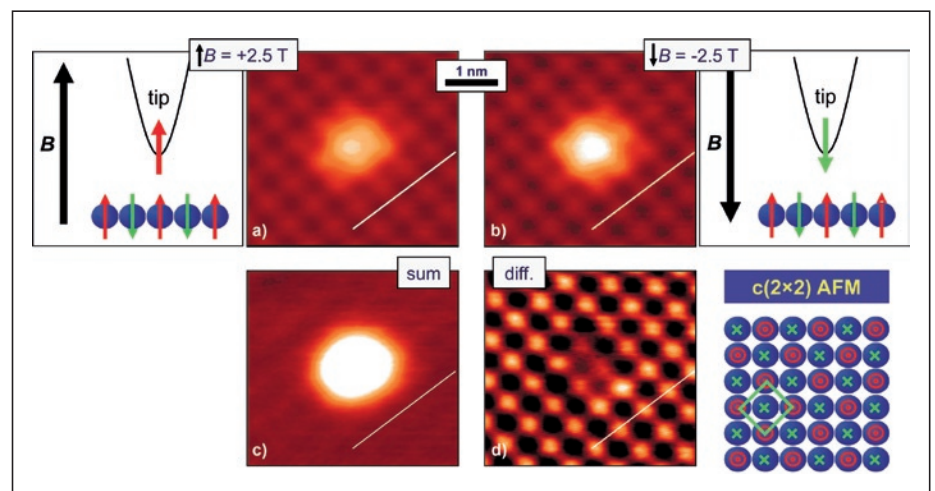


Abb. 2: SP-RTM Abbildungen atomarer Auflösung des kürzlich entdeckten antiferromagnetischen Zustandes einer Einzelatomschicht von Fe, epitaktisch gewachsen auf einem W(001) Substrat. Das Differenzbild der zwei Daten-Sätze (a) und (b), das mit zwei entgegengesetzt magnetisierten Sondenspitzen erhalten wurde, resultiert in einem magnetischen Kontrastbild (d), das erstmalig eine direkte Ansicht der Néel-Ordnung auf einem quadratischen Gitter liefert [3]. Das Summenbild von (a) und (b) ergibt eine topographische Karte, die ein atomares Adsorbat zeigt, was genutzt wurde, um den gleichen Ort in den zwei Bildern (a) und (b) zu identifizieren.

Nähert man die „out-of plane“ magnetisierte Fe beschichtete Spitze näher an Oberflächenatome heran, führt die spinabhängige Austauschwechselwirkung zwischen den eher lokalisierten Ni d-Zuständen der Probe und den Fe d-Zuständen der Spitze zu einer unterschiedlichen Kraft oder einem Kraftgradienten oberhalb der Ni-Atome mit unterschiedlicher Orientierung ihrer magnetischen Momente. Als Ergebnis wird eine Überstrukturperiode im MExFM-Abbild (Abb. 4b)

beobachtet, die einem antiferromagnetisch geordneten Zustand auf der NiO(001) Oberfläche entspricht. Zu bemerken ist, dass die deutliche Höhendifferenz zwischen den magnetisch nicht-äquivalenten Ni-Stellen, die unterschiedlichen Stärken der spinabhängigen quantenmechanischen Kräfte entspricht, nur 1,5 pm beträgt, wie man aus der Schnittlinie in Abbildung 4b ableiten kann. Um ein solch winziges Signal aufzulösen, muss das AFM-Instrument bei tiefen Tem-

peraturen betrieben werden, um die thermischen Anregungen des AFM-Kraftsensors zu reduzieren.

Zusammenfassung

Spinabhängige quantenmechanische Austauschkräfte zwischen einem Einzelatom an einer Spitze und individuellen Oberflächenatomen sind messbar. Ein neuer Typ von Rastermikroskopie ermöglicht die atomare Auflösung von Spinstrukturen auf der Oberfläche eines beliebigen Materials. Damit wird der Anwendungsbereich der SP-RTM beträchtlich erweitert.

Danksagung

Ich möchte mich bei meinen Kollegen und Mitarbeitern L. Berbil-Bautista, K. von Bergmann, S. Blügel, M. Bode, P. Ferriani, S. Heinze, U. Kaiser, S. Krause, A. Kubetzka, A. Lichtenstein, O. Pietzsch, A. Schwarz, und E. Vedmedenko für ihre Beiträge bedanken. Die finanzielle Unterstützung erfolgte durch den DFG Sonderforschungsbereich SFB 668.

Literatur:

- [1] Wiesendanger R., et al., Science 255, 583 (1992)
- [2] Heinze S., et al., Science 288, 1805 (2000)
- [3] Kubetzka A., et al., Phys. Rev. Lett. 94, 087204 (2005)
- [4] Bode M., et al., Nature Materials 5, 477 (2006)
- [5] Binnig G., et al., Rev. Mod. Phys. 59, 615 (1987)
- [6] Wiesendanger R., Cambridge University Press, Cambridge (1994)
- [7] Wiesendanger R., et al., Phys. Rev. Lett. 65, 247 (1990)
- [8] Bergmann K. von, et al., Phys. Rev. Lett. 96, 167203 (2006)
- [9] Kaiser U., et al., Nature 446, 522 (2007)
- [10] Jullière M., Phys. Lett. A 54, 225 (1975)
- [11] Martin Y., et al., Appl. Phys. Lett. 50, 1455 (1987)
- [12] Schwarz A., et al., Phys. Rev. Lett. 92, 077206 (2004)
- [13] Binnig G., et al., Phys. Rev. Lett. 56, 930 (1986)
- [14] Yang H., et al., Phys. Rev. Lett. 89, 226101 (2002)
- [15] Bode M., et al., Phys. Rev. Lett. 81, 4256 (1998)
- [16] Kleiber M., et al., Phys. Rev. Lett. 85, 4606 (2000)
- [17] Krause S., et al., Europhys. Lett. 76, 637 (2006)
- [18] Giessibl F. J., et al., Science 267, 68 (1995)
- [19] Morita S., Wiesendanger R., and Meyer E. (eds.), Non-contact Atomic Force Microscopy, Springer (2002)
- [20] Ashino M., et al., Phys. Rev. Lett. 93, 136101 (2004)

Weitere Literatur ist direkt beim Autor erhältlich.

► KONTAKT

Prof. Dr. Roland Wiesendanger
 Universität Hamburg, Deutschland
 Tel.: +49 40 42838 5244
 wiesendanger@physnet.uni-hamburg.de
 www.nanoscience.de
 www.hansenanotec.de
 www.sfb668.de

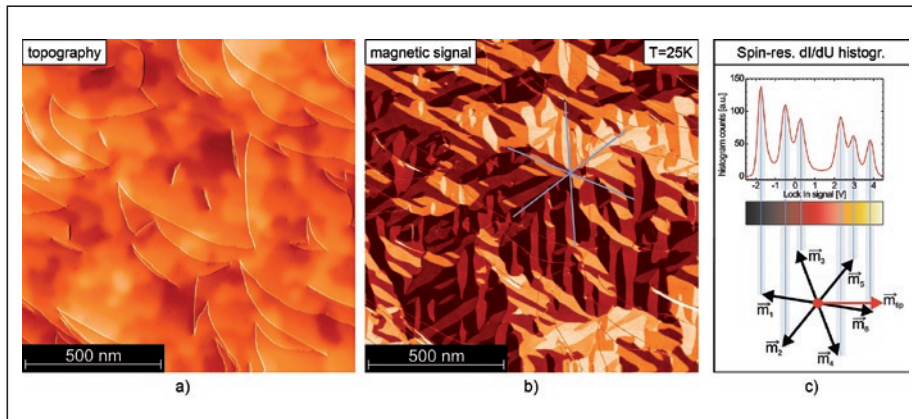


Abb. 3: Anwendung der SP-RTM im Hinblick auf die Abbildung von magnetischen Domänen mit einer Auflösung auf Sub-Nanoebene: Ein dünner Dy(0001) Film epitaktisch gewachsen auf einem W(110)-Substrat besitzt eine Domänenstruktur mit sechs unterschiedlichen Orientierungen der lokalen Magnetisierung in der Probenebene. Die sechs unterschiedlichen Kontrastwerte im SP-RTM Bild sind das Ergebnis von sechs unterschiedlichen Projektionen der lokalen Probenmagnetisierung auf die lokale Magnetisierungsrichtung der Sondenspitze (Quantisierungsachse). Die relativ hohe magnetische Anisotropie von Dy führt zu schmalen magnetischen Wänden von typisch 2–3 nm Breite.

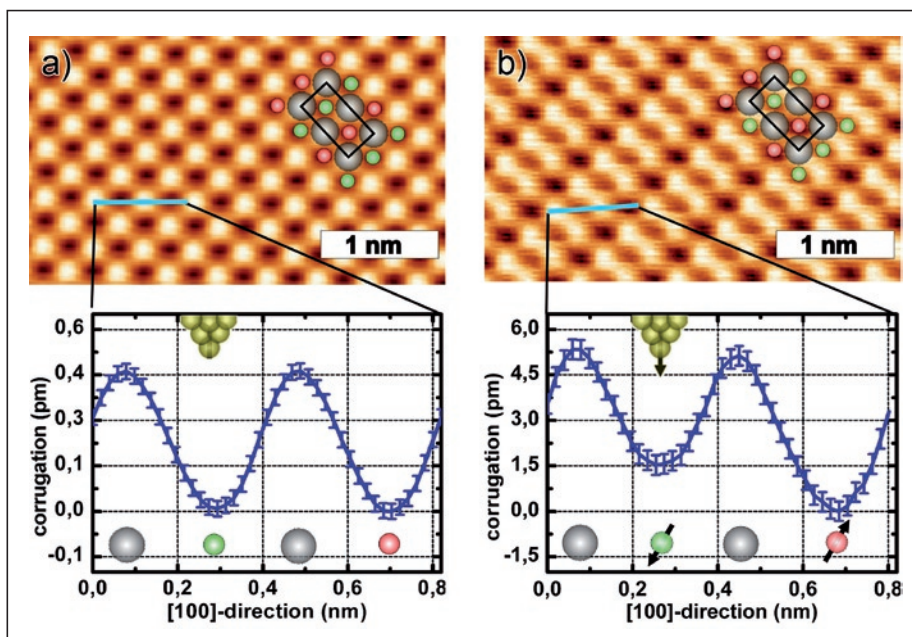


Abb. 4: (a) Die Abbildung mit atomarer Auflösung einer antiferromagnetischen NiO(001)-Oberfläche, erhalten mittels Nicht-Kontakt Rasterkraftmikroskopie (Non-Contact Atomic Force Microscopy – NC-AFM), weist reinen chemischen Kontrast auf. Die Schnittlinie zeigt eine deutliche Höhendifferenz von 4,5 pm zwischen Nickel (dunkel)- und Sauerstoff (hell)-Stellen auf. Die Einheitszellen-Mittelung wurde angewendet, um das Signal-zu-Rausch-Verhältnis in diesem Daten-Satz zu verbessern. (b) Spinaufgelöstes Bild von NiO(001) mit atomarer Auflösung erhalten durch magnetische Austauschkraftmikroskopie (Magnetic Exchange Force Microscopy – MExFM) nach Einheitszellen-Mittelung. Während die Sauerstoffatome den gleichen Kontrast überall im Bild aufweisen, erscheinen die Nickelatome mit entgegengesetzter Spinorientierung nun mit einer deutlichen Höhendifferenz von 1,5 pm. Diese geringe Höhendifferenz im MExFM Bild beruht auf der magnetischen Austauschwechselwirkung zwischen dem magnetischen Atom an der Sondenspitze und den magnetischen Atomen auf der Probenoberfläche in Abhängigkeit von der relativen Spinausrichtung. Zu bemerken ist, dass die spinabhängigen Austausch- und Korrelationskräfte an der antiferromagnetischen NiO-Oberfläche nur bei sehr geringen Spitze-Oberflächen-Abständen gemessen werden können infolge der lokalisierten Natur der Ni d-Zustände in der isolierenden NiO Probe [9].