

Bauen mit einzelnen Atomen

Gerhard Meyer und Karl-Heinz Rieder

Das Rastertunnelmikroskop war ursprünglich zur Abbildung von Oberflächenstrukturen mit atomarer Auflösung erfunden worden. Mit zunehmender technischer Perfektion wird es jetzt zu einem Instrument, mit dem sich atomare Strukturen nach der Methode Atom auf Atom herstellen lassen. Damit ist eine wichtige Grundlage für zukünftige Quantentechnologien geschaffen.

Mit dem von Gerd Binnig und Heinrich Rohrer entwickelten Rastertunnelmikroskop (RTM) kann man nicht nur faszinierende Bilder von Oberflächen bis hin zu atomarer Auflösung machen. Man kann das Instrument auch benutzen, um künstliche Strukturen durch kontrollierte Manipulation einzelner Atome und Moleküle aufzubauen. Damit rückt der uralte Ingenieurstraum in den Bereich des Möglichen, von Menschen entworfene funktionale Strukturen sozusagen Atom auf Atom herzustellen. Ein Beispiel einer mit atomarer Präzision aufgebauten künstlichen Struktur zeigt Abbildung 1 zusammen mit einem Modell des Bauplans: die erste Ziffer der in der Abbildung rechts dargestellten Jahreszahl 2000. Die Bausteine waren auf einer Kupferoberfläche adsorbierte Kohlenmonoxidmoleküle, die mit Hilfe der Spitze eines Rastertunnelmikroskops bei Temperaturen um 15 K entsprechend dem auf der linken Seite des Bildes dargestellten Modell angeordnet wurden. Die Kupferoberfläche besteht aus Terrassen, die durch monoatomare Stufen voneinander getrennt sind. Die Regelmäßigkeit dieser Stufenstruktur ist in der Abbildung deutlich zu erkennen. Die Bindungsplätze der schwach chemisorbierten CO-Moleküle liegen oberhalb der Cu-Atome



Die Millenniumszahl 2000, aufgebaut durch kontrollierte laterale Manipulation von Kohlenmonoxidmolekülen auf einem Kupfersubstrat. (Hergestellt für und unterstützt durch die Ausstellung zum Millennium „7 hügel: Bilder und Zeichen des 21. Jahrhunderts“ der Berliner Festspiele im Martin-Gropius-Bau, Berlin 14.5. – 29. 10. 2000)

me auf den Stufenkanten der Oberfläche des Substrats.

Wie ein RTM Bilder macht

Der Abbildungsmodus des RTM ist in Abbildung 2 dargestellt: Eine Metallnadel, deren äußerste Spitze im Idealfall von einem einzelnen Atom gebildet wird, wird mittels eines

Piezoröhrchens in einen Abstand von wenigen Atomdurchmessern, etwa 0,8–1 nm, über die Probe gebracht und entlang der Oberfläche bewegt. Eine elektrische Spannung zwischen der Spitze und der Probe von einigen Millivolt bis hin zu Volt bewirkt das Fließen eines quantenmechanischen Tunnelstroms von wenigen Nanoampere. Er wird von einer Steuerelektronik mittels eines Rückkopplungssystems konstant gehalten. Da der Strom extrem empfindlich von dem Abstand zwischen Spitze und Probe abhängt, hat dies zur Folge, dass die Spitze den Unebenheiten der Oberfläche der Probe folgt wenn man sie parallel zur Oberfläche verschiebt. Je nachdem, ob sie sich gerade oberhalb eines Substratatoms oder zwischen zwei Substratomen befindet, wird sie bei konstant gehaltenem Strom etwas nach oben oder unten ausgelenkt. Die vertikale Position der Spitze, aufgezeichnet als Funktion der horizontalen Position über der Oberfläche der Probe liefert ein naturgetreues Abbild der Anordnung der Atome. In Wirklichkeit stellt das so entstehende Bild die Elektronendichte der Substratoberfläche dar. Die spiegelt aber ihrerseits die geometrische Anordnung der Atome wider. Infolge des geringen Abstands Spitze – Probe müssen natürlich erhebliche technische

Probleme bezüglich der Schwingungsdämpfung sowie der genauen Bewegung der Spitze im Subnanometerbereich gelöst werden. Das ist heutzutage aber kein Problem. Damit steht im Prinzip auch der Manipulation einzelner Atome auf der Oberfläche nichts im Wege.

Wie Atome manipuliert werden

Eigentlich funktioniert die Manipulation von Atomen auf einer Oberfläche genau so, wie man sich das naiv vorstellt: Sie werden „verschoben“ oder von einer Stelle an eine andere „verbracht“. Die drei wesentlichen Parameter, die für Oberflächenmodifikationen mit dem RTM benutzt werden können, sind das elektrische Feld zwischen Spitze und Substrat, der Tunnelstrom der Elektronen und die zwischen Spitze und Substrat auftretenden Van-der-Waals- oder chemischen Kräfte. Diese Parameter können durch Variation des Abstands zwischen Spitze und Probe gezielt eingestellt werden [1]. Beim Arbeiten mit einzelnen Atomen und Molekülen unterscheidet man zwischen lateraler und vertikaler Manipulation. Im ersten Fall wird das Teilchen der Spitze zum gewünschten Platz bewegt, ohne dass der Kontakt zur Oberfläche verloren geht. Im zweiten Fall wird das Teilchen von der Spitze aufgenommen und am gewünschten Ort auf der Oberfläche abgesetzt. Die zuverlässigste laterale Manipulation auf atomarer Skala wird mittels der Kraftwechselwirkung allein erreicht. Feld- und Stromeffekte spielen jedoch entscheidende Rollen bei der vertikalen Manipulation.

Beide Manipulationsarten wurden zuerst von der Gruppe um Don Eigler bei IBM-Almaden [2] und dann in Berlin dazu benutzt [3], um mit adsorbierten Atomen und Molekülen Nanostrukturen zu bauen. Die Überwindung der oben angesprochenen technischen Probleme beim Aufbau eines geeigneten RTM-Systems wird bei der kontrollierten Manipulation einzelner Atome und kleiner Moleküle noch schwieriger: Man muss in der Lage sein, die Position der zu manipulierenden Partikel mit einer Präzision anzupeilen, die nur Bruchteile eines Atomdurchmessers beträgt! Die Driftstabilität des Systems muss so groß sein, dass das Arbeiten mit einmal hergestellten künstlichen Strukturen über Tage hinweg möglich ist. Das von uns aufgebaute System erfüllt trotz seiner Kostengünstigkeit diese Anforderungen voll [4] und hat auch den Vorteil, dass Arbeiten in einem weiten Temperaturbereich zwischen 10 und 300 K möglich sind. Wegen der hohen thermisch indu-

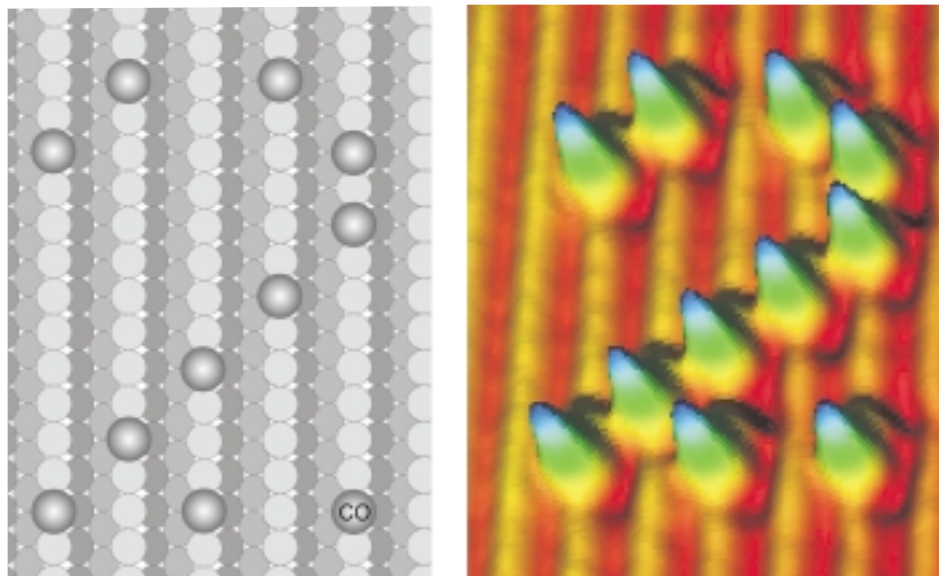


Abb. 1. Atomarer Bauplan und Bild der mittels lateraler Manipulation von CO-Molekülen auf Kupfer gebildeten Ziffer '2'.

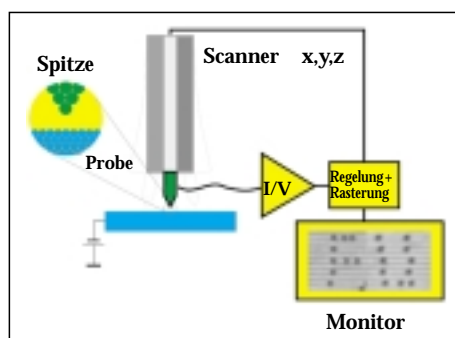


Abb. 2. Funktionsprinzip des Rastertunnelmikroskops im Abbildungsmodus. Mit Hilfe eines Piezoröhrchen-Scanners wird eine feine Metallspitze über eine Oberfläche geführt. Gleichzeitig wird der Tunnelstrom mit einer elektronischen Regelung konstant gehalten und die Höhe der Spitze über der Probe gemessen. Das Regelsignal beinhaltet die Oberflächentopographie und wird auf dem Monitor dargestellt.

zierten Mobilität der meisten Adsorbate ist es für den Aufbau von Strukturen auf atomarer Skala unumgänglich, tiefe Temperaturen zu erreichen. Auch das kontrollierte Aufbringen geringer Dosen von Teilchen muss gewährleistet sein.

Laterale Manipulation

Abbildung 3 zeigt die Vorgehensweise bei der lateralen Manipulation. Zuerst wird die Spitze über dem Adsorbat positioniert und



Abb. 3. Prinzip des lateralen Manipulationsvorgangs einzelner adsorbierter Atome oder Moleküle mit dem Rastertunnelmikroskop. Die Nadelspitze wird über dem zu manipulierenden Partikel so weit abgesenkt, bis sich eine hinreichend starke Bindung ausbildet. Dann wird die Spitze parallel zur Oberfläche zum gewünschten Platz bewegt, wobei das Teilchen mitgezogen oder geschoben wird.

anschließend bis auf ungefähr auf 0,2–0,4 nm abgesenkt, so dass sich eine für die vorzunehmende Manipulation hinreichend starke Bindung zwischen Spitze und Partikel ausbildet. Das Teilchen wird bei lateraler Verschiebung der Spitze parallel zur Oberfläche zum Depositionsort mitgenommen. Dort wird die Spitze auf den Abstand im Abbildungsmodus zurückgezogen.

Im Titelbild ist der Aufbau der Zahl 2000 mit insgesamt 47 CO-Molekülen auf Kupfer bei

15 K als Bildsequenz dargestellt. Zu Beginn wurde ein entsprechend großer Bereich der Oberfläche vollständig von den adsorbierten Partikeln leergefegt. Aus dem benachbarten Reservoir wurden dann die benötigten Moleküle Stück für Stück in die vorgesehenen Positionen gebracht [5]. Im Gegensatz zu dieser auf atomarem Niveau perfekten Struktur waren die ersten Strukturen, die wir herstellten, keineswegs perfekt, wie aus dem Bild auf dem Monitor der Abbildung 2 zu ersehen ist [3]. Der Grund für die Unregelmäßigkeiten lag darin, dass unser System bei diesen Experimenten bei einer Temperatur von 40 K betrieben wurde. Bei dieser Temperatur sind die durch schwache Chemisorption an die Oberfläche gebundenen CO-Moleküle bereits so beweglich, dass der Experimentator gegen die Entropie gerade noch siegreich anzukämpfen vermag.

Manipulationsexperimente mit Äthanmolekülen und Bleiatomen ergaben, dass für diese Spezies größere Manipulationskräfte, das heißt noch kleinere Abstände zwischen Spitzen und Adsorbat, benötigt werden als für die CO-Manipulation [6]. Da die Kräfte nicht direkt experimentell zugänglich sind, bedienen wir uns des Tunnelwiderstands, das ist das Verhältnis der Tunnelstromstärke und der Spannung zwischen Spitze und Adsorbat, als ein qualitatives Maß für die Stärke der Kraft. Typische, aber wegen verschiedener Spitzenformen sehr stark variierende Werte für eine zuverlässige laterale Manipulation sind 1 MOhm für CO und einige 100 kOhm für Äthan und Blei. Diese Werte sind mit den Tunnelwiderständen im Abbildungsmodus zu vergleichen. Sie liegen im Bereich von Hunderten von MOhm!

Wesentlich schwieriger als der Griff nach Atomen auf Oberflächen ist ein Eingriff ins Substrat selbst, einerseits weil die im Substrat befindlichen Atome infolge ihrer dichten Einbettung nicht mehr so exponiert sind und andererseits, weil sie infolge ihrer höheren Koordination fester gebunden sind. Trotzdem konnten wir aus der Kupferoberfläche „eingeborene“ Atome aus verschiedenen Positionen herauslösen. Die Abbildungen 4a–d zeigen das Ablösen von Atomen aus Stufenkanten, die die Begrenzung zu einer höhergelegenen Terrasse des Kupfersubstrats bilden [7]. Atome in diesen Defektstufenkanten sind in sechsfacher Koordination gebunden, und ihre Ablösung von der höhergelegenen Terrasse ist im Modell der Abbildung 5 durch den strichpunktierten Pfeil gekennzeichnet.

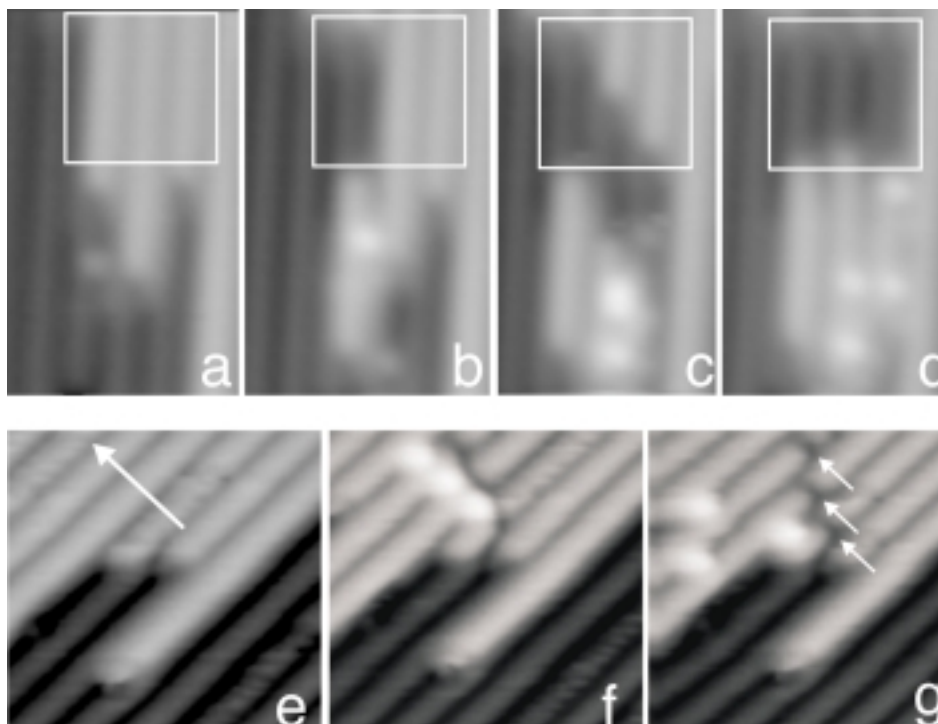


Abb. 4. Manipulation von hochkoordiniert gebundenen, „eingeborenen“ Substratatomen auf Kupfer. (a–d) Etwa 30 Cu-Atome werden von den 6fach koordinierten Halbkristallplätzen an Defektstufenkanten von einer höhergelegenen Terrasse abgelöst, um eine quadratische Fläche auf der darunterliegenden Terrasse freizulegen. (e–g) Einzelne Cu-Atome können auch aus den 7fach koordinierten Plätzen der regulären Stufen in kontrollierter Weise herausgelöst werden; die zurückbleibenden Leerstellen sind deutlich zu erkennen.

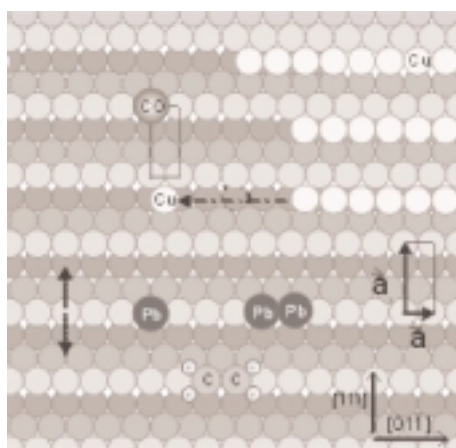


Abb. 5. Modell einer Kupferoberfläche zur Illustration der verschiedenen Manipulationarten von Substratatomen: Herauslösen aus 6fach koordinierten Halbkristallplätzen (strichpunktierte Pfeile) und aus 7fach koordinierten regulären Stufenplätzen (dicke Pfeile links). Die aus Manipulationsexperimenten bestimmten Adsorbatplätze verschiedener Oberflächenspezies sind ebenfalls eingezeichnet.

Mit geeignet präparierten Spitzen, die einerseits sehr robust, also breit, andererseits aber doch scharf genug sein müssen, um einzelne Atome gezielt zu erfassen, lassen sich solche Prozesse oft wiederholen. Im gezeigten Beispiel wurden etwa 30 Atome von Halbkristallplätzen abgelöst und in eine benachbarte Oberflächenregion transportiert.

Wie die Abbildungen 4e–g beweisen, ist auch das Herauslösen einzelner Atome aus regulären Stufenkanten möglich, aus einer Umgebung, wo Bindungen zu sieben Nachbarn bestehen (dicke Pfeile links in Abbildung 5). Der Tunnelwiderstand kommt für diese Manipulationen schon recht nahe an den Widerstandswert von 12,8 kOhm bei Erreichen des Punktkontakts heran [8]. Mit diesen neuen Techniken ist der Weg für eine tiefergreifende Strukturierung des Substrats bereitet, da die Beschränkung auf die oberste Atomlage entfällt.

Eine wichtige Nutzenanwendung der Manipulation von Substratatomen ist die Möglichkeit, Bindungsplätze von Adsorbaten zu be-

stimmen (Abbildung 6): Ein Kupferatom wird von einem Platz an einer Defektstufenkante gelöst und in die Nähe eines CO-Moleküls gebracht. Aus der Lage des Kupferatoms relativ zum adsorbierten Teilchen lässt sich dann der Adsorptionsplatz bestimmen. Im Fall von CO auf Cu ist es der Platz über einem Kupferatom auf der regulären Stufenkante (Abbildung 5). Dort sind auch analog bestimmte Bindungsplätze von Pb-Atomen, Bleidimeren und Äthanmolekülen angegeben [7]. Der untere Teil von Abbildung 6 zeigt, dass beim Rücktransport des als Markierung benutzten Kupferatoms an seinen ursprünglichen Platz an der Defektstufenkante mit der verwendeten Spitze auch benachbarte CO-Moleküle beeinflusst werden.

Lässt sich nun feststellen, in welcher Weise die Teilchen von der Spitze mitbewegt werden? In der Tat ist es durch Aufnahme von Höhenkurven der Spitze über dem Substrat während der Manipulation gelungen, drei verschiedene Manipulationsarten experimentell zu unterscheiden, nämlich Ziehen, Mitschleifen und Schieben [9]. Das attraktive, sprunghafte Ziehverhalten ist anhand der Manipulation von Bleiatomen in Abbildung 7a deutlich zu erkennen. Dem ursprünglich an der eingezeichneten Stelle liegenden Blei-Atom nähert sich die Spitze von links und fährt zunächst an der Flanke des Atoms hoch. Bevor jedoch das Maximum erreicht wird, zieht sich die Spitze abrupt zurück, weil das Atom infolge einer anziehenden Wechselwirkung unter die Spitze gesprungen ist. Anschließend folgt die Spitze der Flanke des Atoms abwärts, bis es der Spitze zum nächsten Adsorptionsplatz nachspringt, was diese wieder zum abrupten Entfernen von der Oberfläche zwingt. Dieser diskontinuierliche Vorgang wiederholt sich anschließend mit der Periode des Abstands der Substratome (Abbildung 5).

Bei Verwendung eines geringeren Tunnelwiderstands, also bei Einschalten einer größeren Kraft, ergibt sich das in Abbildung 7b zu erkennende „Mitschleifen“: Das Blei-Atom springt zunächst über eine größere Distanz unter den Spitzenapex, dann folgt die Abstandskurve der Substratkorrugation. Das Atom wird also in engem Kontakt mit der Spitze kontinuierlich über die Oberfläche mitgeschleift. Wird die Spitze zurückgezogen, verbleibt das Atom auf dem Substrat.

Abbildung 7c zeigt, dass im Fall von CO die Manipulation repulsiv erfolgt, die Moleküle

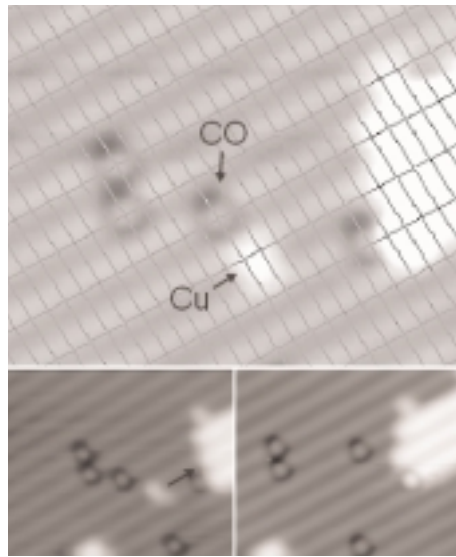


Abb. 6. Experimentelle Bestimmung des Adsorptionsplatzes von CO durch Manipulation eines „eingeborenen“ Kupferatoms in die Nähe eines CO-Moleküls. Das Raster der Einheitszellen entspricht dem in Abbildung 5 gezeichneten Modell. Die unteren Bilder zeigen, dass beim Rücktransport des Cu-Atoms auch benachbarte CO-Moleküle betroffen wurden.

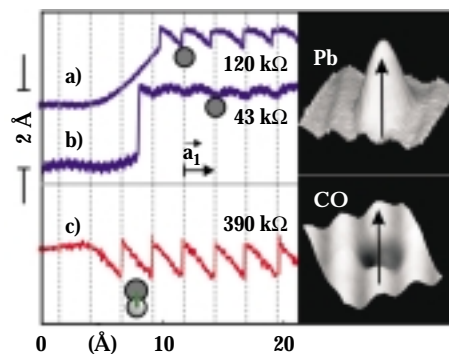


Abb. 7. Abstand der Spitze während der Manipulationsprozesse (a) und (b) für ein Pb-Atom und (c) für ein CO-Molekül entlang der Stufenkanten auf Cu. Die Spitze wird von links nach rechts bewegt und die entsprechenden Tunnelwiderstände sind angegeben. Die vertikalen gestrichelten Linien entsprechen Plätzen an der Unterseite der Stufenkanten. Die ursprünglichen Adsorptionsplätze der Partikel sind eingezeichnet. Bei den attraktiven Manipulationsmoden (a: Ziehen) und (b: Mitschleifen) springen die Partikel zuerst unter die Spitze und folgen ihr dann, während bei der repulsiven Manipulation (c: Schieben) das Partikel vor der Spitze her springt.

also geschoben werden: Da die CO-Moleküle als Vertiefungen abgebildet werden, geht die Spitze bei lateraler Annäherung an ein Molekül zunächst näher an die Oberfläche heran, springt aber bevor sie das Molekül erreicht hat wieder zurück, weil das Molekül zum nächsten Adsorptionsplatz weggesprungen ist. Dieser Vorgang wiederholt sich anschließend regelmäßig mit der Periode des Abstands der Substratome. Der Schiebevorgang lässt sich übrigens auch insofern leicht dadurch nachweisen, als bei lateraler Zurückbewegung der Spitze das Teilchen am Depositionsort zurückbleibt. Der repulsive Manipulationsmodus von CO auf Kupfer entlang der regulären Stufenkanten bietet den Vorteil, dass ganze Ketten von Molekülen auf einmal verschoben werden können [10].

Beim Ziehen von Kupferatomen auf der dicht gepackten Cu-Oberfläche ist es möglich, erstaunlich feine Details der Manipulationsvorgänge zu verfolgen [11]: Bei der Anwendung kleiner Spitze-Teilchen-Kräfte werden die Atome so mitgezogen, dass sie von einem flächenzentrierten (fcc)-Platz auf der Oberfläche zum nächsten springen (Abbildung 8a). Bei Anwendung größerer Kräfte führen die Atome kürzere Sprünge aus, wobei sie sowohl fcc- wie auch hexagonal dicht gepackte (hcp)-Plätze aufsuchen (Abbildung 8b). Setzt man die Spitze etwas seitlich am Atom an, so erreicht man, dass es sich beim Verfolgen der Spitze an den beiden Plätzen verschieden lange aufhält (Abbildung 8c).

Vertikale Manipulation

Die vertikale Manipulation eines einzelnen Xenonatoms zeigt Abbildung 9 [3]: Im oberen Bild sind durch monoatomar hohe Defektstufen getrennte Terrassen des Kupfersubstrats deutlich zu erkennen. Der helle Fleck auf der Terrasse mittlerer Höhe entspricht einem adsorbierten Xenonatom. Im mittleren Bild ist das Xenonatom nicht zu sehen, aber neben der Defekterrassenstruktur ist nunmehr auch die Linienstruktur der regulären Stufen innerhalb jeder Terrasse deutlich zu erkennen. Im unteren Bild schließlich ist die ursprüngliche, etwas unschärfere Auflösung wieder vorhanden, und das Xenonatom liegt wieder auf der Oberfläche, jedoch an einem anderen Ort als zuvor. Das mittlere Bild wurde aufgenommen, nachdem das Xenonatom bewusst auf die Spitze transferiert worden war. Die verbesserte Auflösung hängt mit dem „Schärfen“ der Spitze durch das einzelne Xenonatom an der äußersten

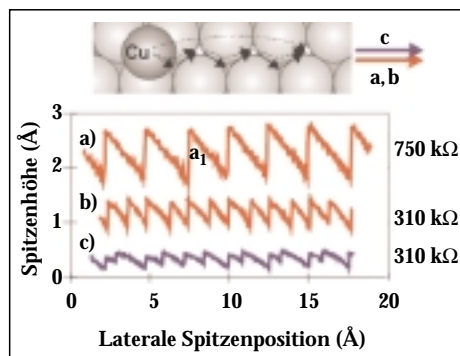


Abb. 8. Abstand der Spitze für verschiedene Varianten der attraktiven Manipulation von Cu-Atomen auf Kupfer. In Abhängigkeit von der Kraft zwischen Spitze und Atom sowie von der Spitzenjustierung können Sprünge der Atome von (a) fcc zu fcc-Plätzen oder von (b, c) fcc- zu hcp-Plätzen induziert werden, wobei in (b) beide Plätze gleich, in (c) verschieden lang besetzt werden. Die Justierung der Spitze relativ zum Atom ist im Modell angedeutet.

Spitze zusammen. Für den zuverlässigen vertikalen Transfer der Atome spielt die Richtung des Feldes und damit des Tunnelstroms eine wichtige Rolle: Die Elektronen müssen in die Richtung fließen, in die sich das Partikel bewegen soll.

Neben der vertikalen Manipulation von Xenon ist uns auch der vertikale Transfer von C_3H_6 [4] und CO gelungen [12]. Der letztere Prozess gestaltet sich insofern kompliziert, als CO-Moleküle auf Kupferoberflächen wie auf den meisten Metallen aufrecht stehen, wobei das Kohlenstoffatom zum Substrat bindet; beim Transfer zur Spitze muss sich das Molekül also umdrehen (Abbildung 11). Eine zuverlässige experimentelle Prozedur für den Transfer ist entsprechend schwierig und verlangt das gleichzeitige Hochfahren der Tunnelspannung und die Verringerung des Abstandes zwischen Spitze und Teilchen [12]. Ein sehr willkommener Nebeneffekt des gezielten Transfers eines chemisch aktiven Moleküls wie des CO ist in den Teilbildern der Abbildung 10 zu erkennen: Im oberen Bild, das mit einer Metallspitze aufgenommen wurde, sind alle adsorbierten Partikel auf dem Kupfersubstrat als Vertiefungen abgebildet. Das untere Bild ist mit derselben Spitze aufgenommen, allerdings nachdem das im oberen Bild gekennzeichnete CO-Molekül an die äußerste Spitze angehängt worden war. Bemerkenswerterweise erscheinen

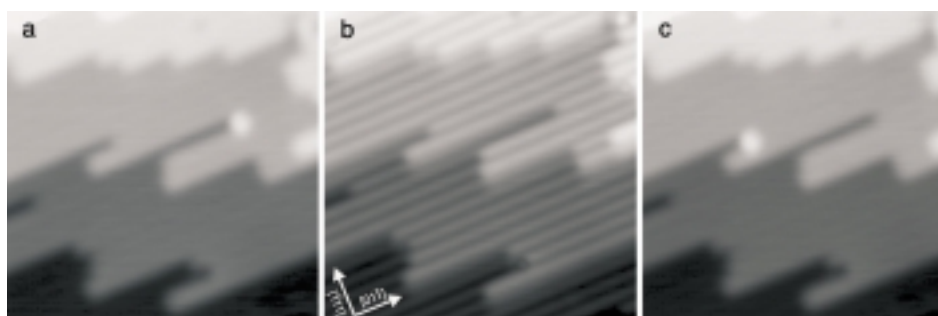


Abb. 9. Experimenteller Nachweis der vertikalen Manipulation eines Xenonatoms. Im linken Bild ist ein einzelnes Xenonatom als heller Hügel zu erkennen. Im mittleren Bild ist das Xenonatom nicht sichtbar, da es auf die Tunnelspitze transferiert wurde. Mit der durch das Xenonatom geschärfte Spitze ist die Auflösung erheblich verbessert: Die Stufenstruktur der Kupferoberfläche ist innerhalb jeder Terrasse deutlich zu erkennen. Im rechten Bild wurde das Xenonatom an einer anderen Stelle des Substrats wieder abgelegt und das Bild weist wieder die ursprüngliche schlechtere Auflösung auf.

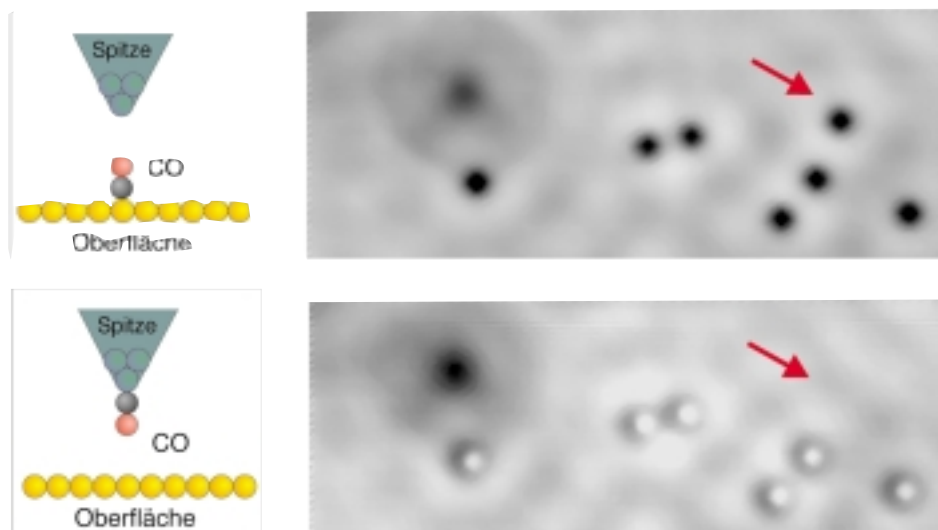


Abb. 10. Mittels vertikaler Manipulation wurde das mit einem Pfeil bezeichnete CO-Molekül auf die RTM-Spitze transferiert und mit der derart funktionalisierten Spitze das darunter liegende Bild aufgenommen: Das Ergebnis ist chemischer Kontrast für alle CO-Moleküle, während das Sauerstoffatom unbeeinträchtigt bleibt. Im Modell ist das Umdrehen des Moleküls beim Transfer dargestellt.

nunmehr alle CO-Moleküle als Hügel mit einem sie umgebenden Graben während das im linken oberen Teil der Abbildung 10 sichtbare Sauerstoffatom weiterhin als Kuhle erscheint. Diese Möglichkeit zur gezielten Kontraständerung wurde in Abbildung 1 ausgenutzt, um die CO-Moleküle als Hügel abzubilden. Die Erzielung chemischen Kontrasts ist für die analytischen Eigenschaften des Rastertunnelmikroskops von großer Bedeutung [13].

Eine detaillierte Untersuchung des vertikalen Transfermechanismus von CO ergab, dass dem Tunnelstrom wieder eine entscheidende

Rolle zukommt [14]. Die Daten zeigten, dass mindestens eine Tunnelspannung von 2,4 V für den Sprung des CO von der Oberfläche benötigt wird und dass diese Ablösung bei ungefähr 3 V zuverlässig funktioniert. Mit Zwei-Photonen-Photoelektronen-Spektroskopie konnte nachgewiesen werden, dass dabei der vorübergehenden Besetzung des antibindenden $2\pi^*$ -CO-Bindungszustands eine entscheidende Rolle zukommt. Dass die Sprungrate linear mit dem Tunnelstrom anwächst, weist auf einen Ein-Elektronen-Prozess als Anregungsmechanismus hin. Die Wahrscheinlichkeit pro Tunnelelektron, einen CO-Sprung zu induzieren, ist span-

nungsabhängig und liegt unterhalb von 10^{-10} , wenn die Spannung 3 V nicht übersteigt. Umfangreiche RTM-Untersuchungen mit $C_{12}O_{16}$ und $C_{13}O_{18}$ ergaben einen deutlichen Isotopeneffekt für die Quantenausbeute. Der Isotopeneffekt kann benutzt werden, um eine Anregungswahrscheinlichkeit für einen Sprung von $5 \cdot 10^{-9}$ abzuschätzen. Das heißt, dass etwa 0,5 % des gesamten Tunnelstroms durch das $2\pi^*$ -Orbital gehen und die Lebensdauer der Elektronen in diesem Zustand nur 0,8 bis 5 Femtosekunden beträgt. Der CO-Transfer zur Spitze hängt also wesentlich vom Elektronenstrom ab, und die Annäherung der Spitze dient vorwiegend dazu, die Wahrscheinlichkeit zu erhöhen, dass das Molekül vom der Spitze aufgefangen wird [12, 14]. Die vertikale Manipulation verbessert auch die Einsatzmöglichkeiten des RTM in Hinblick auf Oberflächenstrukturierung. So ist es zum Beispiel nicht möglich, CO-Moleküle mittels lateraler Manipulation über reguläre oder Defektstufen hinweg zu schieben, weil sie an den Stufenkanten zur Seite hin ausweichen. Durch gezieltes Aufnehmen auf die Spitze und Absetzen am gewünschten Ort können solche Hindernisse jedoch, wie Abbildung 11 zeigt, überwunden werden [12].

Der atomare Baukasten der Zukunft

Wir haben gesehen, dass es heute möglich ist, mit dem RTM kontrolliert laterale und vertikale Manipulation auf atomarer Skala durchzuführen. Wegen der Verwendung des RTM ist man dabei auf elektrisch leitende Substrate beschränkt. Da jedoch bei wichtigen Manipulationsarten die Kraftwechselwirkung zwischen Spitze und Substrat die dominante Rolle spielt, erscheint eine Übertragung dieser Techniken auf das Rasterkraftmikroskop möglich. Damit würden dann auch Strukturierungen auf den Isolatoroberflächen möglich. Ein wichtiger Zwischenschritt, an dem gegenwärtig intensiv gearbeitet wird, sind Manipulationen auf dünnen Isolatorschichten, bei denen das RTM gerade noch eingesetzt werden kann. Das Arbeiten mit einzelnen Atomen und Molekülen besitzt aber noch weitere faszinierende Aspekte [15]: So konnten kürzlich Molekülrotationen induziert und nachgewiesen werden, ebenso ist die gezielte Dissoziation einzelner Moleküle möglich [16]. Da die Dissoziationsprodukte mit der ebenfalls erst kürzlich gelungenen Vibrationspektroskopie [17] oder mit Spektroskopie der elektronischen Zustände [13] cha-

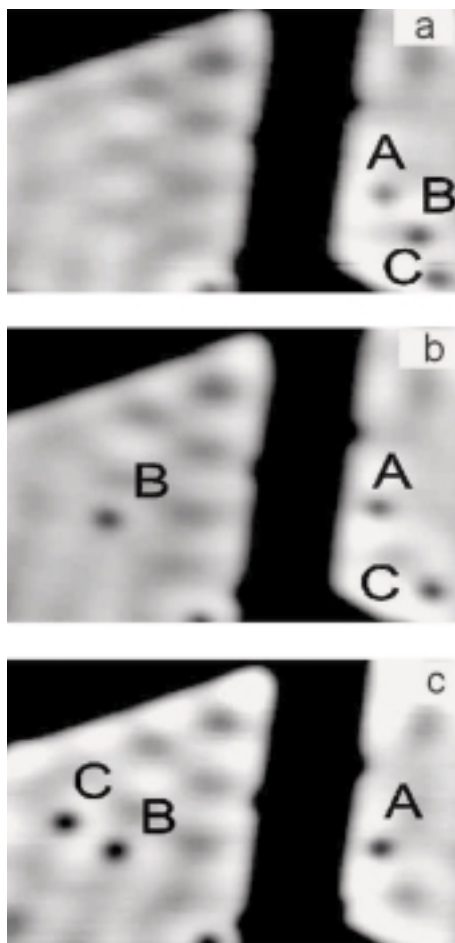


Abb. 11. Ein atomarer Graben stellt für die laterale Manipulation von CO-Molekülen ein unüberwindliches Hindernis dar. Mit Hilfe der vertikalen Manipulation können Moleküle jedoch auf der einen Seite aufgenommen und auf der anderen wieder abgesetzt werden, wie anhand der Moleküle B und C demonstriert wird.

rakterisiert werden können, bietet sich die Möglichkeit, mit dem RTM alle Reaktionspartner für eine chemische Assoziation aufzubereiten, die Reaktanden zusammenzuführen und zur chemischen Verschmelzung zu zwingen. Dazu ist jedoch noch ein intensives Studium des Zusammenwirkens der seitens des RTM zur Verfügung stehenden Parameter Feld, Strom und Kraft bei den diversen Einzelschritten notwendig.

Wir danken unseren Doktoranden und Diplomanden L. Bartels, E. Henze, B. Neu, J. Repp, K. Schaeffer und S. Zöphel für ihre wichtigen Beiträge. Der DFG, der EU sowie der VW-Stiftung verdanken wir wertvolle finanzielle Unterstützung.

Literatur

- [1] Ph. Avouris, Acc. Chem. Res. **28**, 95 (1995).
- [2] J. K. Strosio und D. M. Eigler, Science **254**, 319 (1991).
- [3] B. Neu, G. Meyer und K. H. Rieder, Mod. Phys. Lett. **B9**, 963 (1995).
- [4] G. Meyer, Rev. Sci. Instr. **67**, 2960 (1996).
- [5] J. Repp, Diplomarbeit FU-Berlin (1999).
- [6] G. Meyer, S. Zöphel und K. H. Rieder, Appl. Phys. Lett. **69**, 3185 (1996).
- [7] G. Meyer, S. Zöphel und K. H. Rieder, Phys. Rev. Lett. **77**, 2133 (1996).
- [8] G. Meyer, L. Bartels, S. Zöphel, E. Henze und K. H. Rieder, Phys. Rev. Lett. **78**, 1512 (1997).
- [9] L. Bartels, G. Meyer und K. H. Rieder, Phys. Rev. Lett. **79**, 697 (1997).
- [10] L. Bartels, G. Meyer und K. H. Rieder, Chem. Phys. Lett. **273**, 371 (1997).
- [11] L. Bartels, G. Meyer und K. H. Rieder, Chem. Phys. Lett. **285**, 284 (1998).
- [12] L. Bartels, G. Meyer und K. H. Rieder, Appl. Phys. Lett. **71**, 213 (1997).
- [13] R. Wiesendanger (Hrsg.), Scanning Probe Microscopy: Analytical Methods, Springer Series in Nanoscience and Technology, Springer-Verlag, Heidelberg (1998).
- [14] L. Bartels, G. Meyer, K. H. Rieder, D. Velic, E. Knösel, M. Wolf und G. Ertl, Phys. Rev. Lett. **80**, 2004 (1998).
- [15] J. K. Gimzewski und C. Joachim, Science **283**, 1683 (1999).
- [16] B. C. Stipe, M. A. Rezai und W. Ho, Science **279**, 1907 (1998); Phys. Rev. Lett. **78**, 4410 (1997).
- [17] B. C. Stipe, M. A. Rezai und W. Ho, Science **280**, 1732 (1998).

Die Autoren:

Dr. Gerhard Meyer, geboren 1956. Studium der Physik in Hannover, Promotion 1987. Post-doc bei IBM-Yorktown Heights/USA (87–91) und am MPI für Strömungsforschung Göttingen. Seit 1991 Wissenschaftlicher Assistent an der FU-Berlin.

Prof. Dr. Karl-Heinz Rieder, geboren 1942. Studium der Physik in Wien, Promotion 1968. Wissenschaftlicher Mitarbeiter im Reaktorzentrum Seibersdorf/Österreich, am MPI für Festkörperforschung in Stuttgart und bei IBM-Rüschlikon/Schweiz. Seit 1986 Professor an der FU-Berlin.

Anschrift:

Fachbereich Physik der Freien Universität Berlin, Arnimallee 14, D-14195 Berlin.
gmeyer@physik.fu-berlin.de
rieder@physik.fu-berlin.de