

Essay: Raster-Tunnel-Mikroskopie

Ellen D. Williams
University of Maryland

Heute ist es gesichertes Erkenntnis, daß die Materie aus Atomen aufgebaut ist. Die Hinweise darauf sind allerdings meist indirekter Art. Inzwischen gibt es jedoch einige Methoden, einzelne Atome sichtbar zu machen und ihr Verhalten direkt zu untersuchen: die Transmissions-Elektronenmikroskopie, die Feldionen-Mikroskopie, die optische Nahfeld-Mikroskopie und die vielseitig anwendbare Raster-Sonden-Mikroskopie, deren historischer Ursprung die Raster-Tunnel-Mikroskopie ist. Für die Entwicklung der letzteren erhielten Gert Binnig und Heinrich Rohrer im Jahr 1986 den Nobelpreis für Physik, zusammen mit Ernst Ruska, der für seine Arbeiten zur Entwicklung des Elektronenmikroskops ausgezeichnet wurde. Bei allen Verfahren der Raster-Sonden-Mikroskopie tastet eine feine Spitze, die sogenannte Sonde, das zu untersuchende Objekt in geringem Abstand ab. Die Sonde sammelt Signale, aus denen mit einem Rechner ein Bild zusammengesetzt wird. Bei der Raster-Tunnel-Mikroskopie wird eine extrem feine Metallnadel als Sonde eingesetzt; die Methode ist auf die Untersuchung elektrisch leitender Objekte beschränkt.

Um das Prinzip der Raster-Tunnel-Mikroskopie (STM, vom englischen Scanning Tunneling Microscopy) zu verstehen, führen wir uns noch einmal das Verhalten von Elektronen in Metallen (oder in beliebigen anderen leitfähigen Materialien) im Rahmen der Bändertheorie vor Augen. In einem Metall füllen die Leitungselektronen – sie können als Elektronengas aufgefaßt werden – das Leitungsband bis zu einer Obergrenze der Energie, der Fermi-Energie E_F . Die Elektronen mit der Energie E_F besitzen die geringste Bindungsenergie zum Metall, die gerade der Austrittsarbeit von rund 5 eV entspricht (Abschnitte 35.2 und 39.3). Nach der klassischen Theorie können diese Elektronen das Metall nur verlassen, wenn ihnen eine entsprechend hohe Energie zugeführt wird. Indem man zwei verschiedene Metalle sehr nahe aneinanderbringt, wie in Abbildung 1 dargestellt, läßt sich jedoch ein rechteckiger, endlicher hoher Potentialwall erzeugen, ähnlich dem in Abbildung 36.20. Gemäß der quantenmechanischen Beschreibung können Elektronen mit einer Energie, die etwa der Fermi-Energie entspricht, durch diesen Potentialwall vom einen Metall in das andere tunneln. Die Wahrscheinlichkeit für einen solchen Tunnelprozeß ist, wie in Abschnitt 36.10 beschrieben, proportional zu $e^{-\alpha a}$. Dabei ist a der Abstand zwischen den Metallen, und α hängt von der Barrierenhöhe ab, hier also von der Austrittsarbeit.

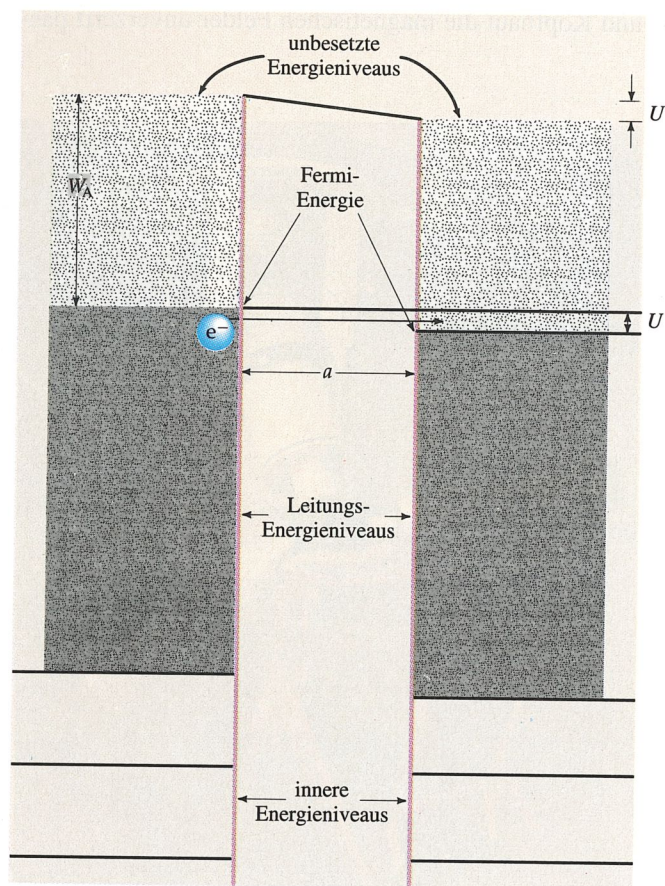


Abbildung 1 Die Energieniveaus zweier Metalle im Abstand a . Die Elektronen in den Leitungs-Niveaus bewegen sich im wesentlichen frei. Die Elektronen mit der höchsten Energie (der Fermi-Energie E_F) werden durch einen Potentialwall der Höhe W_A (der Austrittsarbeit) im Metall gehalten. Um einen hinreichend starken Tunnelstrom zu erhalten, wird an die beiden Metalle eine kleine Spannung U angelegt, die die Energieniveaus (wie in der Abbildung gezeigt) verschiebt, so daß Elektronen aus dem linken Metall durch die Barriere in das rechte Metall tunneln und dort Zustände geringerer Energie besetzen kann.

Das Prinzip der Raster-Tunnel-Mikroskopie ist in Abbildung 2 dargestellt. Wird eine metallische Sonde nahe genug an eine Probe herangebracht und eine kleine Spannung U von etwa 10 mV zwischen Sonde und Probe angelegt, so treten Tunnelprozesse von Elektronen zwischen Sonde und Probe auf. Der Nettofluß von Elektronen äußert sich als Tunnelstrom, der proportional zur Tunnelwahrscheinlichkeit ist. Beim Abtasten der Probe führt jede Erhebung oder Vertiefung in der Oberfläche zur Änderung des Abstands zur Sonde und damit zu einer Veränderung des Tunnelstroms. Da die Tunnelwahrscheinlichkeit exponentiell von diesem Abstand abhängt, genügen schon Abstandsänderungen um rund

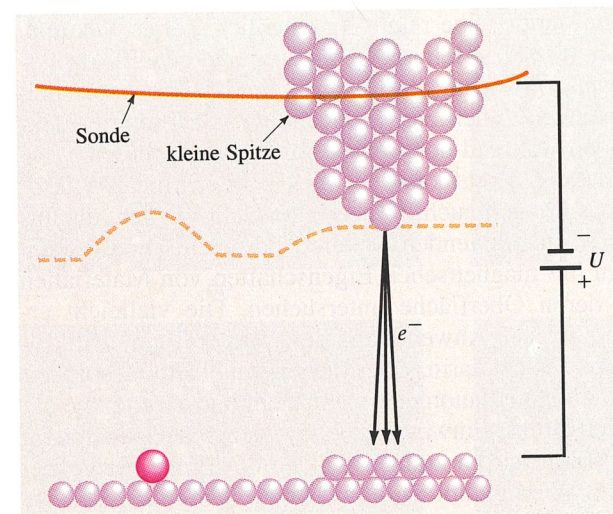
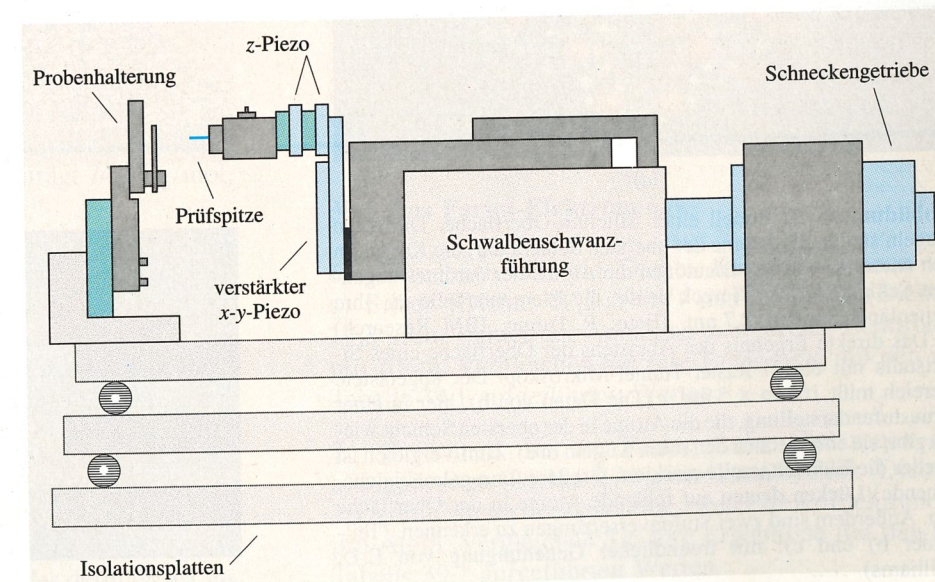


Abbildung 2 Schematische Darstellung des Abtastprozesses: Die Sonde wird über eine Oberfläche geführt. Dabei wird der Abstand Sonde-Oberfläche so reguliert, daß der Tunnelstrom konstant bleibt. Hat die Sonde eine große Ausdehnung (durch die durchgezogene Linie angedeutet), so treten über einen großen Bereich Tunnelprozesse auf, und es wird eine nur geringe Auflösung erreicht. Hat die Sonde jedoch eine Spitze von atomarem Ausmaß, so tritt das Tunneln nur in einem kleinen Bereich auf, und es wird eine Auflösung bis herab zu wenigen Atomdurchmessern möglich. Der Verlauf des Tunnelstroms als Funktion des Ortes spiegelt die Oberflächenbeschaffenheit wieder (gestrichelte Kurve).

0,01 nm, um den Tunnelstrom meßbar zu beeinflussen. Durch Messung des Tunnelstroms beim Abtasten der Probe kann somit im Prinzip ein topographisches Bild der Probenoberfläche erhalten werden. Bei der praktischen Umsetzung dieser Idee sind jedoch einige schwierige technische Probleme zu lösen: die Unterdrückung

Abbildung 3 Schematische Darstellung eines Raster-Tunnel-Mikroskops. Die Probenhalterung ist starr auf die oberste einer Reihe mehrerer Isolationsplatten montiert. Die Prüfspeise ist an den „Piezos“ (Stücke aus piezoelektrischer Keramik zur Steuerung der Sonde) angebracht. Diese wiederum sind an einen schweren Block montiert, der auf einer Schwalbenschwanzführung gleitet. Der Block kann mit einem elektronisch gesteuerten Schneckengetriebe-Motor in Schritten von 4 nm vorwärts oder rückwärts bewegt werden.



von Vibrationen, die Herstellung geeigneter Sondenspitzen und die genaue Führung der Sonde.

Die Vibrationen sind äußerst störend, da der Abstand zwischen Sonde und Probe sehr gering ist. Beträgt die Austrittsarbeit 5 eV, so sind Abstände in der Größenordnung einiger Nanometer (das entspricht etwa der Größe eines Atoms) einzustellen. Dabei reicht schon ein leichtes Niesen aus, um Vibrationen zu erzeugen, die die Sonde in die Probe hineintreiben und damit den Aufbau zerstören. Die meisten Vibrationen rühren von Bewegungen des Bodens her. Mit einer typischen Amplitude von etwa 1 μm sind sie um einen Faktor 1000 größer als der zwischen Sonde und Probe einzuhaltenen Abstand. Der Aufbau eines Raster-Tunnel-Mikroskops muß daher besonders starr und von Erschütterungen extrem gut abgeschirmt sein.

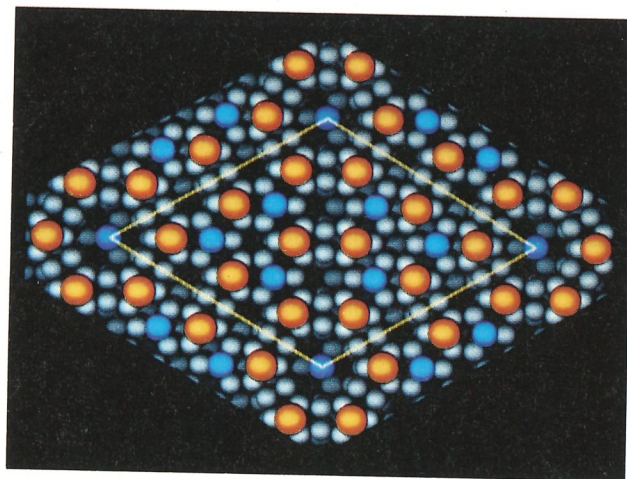
Das Auflösungsvermögen eines Raster-Tunnel-Mikroskops hängt wesentlich davon ab, wie scharf die Spitze der Sonde ausgebildet ist, denn dies hat Einfluß auf die Genauigkeit, mit der die Oberfläche abgetastet werden kann. Durch elektrochemisches Ätzen ist es möglich, die Enden eines Metalldrahtes bis auf einen Radius von 1 $\mu\text{m} = 1000 \text{ nm}$ anzuspitzen. Eine Spitze mit einer derart großen Oberfläche ermöglicht jedoch auch Tunnelprozesse in einem Bereich derselben Größenordnung und ist daher für eine Auflösung einzelner Atome unzureichend. Wie in Abbildung 2 dargestellt, weist die Oberfläche einer solchen Sonde jedoch viele kleine Spitzen auf, deren Enden aus nur wenigen Atomen bestehen. Da die Tunnelwahrscheinlichkeit mit dem Abstand exponentiell sinkt, ist sichergestellt, daß Tunnelprozesse von Elektronen vorzugsweise über eine solche Spitze ablaufen.

Es stellt sich die Frage, wie man die Bewegung einer Prüfspeise auf 0,1 nm genau steuern kann. Man benutzt

hierzu eine piezoelektrische Keramik, also ein Material, das sich beim Anlegen einer äußeren Spannung ausdehnt bzw. kontrahiert. Bei einer Spannung von einem Volt liegt die Expansion in der Größenordnung von einigen Zehnteln eines Nanometers. Eine an der Keramik angebrachte Sonde kann somit sehr präzise bewegt werden. Abbildung 3 zeigt schematisch den Aufbau eines Raster-Tunnel-Mikroskops.

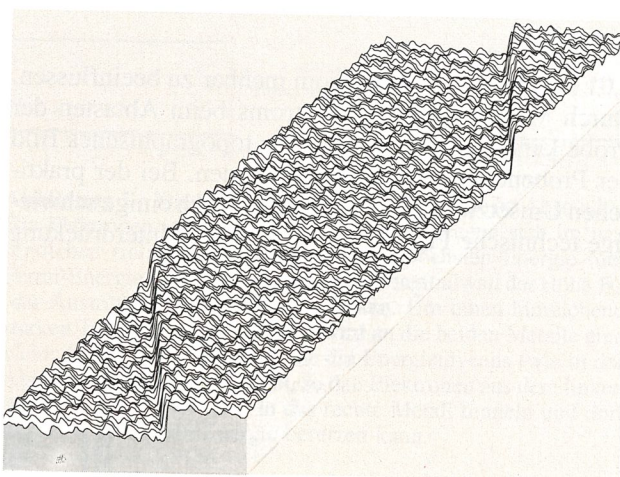
Binnig und Rohrer zeigten, wie die genannten Schwierigkeiten zu bewältigen sind und daß das Raster-Tunnel-Mikroskop ein hervorragendes Instrument zur Untersuchung von Oberflächen darstellt. Die mit ihm beim Abtasten einer Oberfläche gewonnenen Daten geben die Oberflächenhöhe in Abhängigkeit vom Ort an und können graphisch dargestellt werden. Abbildung 4 zeigt das Modell der Oberfläche eines Siliciumkristalls und zum Vergleich die Ergebnisse einer Abtastung mit einem Raster-Tunnel-Mikroskop. Dessen Leistungsfähigkeit wird hier auf eindrucksvolle Weise demonstriert.

Das Raster-Tunnel-Mikroskop hat noch weitere Anwendungsmöglichkeiten. Für den Tunnelprozeß der Elektronen ist nämlich die Art des Materials zwischen

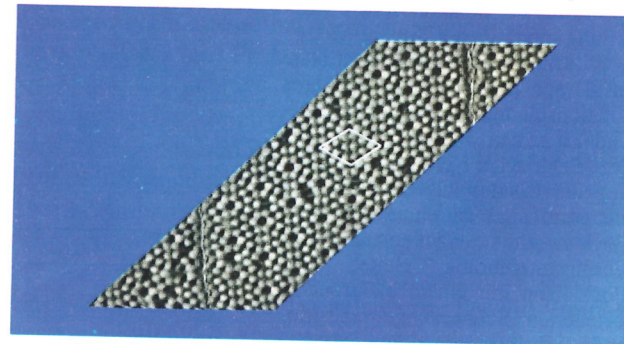


(a)

Abbildung 4 a) Modell einer Silicium-Oberfläche. Die roten Kugeln stellen die Atome der obersten Schicht dar, die Kugeln in den unterschiedlichen Blautönen die Atome der darunter liegenden Schichten. Das Viereck deutet die Elementarzelle an. Ihre Seitenlänge beträgt 2,7 nm. (Foto: R. Trump, IBM Research) b) Das direkte Ergebnis des Abtastens der Oberfläche eines Si-Kristalls mit einem Raster-Tunnel-Mikroskop. Der abgetastete Bereich mißt $10 \text{ nm} \times 5 \text{ nm}$. c) Die Daten von b), hier in einer Graustufendarstellung, die die Atome in der obersten Schicht wiedergibt; sie entsprechen den roten Kugeln in a). Zum Vergleich ist wieder die Elementarzelle markiert. Größere (unregelmäßig aussehende) Lücken deuten auf fehlende Atome in der Oberfläche hin. Außerdem sind zwei Stufenversetzungen zu erkennen. (Teilmilder b) und c): mit freundlicher Genehmigung von E.D. Williams)



(b)



(c)

Sonde und Probe relativ unerheblich; sei es Vakuum, Luft, flüssiges Helium, Öl, Wasser oder eine Elektrolyt-Lösung. So kann die Raster-Tunnel-Mikroskopie beispielsweise auch zur Beobachtung von Batterie-Elektroden während des Betriebs angewandt werden.

Durch Modifikationen des Raster-Tunnel-Mikroskops können auch Proben untersucht werden, die aus einem nichtleitenden Material bestehen; ebenso kann man die magnetischen Eigenschaften von Materialien an deren Oberfläche untersuchen. Die vielleicht erstaunlichste Anwendung des Raster-Tunnel-Mikroskops besteht darin, Oberflächen mit einer Genauigkeit von einigen Nanometern zu ritzen, und zwar entweder durch direkte Einwirkung der Sondenspitze, oder indem der Tunnelstrom zum Aufheizen der Probe verwendet wird. Wie in Abbildung 5 gezeigt, kann man mit Hilfe der Sondenspitze sogar *einzelne Atome* auf der Oberfläche verschieben.

Die Raster-Tunnel-Mikroskopie stellt eine bedeutende praktische Anwendung der Quantenmechanik dar und demonstriert, wie schnell sich grundlegende physikalische Konzepte in moderne Technologien umsetzen lassen.

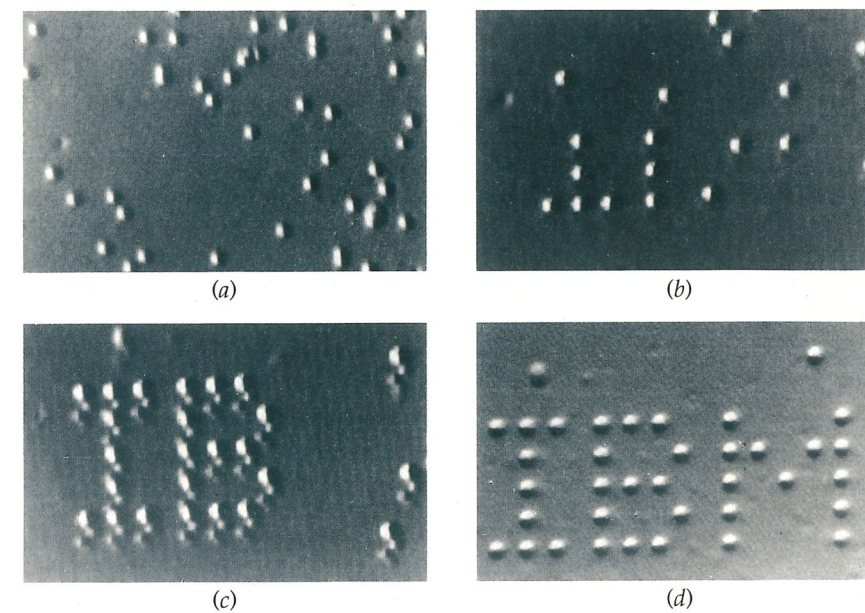


Abbildung 5 Einige Raster-Tunnel-Mikroskop-Aufnahmen, die beim Erzeugen eines Musters von Xenon-Atomen auf einer Nickel-Oberfläche bei einer Temperatur von 4 K erstellt wurden. Die Xenon-Atome sind zunächst zufällig auf der Nickel-Oberfläche verteilt und werden durch Antippen mit der Sondenspitze über die Oberfläche bewegt; schließlich entsteht der Schriftzug der Firma, in deren Forschungslabor das Raster-Tunnel-Mikroskop entwickelt wurde. (Foto: D.M. Eigler, E.K. Schweizer, IBM Corp., Research Division, Almaden Research Center)

Aufgaben

Stufe I

39.1 Die Struktur von Festkörpern

1. Nehmen Sie an, daß harte Kugeln mit dem Radius R die Ecken der Elementarzelle einer kubisch-primitiven Struktur besetzen. a) Die Kugeln berühren sich, der Kristall nimmt so das kleinstmögliche Volumen ein. Wie groß ist die Elementarzelle? b) Welcher Teil des Volumens der kubischen Struktur wird von den harten Kugeln besetzt?

2. Berechnen Sie den Gleichgewichtsabstand r_0 zwischen den K^+ - und Cl^- -Ionen im KCl. Nehmen Sie an, jedes Ion nehme ein kubisches Volumen der Seitenlänge r_0 ein. Die molare Masse von KCl beträgt $74,55 \text{ g/mol}$, und seine Dichte ist $1,984 \text{ g/cm}^3$.

3. Berechnen Sie den Wert von n in Gleichung (39.6), der zur gemessenen Gitterenergie von -741 kJ/mol von LiCl führt. LiCl und NaCl haben die gleiche Struktur, und für LiCl ist der Gleichgewichtsabstand $r_0 = 0,257 \text{ nm}$.

39.2 Das klassische Konzept des Elektronengases und seine Grenzen

4. Ein Maß für die Dichte des freien Elektronengases in einem Metall ist der Abstand r_k , der definiert ist als

der Radius der Kugel, deren Volumen dem Volumen pro Leitungselektron entspricht. a) Zeigen Sie, daß gilt: $r_k = (3/4 \pi n)^{1/3}$, wobei n die Dichte (Anzahldichte) der freien Elektronen ist. b) Berechnen Sie r_k (in nm) für Kupfer.

5. a) In Kupfer fließe bei einer Temperatur von 300 K ein elektrischer Strom. Bei dieser Temperatur ist die mittlere freie Weglänge der Elektronen $\ell_e = 0,4 \text{ nm}$ und ihre mittlere Geschwindigkeit $\langle v \rangle = 1,7 \cdot 10^5 \text{ m/s}$. Berechnen Sie den klassischen Wert des spezifischen Widerstands von Kupfer. b) Nach dem klassischen Modell ist ℓ_e temperaturunabhängig, $\langle v \rangle$ jedoch abhängig von der Temperatur. Wie groß ist dann der spezifische Widerstand bei 100 K?

39.3 Das Fermi-Elektronengas

6. Berechnen Sie die Dichte freier Elektronen in a) Silber (Dichte $10,5 \text{ g/cm}^3$) und b) Gold (Dichte $19,3 \text{ g/cm}^3$) unter der Annahme eines freien Elektrons pro Atom. Vergleichen Sie Ihre Ergebnisse mit den in Tabelle 39.1 aufgeführten Werten.

7. Berechnen Sie die Dichte freier Elektronen in a) Magnesium (Dichte $1,74 \text{ g/cm}^3$) und b) Zink (Dichte $7,1 \text{ g/cm}^3$) unter der Annahme zweier freier Elektronen pro Atom. Vergleichen Sie Ihre Ergebnisse mit den in Tabelle 39.1 aufgeführten Werten.