

Rastertunnelmikroskopie

Michael Goerz

FU Berlin

Fortgeschrittenenpraktikum A WiSe 2006/2007
20. November 2006

Gliederung

- 1 Einführung
 - Historischer Überblick
 - Konzept, Zielsetzung und Anwendung
- 2 Aufbau und Betrieb
 - Aufbau
 - Betrieb
- 3 Theorie
 - Einfaches Modell
 - Exaktes Modell
- 4 Anwendung und Aussicht
 - Quantum Corrals
 - Manipulation

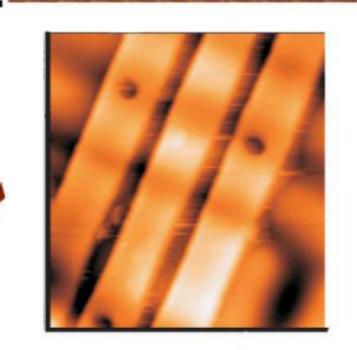
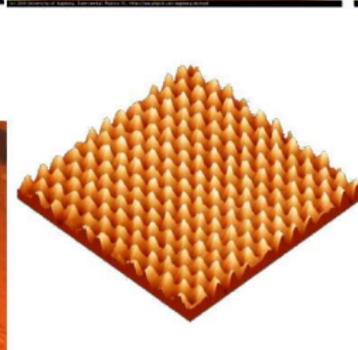
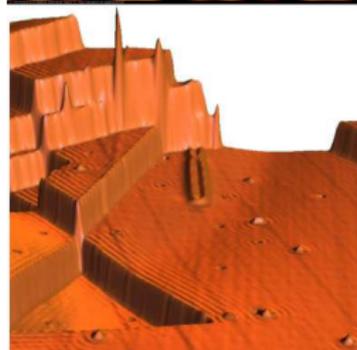
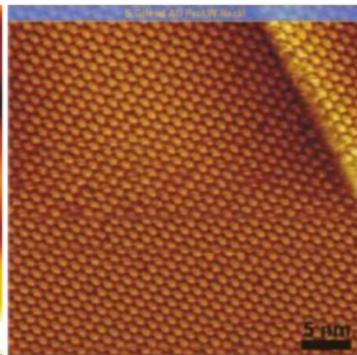
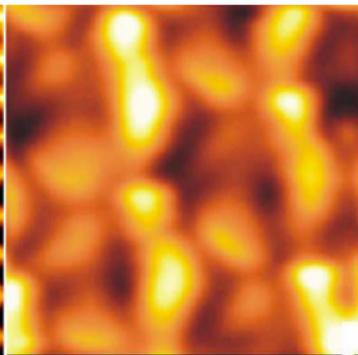
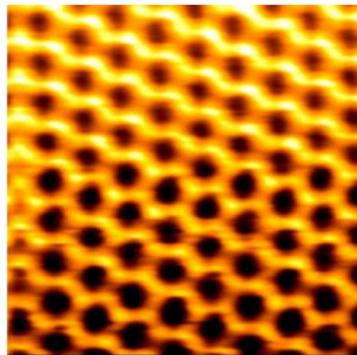
Erfindung des STM

Das Rastertunnelmikroskop (Scanning-Tunneling-Microscope, STM) ist ein Verfahren zur Auflösung von atomaren Strukturen.



- Erfunden 1982 von Gerd Binnig und Heinrich Rohrer am IBM Zürich Research Laboratory
- 1986 Nobelpreis
- Vorarbeiten seit den Anfängen der QM, insb. Bardeen 1961, Young 1971

Bildgalerie



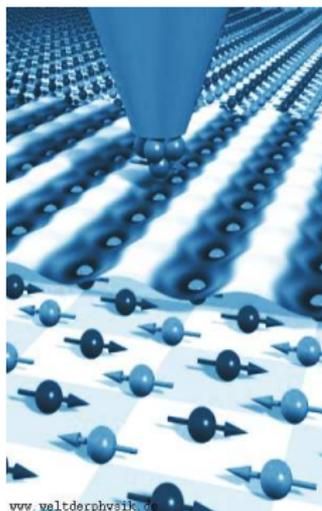
Auflösungsvermögen

- Das Auflösungsvermögen optischer Mikroskope ist etwa auf die Hälfte der verwendeten Wellenlänge beschränkt

$$x_{\min} = \frac{\lambda}{NA} \approx 200 \text{ nm}$$

- Durch Verwendung von Elektronenwellen lässt sich bis in den atomaren Bereich vordringen
- Dennoch ist das STM das höchstaflösendste mikroskopische Verfahren.

Ansatz



- Der Tunneleffekt lässt sich benutzen um den Abstand (im groben Modell) zwischen einer Metallspitze und einer Probe sehr genau zu messen. Dadurch kann man die Topographie der Oberfläche nachfahren.
- Im Gegensatz zur optischen Mikroskopie handelt es sich um einen Scan-Verfahren: es werden punktweise lokale Messungen durchgeführt, die am Computer zu einem Bild zusammengesetzt werden.

Direkte Anwendungen

Vielfältige Anwendung in allen Naturwissenschaften:

Physik

Oberflächenstrukturen, Halbleiter, Nachweis der Quantenmechanik, Orbitale, Festkörperphysik, ...

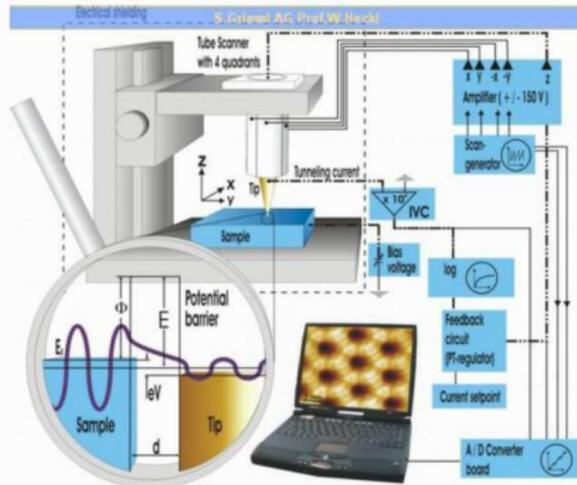
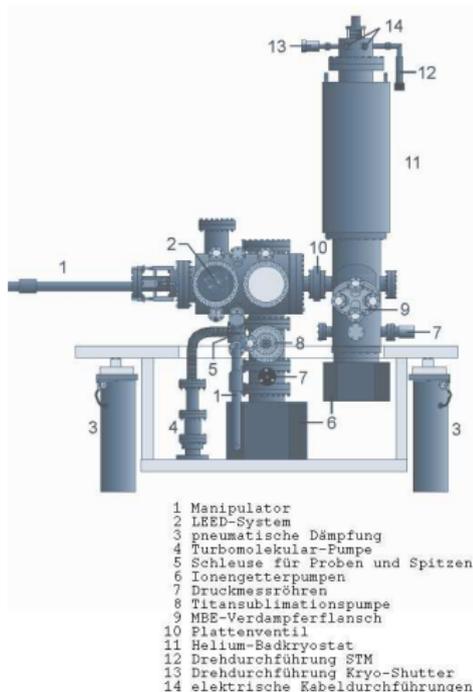
Chemie

Moleküle, Bindungen, Oxidationszustände, Beobachtung chemischer Vorgänge, ...

Biologie

DNA-Strukturen, organische Moleküle, Membrane ...

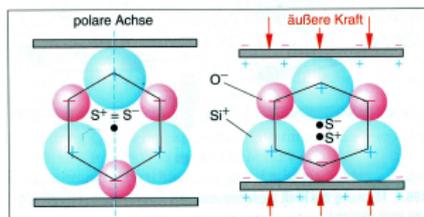
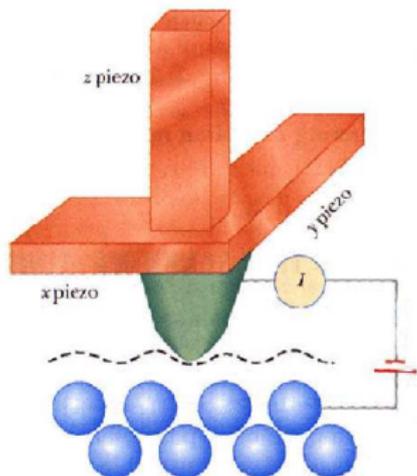
Aufbau eines STM in der Vakuumkammer



<http://www.ep4-of.ruhr-uni-bochum.de/methods/ltrts.html>

http://www.nano.geo.uni-muenchen.de/stm/topics/topics_home.html

Piezosteuerung



- Verformung von Kristallen bewirkt Spannung
- Anlegen von Spannungen bewirkt umgekehrt Verformung

$$\Delta L = E \cdot d_{ij} \cdot L_0$$

mit d_{ij} z.B. 180 pm/V

- Steuerung im Nanometer- und sogar Angstrom-Bereich

Operationsmodi

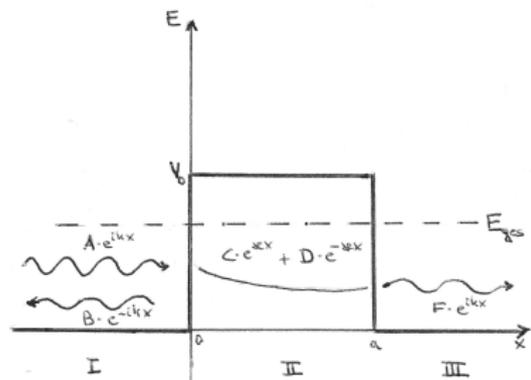
Constant Current Mode

Der Tunnelstrom wird konstant gehalten und die Höhe der Spitze variiert. Die Spitze fährt damit die Topographie ab. Die *relative* Höhe bleibt konstant
Dies ist der „Standardmodus“.

Constant Height Mode

Die Spitze bleibt auf konstanter absoluter Höhe. Die Änderung im Tunnelstrom spiegelt die Topographie wieder.
Schnell, dynamische Messungen; aber nur für flache Oberflächen.

Quantenmechanischer Tunneleffekt



$$\psi_I(x) = e^{ikx} + B e^{-ikx}$$

$$\psi_{II}(x) = C e^{\kappa x} + D e^{-\kappa x}$$

$$\psi_{III}(x) = F e^{ikx}$$

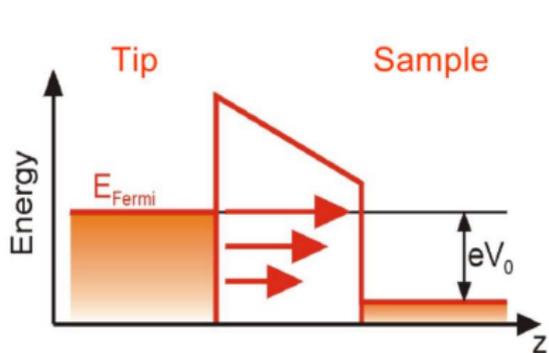
Unter Ausnutzung der Stetigkeitsbedingung: exponentiell abfallende Wellenfunktion in der Potentialbarriere.

⇒ Tunnelwahrscheinlichkeit sinkt exponentiell mit der Breite der Potentialbarriere.

$$I \propto U \cdot k \cdot e^{-\kappa d}$$

Tersoff-Theorie

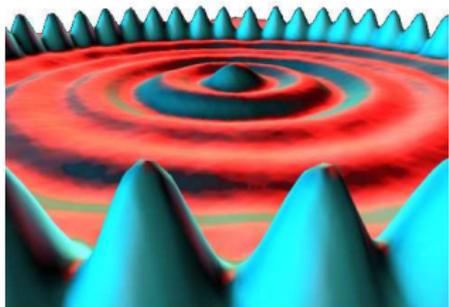
$$I = \frac{2\pi e}{\hbar} \sum_{\alpha, \beta} \left\{ \underbrace{f(E_\alpha) [1 - f(E_\beta + eV)]}_{\text{Spitze} \rightarrow \text{Probe}} - \underbrace{f(E_\beta + eV) [1 - f(E_\alpha)]}_{\text{Probe} \rightarrow \text{Spitze}} \right\} \cdot |M_{\alpha\beta}|^2 \cdot \underbrace{\delta(E_\alpha - (E_\beta + eV))}_{\text{gleiche Energie (elastisch)}}$$



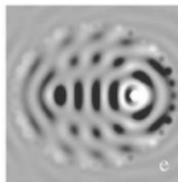
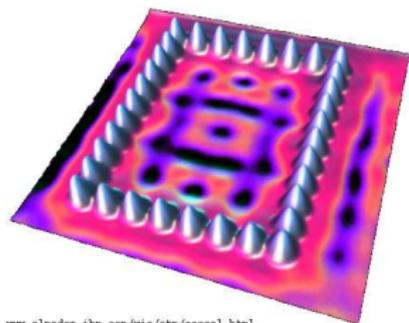
$$M_{\alpha\beta} = \frac{\hbar^2}{2m} \int d\vec{S} (\psi_\alpha^* \nabla \psi_\beta - \psi_\beta \nabla \psi_\alpha^*)$$

Es tunneln die Elektronen um das Fermi-niveau.
 \Rightarrow Das STM bildet die Elektrodichte am Fermi-niveau ab.

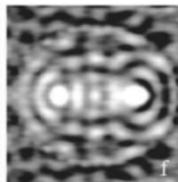
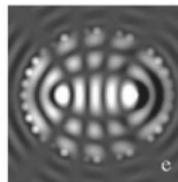
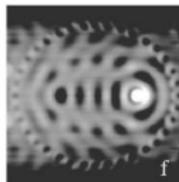
Sichtbarmachung der Quantenmechanik



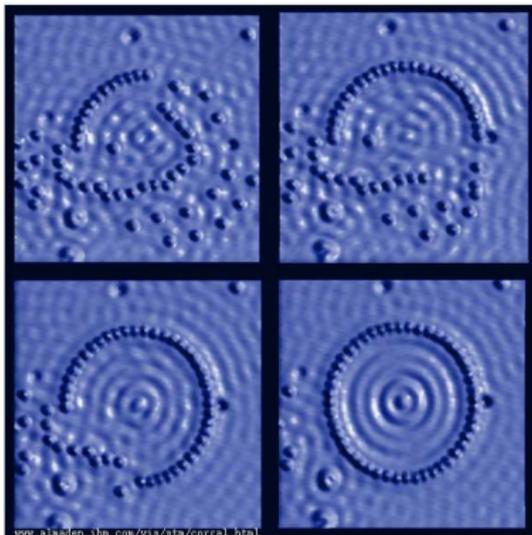
- Stehende Elektronenwellen können sichtbar gemacht werden
- *Particle in a Box*: Crommie, Eigler 1993
- Kondo-Effekt: Manoharan 2000



Rev. Mod. Phys., Vol. 75, No. 3, July 2003



Manipulation einzelner Atome mit Hilfe des STM



Manipulation mittels

- kontrolliertem Kontakt Spitze / Probe
- chemischen Kräften (Van-der-Waals-Kraft)
- elektrostatischen Kräften

Möglichkeiten der Manipulation

