
Rastertunnelmikroskop

Friedrich Schüßler und Volker Karle

5. September 2014

INHALTSVERZEICHNIS

| | | |
|----------|---|----------|
| I | Versuchsprotokoll | 1 |
| 1 | Einführung in die Rastertunnelmikroskopie | 1 |
| 1.1 | Historischer Abriss | 1 |
| 1.2 | Theoretische Grundlagen | 2 |
| 1.2.1 | Überblick | 4 |
| 1.2.2 | Grundlagen der Festkörperphysik | 4 |
| 1.3 | Grundlagen der Festkörperoberflächen | 4 |
| 1.4 | Struktur von Graphit, Gold und MoS ₂ | 5 |
| 2 | Theorie des Quantentunnelns | 7 |
| 2.1 | Mathematische Herleitung von Quantentunneln | 7 |

TEIL I

VERSUCHSPROTOKOLL

1 EINFÜHRUNG IN DIE RASTERTUNNELMIKROSKOPIE

Ein Rastertunnelmikroskop (engl. *scanning tunneling microscope*, **STM**) ist Messinstrument, um Oberflächen auf atomarer Ebene zu visualisieren. Gängige Auflösungen liegen bei 0.1 nm in der Ebene sowie 0.01 nm in der Tiefe. Mit dieser Auflösung ist es schon möglich, einzelne Atome aufzulösen bzw. zu differenzieren. Das RTM kann nicht nur unter Vakuum, sondern auch mit Luft oder Flüssigkeiten verwendet werden. Das Prinzip des RTMs basiert auf dem Quantentunneln, auf welches wir eingehender im Theorieteil eingehen werden.

1.1 HISTORISCHER ABRISS

Die ursprüngliche Idee der Erfinder des RTMs war es nicht, ein Mikroskop zu konstruieren, sondern Spektroskopie in einer Größenordnung von 100 Å durchzuführen [2]. Mit der ersten experimentellen Realisation [12] des Tunnelns mit einer positionierbaren Spitze tauchte das Konzept des Tunnelns in der Festkörperphysik auf, als versucht wurde, durch Vakuum bzw. durch eine Vakuumbarriere zu tunneln [5]. Erst dann wurde festgestellt, dass mit dieser Methode nicht nur Spektroskopie, sondern eine neue Art des Mikroskops entwickelt werden konnte. Diese waren zunächst aufgrund der Vibrationen nicht erfolgreich. Nun sind die Vorteile des Vakuumtunnelns aber evident: Zum einen handelt es sich um die konzeptuell am einfachsten herzustellende Barriere, zum anderen ist ein freier Zugang der Elektroden für die Untersuchung anderer physikalischer und chemischer Prozesse möglich. Die Fragen, die sich in diesem Zusammenhang ergaben und gelöst bzw. beantwortet werden mussten, waren:

1. Wie können die mechanischen Vibrationen, die die Spitze erschüttern und sich gegenseitig aufschaukeln, unterdrückt bzw. verringert werden?
2. Wie stark sind die (Anziehungs-)kräfte zwischen der Spitze und der Probe? Wie sollte die Form der Spitze aussehen und wie ist es möglich eine solche Form auf dieser Skala herzustellen?

1981 führten die Autoren G.Binnig, H.Rohrer, Ch.Gerber und E.Weibel in Zürich zum ersten Mal ein erfolgreiches Tunnelexperiment [5] mit einem justierbarem Vakuum Spalt durch. Ziel war hierbei, das Phänomen des Tunnelns so zu erforschen, um es in der Spektroskopie und andere Methoden einsetzen zu können. Offensichtlich war der schwierige Teil der, die Vibrationen, die vergangene Experimente fehlschlügen ließen, hinreichend zu unterdrücken, um somit das eigentliche Signal noch identifizieren zu können. Dies wurde in dem erwähnten Experiment durch eine Dämpfung des Tunnelbauteils erreicht, und zwar durch einen Schutz von akustischen Rauschen durch eine das Mikroskop umgebende Suspension innerhalb einer Vakuumkammer. Mithilfe von Levitation durch Supraleiter-induzierte Magneten sowie der Steuerung mit Piezoelementen erfolgt das Abrastern einer Probe.

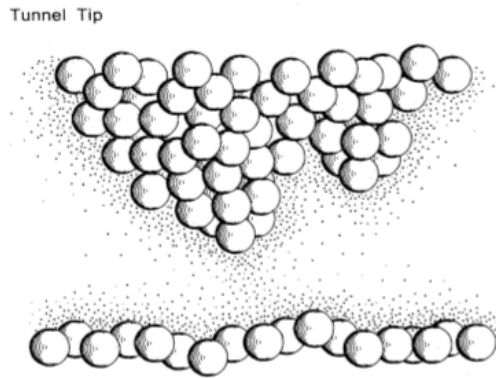


Abbildung 1.1: Schematische Abbildung aus [2] auf der der strukturelle Aufbau der Spitzen und der Probe zu sehen ist.

Der Trick liegt darin, die charakteristischen Frequenzen so zu wählen, dass die Eigenfrequenzen des Materials für Vibrationen weit darüber liegen. Dies ist möglich, indem die Größe des Bauteils sehr klein skaliert wird, somit können sich keine Vibrationen ausbilden. Für die erste Realisation eines RTMs wurde Gerd Binnig und Heinrich Rohrer 1986 der **Nobelpreis für Physik** verliehen. Die Frage nach der Form der Spitze ist komplizierter, da es nicht unbedingt möglich ist, die Spitze als Sphere mit einer bestimmten Krümmung und Radius zu beschreiben, da die Rauheit der Spitze die Existenz vieler kleiner Spitzen implizieren. Diese sogenannten *Minispitzen* reagieren sehr sensitiv auf die anliegende Tunnelstromstärke; die jeweils nächste bildet dann die Verbindung zur Probe (siehe Abbildung 1.1).

Die erste Anwendung, welche die RTMs bekannt machte, war die Oberflächenrekonstruktion von Silizium(111) [4] (siehe Abbildung 1.2). Dabei handelte es sich um ein offenes Problem in der Festkörperphysik. Wie sich später durch die experimentelle Aufarbeitung zeigte, waren die theoretischen Vorhersagen nicht korrekt und mussten korrigiert werden, gerade auch deswegen erlangte die Rastertunnelmikroskopie ab 1985 große Bekanntheit.

Auf ihr baut die gesamte Rastersondenmikroskopie auf, welche in einigen Spielarten in der Zeit danach weiterentwickelt wurde. So war es mit dem *Rasterkraftmikroskop* und dem *optische Rasternahfeldmikroskop* möglich, sogar nichtleitende Proben zu untersuchen, da das Abrastern nicht auf einen geschlossenen Stromkreis basiert, sondern auf Kräften atomarer Ebene (Coulomb, Pauliprinzip). Somit bilden sie die Basis für viele Anwendungen in der Chemie und Biologie.

1993 gelang es M.F. Crommie, C.P. Lutz und D.M. Eigler [7] dann ein *Quantengehege* aufzubauen (engl. *Quantum Corral*). Somit konnten mithilfe des RTMs sogar Interferenzphänomene von Atomen sichtbar gemacht werden (siehe Abbildung 1.3).

[3] [10] [6]

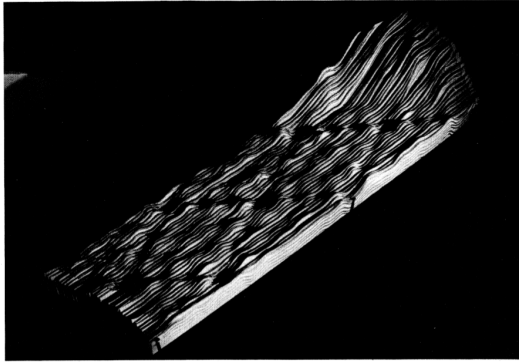


Abbildung 1.2: Erste Anwendung des Rastertunnelmikroskops [4]: Oberflächenrekonstruktion von Silizium(111) (siehe Millersche Indizes im Theorieteil), welches eine komplexe (7x7) Überstrukturzelle besitzt

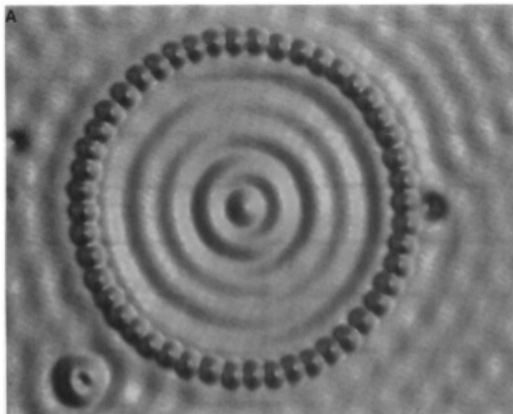


Abbildung 1.3: Die Abbildung zeigt die Visualisierung des Quantumgeheges, welches 1993 von Crommie, Lutz und Eigler mithilfe des RTMs konstruiert werden konnte [7]. Speziell in dieser Abbildung ist eine 48-Eisen-atomige Ring konstruktion zu sehen, welche auf Kupfer(111) aufgebaut wurde. Der Durchschnittsdurchmesser des Rings beträgt 142.6Å.

2 THEORIE DES QUANTENTUNNELNS

Quantentunneln, oder kurz *Tunneln* bezeichnet das quantenmechanische Phänomen, wenn die Durchtrittswahrscheinlichkeit eines Teilchens durch eine Potenzialbarriere nicht null ist, selbst wenn die Energie des Teilchens geringer ist als das Potenzial selbst ($E < V$), was in der klassischen Mechanik nicht möglich wäre. Dies spielt eine wichtige Rolle bei vielen Phänomenen in Natur und Technik, beispielsweise bei der Kernfusion der Sonne, bei der Diode und daher auch beim Transistor und somit bei der Funktionsweise eines Computers an sich, aber auch beim Quantencomputer oder eben in unserem Fall beim RTM. Das Phänomen des Quantentunnelns wurde Anfang des 20ten Jahrhunderts mit der Entdeckung der Quantenmechanik postuliert und Mitte des Jahrhunderts bestätigt.

2.1 MATHEMATISCHE HERLEITUNG VON QUANTENTUNNELN

In den folgenden Ausführungen werden Kenntnisse der Quantenmechanik vorausgesetzt. Betrachten wir zunächst die Zeitunabhängige Schrödingergleichung für ein Teilchen in einer Dimension:

$$\left[\frac{-\hbar^2}{2m} \partial_x^2 + V(x) \right] \psi(x) = E \psi(x) \quad (2.1)$$

$$\Leftrightarrow \left[\frac{-\hbar^2}{2m} \partial_x^2 \right] \psi(x) = [E - V(x)] \psi(x) \quad (2.2)$$

Im Spezialfall wenn $V(x)$ konstant ist, können wir die Gleichung sofort mit planaren Wellen lösen:

$$k^2 = \frac{2m}{\hbar^2} (V - E) \quad (2.3)$$

$$\psi(x) \sim \exp(kx) \quad (2.4)$$

Wenn $V(x)$ nicht konstant ist, können wir mithilfe der WKB-Methode [8] immerhin noch den Transmissionskoeffizienten berechnen, sofern das Potenzial zwischen zwei Rändern x_1 und x_2 eingespannt ist und ausserhalb davon null wird. Dazu setzen wir für die Wellenfunktion $\psi(x) = \exp(\phi(x))$ an, mit einer komplexen Funktion $\phi(x)$.

LITERATUR

- [1] E. Tosatti CD Chen A. Selloni, P. Carnevali.
- [2] Gerd Binnig and Heinrich Rohrer. Scanning tunneling microscopy—from birth to adolescence. *Reviews of Modern Physics*, 59(3):615–625, 1987.
- [3] Gerd Binnig, Heinrich Rohrer, Ch Gerber, and E Weibel. Surface studies by scanning tunneling microscopy. *Physical review letters*, 49(1):57, 1982.
- [4] Gerd Binnig, Heinrich Rohrer, Ch Gerber, and E Weibel. (111) facets as the origin of reconstructed au (110) surfaces. *Surface Science Letters*, 131(1):L379–L384, 1983.

- [5] Gerd Binnig, Heinrich Rohrer, Ch Gerber, and Eddie Weibel. Tunneling through a controllable vacuum gap. *Applied Physics Letters*, 40(2):178–180, 1982.
- [6] C Julian Chen. *Introduction to scanning tunneling microscopy*, volume 227. Oxford University Press New York, 1993.
- [7] MF Crommie, CP Lutz, and DM Eigler. Imaging standing waves in a two-dimensional electron gas. 1993.
- [8] Nanny Fröman et al. Transmission through a real potential barrier treated by means of certain phase-integral approximations. *Nuclear Physics A*, 147(3):606–626, 1970.
- [9] Martin Henzler and Wolfgang Göpel. Oberflächenphysik des festkörpers. *Oberflächenphysik des Festkörpers. Series: Teubner Studienbücher Physik*, ISBN: 978-3-519-03047-8. Vieweg+ Teubner Verlag (Wiesbaden), Edited by Martin Henzler and Wolfgang Göpel, 1, 1991.
- [10] Charles Kittel. *Einführung in die Festkörperphysik*. Oldenbourg Verlag, 2013.
- [11] Sang-il Park and CF Quate. Tunneling microscopy of graphite in air. *Applied physics letters*, 48(2):112–114, 1986.
- [12] WA Thompson and SF Hanrahan. Thermal drive apparatus for direct vacuum tunneling experiments. *Review of Scientific Instruments*, 47(10):1303–1304, 1976.