

Anleitung zum  
Praktikum für Fortgeschrittene

Versuch:  
**Scanning Tunneling Microscopy**

Betreuer:  
**B.Sc. Lienhard Wegewitz**

Institut für Physik und Physikalische Technologien  
Technische Universität Clausthal  
16.02.2011

# Einleitung

In diesem Versuch sollen unterschiedliche Materialien mit einem Rastertunnelmikroskop (engl. Scanning Tunneling Microscope, STM) untersucht werden. Das hier verwendete Rastertunnelmikroskop, eine Entwicklung der Firma Nanosurf, ermöglicht das Mikroskopieren an Luft. Ziel dieses Versuches ist es, die grundlegenden Fähigkeiten eines STM kennenzulernen und anzuwenden.

## Das Rastertunnelmikroskop

### Messprinzip

Das Messprinzip des STM beruht auf dem quantenmechanischen Tunneleffekt. Eine dünne Metallspitze und eine elektrisch leitfähige Probe werden einander bis auf 3 bis 10 Å angenähert, so dass die Wellenfunktionen der Spitze mit denen der Probe überlappen können. Idealerweise wird die Spitze von einem einzelnen Atom gebildet. Nach dem Anlegen einer Spannung misst man einen exponentiell vom Abstand  $d$  abhängigen Strom tunnelnder Elektronen, der in einer einfachen Abschätzung

$$I(d) \approx \exp(-A \sqrt{\phi} d) \quad (1)$$

ist.  $A \approx 1 \text{ \AA}^{-1} \text{ eV}^{-\frac{1}{2}}$  ist eine Konstante und  $\phi$  ist die Barrierenhöhe des Tunnelkontakts, die der gemittelten Austrittsarbeit (nur in dieser Näherung) von Spitze und Probe nahe kommt. Der Strom wird hauptsächlich von Elektronen nahe der Fermikante  $E_F$  getragen, für die die effektive Barrierenhöhe am geringsten ist. Die im Idealfall monoatomare Spitze wird mit Hilfe von piezokeramischen Stellgliedern über die Probe gerastert. Dabei kann über einen Regelkreis die Wechselwirkungsgröße konstant gehalten werden. Die Stellgröße des Regelkreises, dargestellt in Abhängigkeit der x- und y-Position der Sonde, gibt ein Konturbild konstanter Wechselwirkungsgröße wieder. Für homogene Proben gibt dies in guter Näherung die Proben topographie wieder. Um das Verschmutzen der Oberfläche zu verhindern, werden die Messungen meistens im Vakuum durchgeführt. Mit dem im Praktikum verwendeten STM der Firma Nanosurf läßt sich an Luft trotzdem eine atomare Auflösung bei Graphit erzielen, da Graphit auch an Luft leicht zu präparieren ist.

### Der Regelkreis

Um den Abstand der Tunnelspitze zur Probenoberfläche konstant zu halten, wird der Tunnelstrom durch einen elektronischen Regelkreis konstant gehalten. Der Regelkreis misst den momentanen Tunnelstrom (Ist-Wert) und vergleicht ihn mit dem vorher eingestellten Wert (Soll-Wert). Weichen diese voneinander ab, versucht der Regler über seinen Ausgang (Stellwert), die Differenz zu eliminieren. Die Regelgeschwindigkeit läßt sich über zwei Regelparameter beeinflussen, den integralen Anteil (I-Teil) und den proportionalen Anteil (P-Teil). Der I-Teil bestimmt hauptsächlich die Geschwindigkeit, mit der der Regler auf Abweichungen reagiert: Ein großer I-Wert bedeutet eine hohe Regelgeschwindigkeit. Der P-Teil legt fest, wie stark der Regler auf Abweichungen reagiert: Ein großer P-Wert bedeutet eine starke Reaktion des Reglers.

Die Reglereinstellungen hängen dabei vom gesamten System ab und lassen sich deshalb nicht beliebig hoch einstellen. Außerdem stellt der Regelkreis an sich schon ein schwingfähiges System mit einer Grenzfrequenz dar, oberhalb derer es zu Eigenschwingungen kommt. Diese Eigenschwingungen können Spitze und Probe beschädigen. Die Rastergeschwindigkeit kann die Abbildung der Topographie sehr stark beeinflussen, eine zu hohe Geschwindigkeit könnte z.B. eine einwandfreie Abbildung verhindern. Man muß auch bedenken, daß die Reglergeschwindigkeit eng mit der Rastergeschwindigkeit gekoppelt ist. Die Änderungsvorgaben werden über die Piezoelemente, die die Tunnelspitze in die drei Raumrichtungen bewegen können, übertragen.

## **Die Tunnelspitze**

Die verwendeten Tunnelspitzen haben gemäß elektronenmikroskopischer Aufnahmen Krümmungsradien von einigen 10 nm an der Spitze. Da STMs sich aber durch extrem hohe atomare Auflösung auszeichnen, läßt sich dies nur durch das Vorhandensein von sogenannten Minispitzen erklären. Das heißt, daß fast der gesamte Tunnelstrom nur über die zur Probe allernächste Minispitze fließt, daher kommt dann die hohe laterale Auflösung. Die Anordnung dieser Minispitzen auf der Tunnelspitze ist aber keineswegs statisch, sondern kann sich im Laufe der Messungen immerwieder von alleine ändern. Dies kann sowohl positive wie negative Auswirkungen auf die Auflösung haben.

## **Der Versuch**

### **Vorbereitung**

Zur Vorbereitung auf den Versuch und das Quiz informieren Sie sich bitte insbesondere über folgende Fragen:

- Wie lautet die Theorie des Tunneleffekts allgemein und besonders in Bezug auf das STM?
- Wie ist ein STM aufgebaut und wie funktioniert es?
- Für welche Proben ist Tunnelmikroskopie möglich und wie sieht es mit Alternativen aus?
- Welche Messmodi sind mit dem STM möglich? Überlegen Sie sich die Vor- und Nachteile dieser Modi.
- Inwiefern ist Spektroskopie mit dem STM möglich?
- Mit welchen Methoden lassen sich die Spitzen herstellen?

## Versuchsdurchführung

1. Machen Sie sich mit der Bedienung des STMs vertraut. Die notwendigen Schritte bis zum ersten Tunnelbild, z.B. Einbau der Probe und der Spitze und Bedienung der Software lesen Sie bitte im Handbuch des Herstellers nach [2].
2. Versuchen Sie, die Graphitoberfläche rauscharm abzubilden, dies gibt Aufschluss über die Güte ihrer Spitze. Nehmen Sie danach die Graphitoberfläche in beiden Messmodi und bei unterschiedlichen Rastergeschwindigkeiten auf.
3. Führen Sie an verschiedenen Positionen der Graphitoberfläche spektroskopische Messungen aus.
4. Bilden Sie die Goldoberfläche ab. Ein Strombild sollte im Gegensatz zum Graphit nicht erstellt werden. Warum? Untersuchen Sie Gold außerdem spektroskopisch.
5. Setzen Sie die Tantal-sulfid-Probe ein und vermessen Sie deren Oberfläche bei konstantem Tunnelstrom, sowie spektroskopisch.

## Aufgaben und Auswertung

Lösen Sie für die Auswertung des Versuchs im Protokoll folgende Aufgaben:

1. Schätzen sie mit Hilfe von Gleichung 1 die Änderung des Tunnelstroms ab, wenn sich der Abstand um 0,1 nm verkleinert ( $d = 1 \text{ nm}$ ,  $\phi = 4 \text{ eV}$ ).
2. Erläutern sie kurz das Prinzip eines Rasterkraftmikroskops.
3. Versuchen Sie die Gitterkonstante vom Graphit zu bestimmen. Vergleichen Sie den Wert mit Literaturwerten und diskutieren sie den Unterschied.
4. Vergleichen Sie die Bilder der beiden Messmodi (nur Graphit) und beurteilen Sie den Einfluß verschiedener Rastergeschwindigkeiten auf den Bildkontrast.
5. Bestimmen Sie die Stufenhöhen auf der Goldoberfläche und vergleichen Sie diese mit der Gitterkonstanten aus der Literatur.
6. TaS<sub>2</sub> Oberflächen zeigen das Phänomen der Charge Density Waves [3, 6]. Versuchen sie die Wellenlänge der CDWs zu ermitteln und die reale Gitterkonstante des Tantal-sulfids zu bestimmen. Wie beurteilen sie die ermittelten Werte in Bezug auf die Literatur?
7. Vergleichen Sie anhand der Spektroskopiemessungen an den Oberflächen die Leitfähigkeit von Graphit, Gold und Tantal-sulfid.

## Literatur

- [1] G. Binnig, H. Rohrer, C. Gerber et al.: *Tunneling through a controllable vacuum gap*, Applied Physics Letters 40 (1982) 178-180
- [2] Anleitung zum easyScan STM der Firma Nanosurf
- [3] R. Wiesendanger: *Scanning Probe Microscopy and Spectroscopy - Methods and Applications*, Cambridge University Press 1994
- [4] H.-J. Güntherodt, R. Wiesendanger: *Scanning Tunneling Microscopy I*, Springer Series in Surface Science 20, Springer Verlag 1992
- [5] R. J. Colton, A. Engel, J. E. Frommer, H. E. Gaub, A. A. Gewirth, R. Guckenberger, W. M. Heckl, B. Parkinson, J. P. Rabe: *Procedures in Scanning Probe Microscopies*, Wiley 1998
- [6] B. Burk, R. E. Thomson et al., Physical Review Letters 66 (1991) 3040-3043