

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	2
2	Topografische Abbildung von Gold	2
2.1	Theorie	2
2.2	Versuchsaufbau	3
2.3	Messverfahren	3
2.4	Messergebnis	5
2.5	Interpretation	5
3	I(z)-Kurve von Gold	6
3.1	Theorie	6
3.2	Messaufbau	6
3.3	Messvorgang	6
3.4	Messergebnis	7
3.5	Interpretation	7
4	Abbildung von Graphit mit atomarer Auflösung	8
4.1	Theorie	8
4.2	Messaufbau	8
4.3	Messvorgang	8
4.4	Messergebnis	10
4.5	Interpretation	10
5	Anhang	11

1 Einleitung

Die in diesem Kurzprotokoll beschriebenen Experimente wurden am 07.06.2017 an der TU Wien im Rahmen des Praktikums Laborübungen III (134.126) von *Kassandra Kunz* und *Helmut Hörner* durchgeführt. Sie beschäftigen sich mit der Rastertunnelmikroskopie von Gold und Graphit.

2 Topografische Abbildung von Gold

2.1 Theorie

Beim verwendeten Scanning Tunneling Microscope (STM) wird ein Platindraht mit (möglichst) einatomarer Spitze piezomechanisch so nahe an eine leitfähige Probe (in diesem Fall: Gold) angenähert, bis sich Spitze und Probe beinahe berühren. Wenn Spitze und Probe nahe genug beisammen sind, beginnen einzelne Elektronen aufgrund des Tunneleffekts die Potentialbarriere zu überwinden.

Zur Berechnung des Tunnelstroms geht man von der zeitseparierten Schrödingergleichung aus:

$$\left(-\frac{\hbar^2}{2m}\nabla^2 + V\right)\psi = E\psi \quad (1)$$

Löst man die Gleichung für eine rechteckige Potentialbarriere mit geringer Potentialdifferenz, so ergibt sich innerhalb des Potentialwalls die folgende Lösung:

$$\psi = \psi_0 \cdot e^{-\alpha x} \quad (2)$$

mit

$$\alpha = \frac{1}{\hbar}\sqrt{2m_e(V - E)} \quad (3)$$

Da der Erwartungswert der Aufenthaltswahrscheinlichkeit proportional zum Quadrat des Betrags der Wellenfunktion ist, ergibt sich daraus für die Durchtunnelwahrscheinlichkeit der Elektronen (und somit für den Tunnelstrom):

$$p_{\text{tunnel}} \propto I_{\text{tunnel}} \propto e^{-2\alpha x} \quad (4)$$

Im folgenden Experiment wird dieser Tunnelstrom durch piezomechanische Steuerung der Spitzenhöhe mittels eines PI-Reglers konstant gehalten ("Konstantstrommethode"). Die Spitze wird zeilenweise über die Probe bewegt, und der beschriebenen Regelmechanismus bewirkt, dass sie der Oberflächentopologie in konstantem Abstand folgt. Aus den Steuersignalen für die Spitze kann die Oberflächentopologie bei "Abrasterung" der Oberfläche ermittelt und softwaremäßig dargestellt werden.

2.2 Versuchsaufbau

- Der Nanosurf Easyscan 2 Controller [EASYSCAN2] war mittels USB-Kabel an den Mini-PC [ESPRIMO] angeschlossen.
- Der STM Messkopf [NAIOSTM] war mit dem Easyscan 2 Controller [EASYSCAN2] verbunden.
- Der STM Messkopf [NAIOSTM] war auf einem Moosgummiring platziert, welcher sich auf einer Steinplatte befand.

2.3 Messverfahren

- Die Easyscan 2 Software [ESS] wurde auf dem Mini-PC [ESPRIMO] gestartet.
- Eine Flachzange, ein Seitenschneider, zwei Pinzetten und der STM-Probenhalter wurden mit 2-Propanol gereinigt.
- Ein 10 mm kurzes Stück Platindraht wurde abgeschnitten.
- Das kurze Platindrahtstück wurde mit dem Seitenschneider in spitzem Winkel abgerissen, damit sich eine einatomare Spitze bildet.
- Das so angespitzte Platindrahtstück wurde in den STM Messkopf [NAIOSTM] eingesetzt.
- Eine Goldprobe (die auf einer magnetischen Platte angeklebt war) wurde magnetisch am Probenhalter angebracht.
- Der Probenhalter wurde in STM Messkopf [NAIOSTM] eingelegt, so dass die Platindrahtspitze nicht berührt wurde.
- Der Probenhalter wurde vorsichtig manuell auf ca. 1 mm an die Probe herangeschoben.
- Der Probenhalter wurde (unter ständiger Beobachtung von Spitze und Probe) mittels der "Advanve"-Funktion der Easyscan Software [ESS] weiter angenähert, ohne dass sich Spitze und Probe berührten.

- Folgende Scanparameter wurden eingestellt:

ScanSize = 200 nm

Time/Line = 0,2 s

Points = 128

Rotation = 0°

Setpoint = 1 nA

P – Gain = 1000

D – Gain = 0

I – Gain = 2000

TipVoltage = 49,1 mV

- Die endgültige Annäherung der Spitze an die Probe wurde mit der “Approach”-Funktion initiiert.
- Nach Start des Scans wurde der Scanbereich ein wenig verschoben, um eine geeignete Stelle zu abbilden.
- Folgende Scanparameter wurden verändert, um die Bildqualität zu erhöhen:

ScanSize = 200 nm

Time/Line = 0,5 s

Points = 256

- Der Scan wurde mit “Finish” regulär beendet.
- Das fertige Bild wurde nach Beendigung des Scans mit der “Export”-Funktion als PNG-Datei gesichert.

2.4 Messergebnis

Abbildung 1 zeigt den STM-Scan der Goldoberfläche.

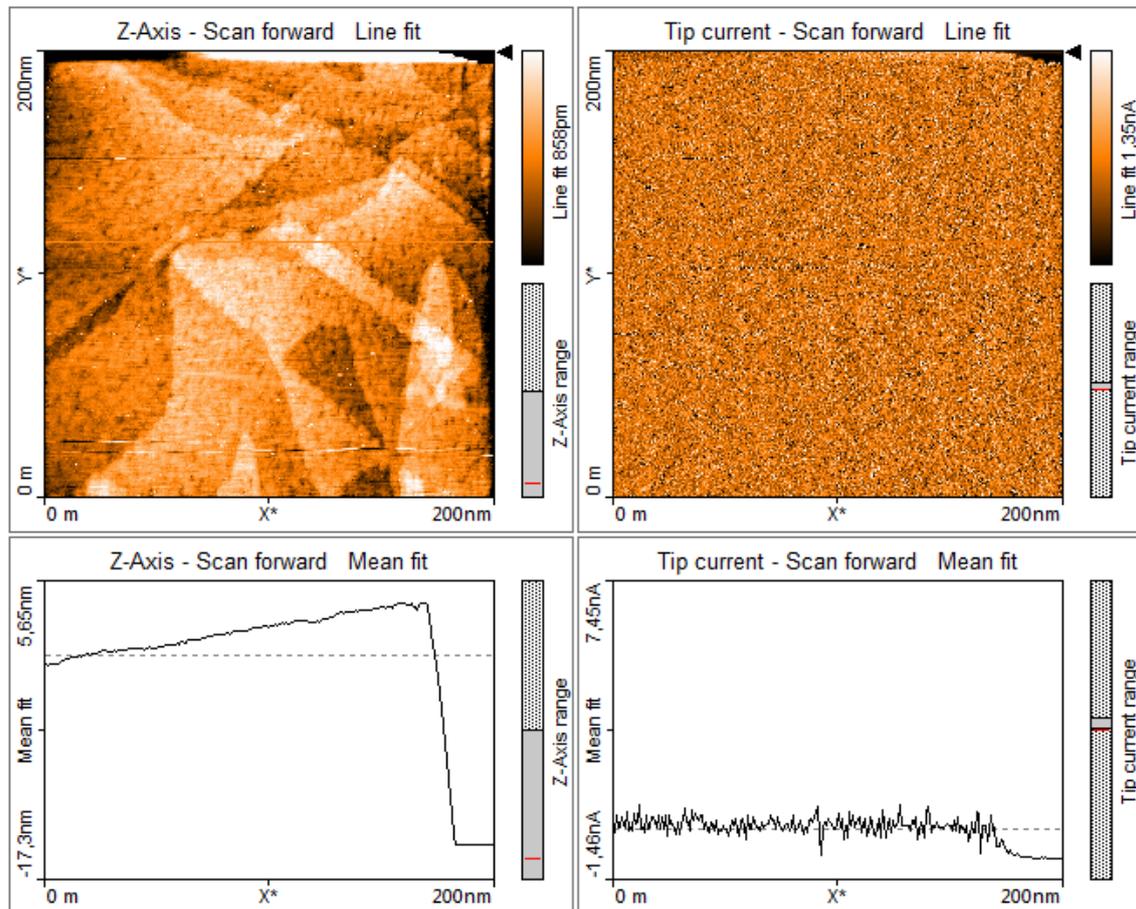


Abbildung 1: STM-Abbildung einer Goldoberfläche bei Konstantstromscan. $ScanSize = 200\text{ nm}$, $Time/Line = 0,5\text{ s}$, $Points = 256$

2.5 Interpretation

In der topologischen Abbildung (linkes oberes Teilbild von Abbildung 1) erkennt man geschichtete Strukturen, die die Stufenkanten der sich aus der fcc-Kristallgitterstruktur mit ABCA-Stapelfolge ergebenden Schichtungen darstellen dürften. Während die Schichtstrukturen in der linken oberen Hälfte so aussehen wie erwartet, sind die Strukturen in der rechten unteren Hälfte eher ungewöhnlich.

Im rechten oberen Teilbild, das den Tunnelstrom in ein Bild übersetzt, sind keine spezifischen Strukturen zu erkennen, was erwartet wurde, da das Material homogen ist.

3 I(z)-Kurve von Gold

3.1 Theorie

Wie in Kapitel 2.1 erläutert, besteht zwischen dem Abstand z und dem Tunnelstrom I_{tunnel} ein exponentieller Zusammenhang (siehe Gleichung 4). Dies bedeutet, dass prinzipiell die Potentialhöhe ($V - E$) aus der $I(z)$ Kurve abgeleitet werden kann:

Legt man durch die Messpunkte einen Regressionskurve die dem Gesetz

$$I_{tunnel} = A \cdot e^{-2\alpha x} \quad (5)$$

folgt, so kann man den Wert von α abschätzen. Durch Umformung von Gleichung 3 bekommt man schließlich:

$$V - E = \frac{\alpha^2 \hbar^2}{2m_e} \quad (6)$$

3.2 Messaufbau

Der Messaufbau blieb unverändert.

3.3 Messvorgang

- Die Easyscan Software [ESS] wurde in den Spektroskopie-Modus umgestellt
- Im letzten Scanbild (siehe Abbildung 1) wurde ein eher hell dargestellter Punkt ungefähr in der Mitte des Bildes selektiert.
- Der Spektroskopie-Scan wurde gestartet

3.4 Messergebnis

Abbildung 2 zeigt den Verlauf des Tunnelstroms in Abhängigkeit vom Spitzenabstand, einmal beim Absenken, einmal beim Entfernen der Spitze.

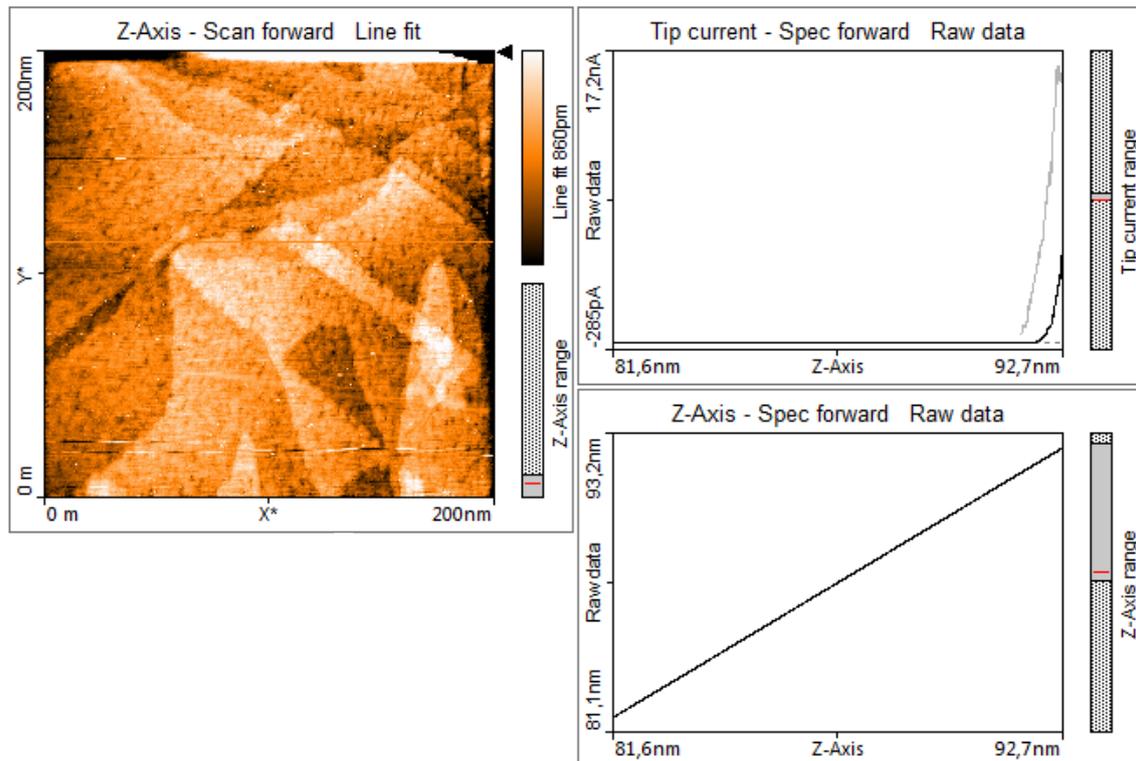


Abbildung 2: Tunnelstrom in Abhängigkeit vom Abstand der Spitze bei einer Goldprobe (rechtes oberes Diagramm).

3.5 Interpretation

Wie man im rechten oberen Diagramm der Abbildung 2, welches den Tunnelstrom in Abhängigkeit vom Spitzenabstand zeigt, erkennt, besteht zwischen Abstand und Tunnelstrom ein exponentieller Zusammenhang, was mit den theoretischen Überlegungen, die zu Gleichung (4) geführt haben, übereinstimmt.

Eine Berechnung der Potentialhöhe war leider nicht möglich, da das Dateiformat, in dem die Messwerte gespeichert wurden, nicht dokumentiert ist.

4 Abbildung von Graphit mit atomarer Auflösung

4.1 Theorie

Zur Theorie siehe Kapitel 2.1.

4.2 Messaufbau

Der Messaufbau blieb unverändert.

4.3 Messvorgang

- Die Easyscan Software [ESS] wurde wieder in den Imaging-Modus umgestellt
- Der Probenhalter wurde durch mehrfaches Betätigen der “Retract”-Schaltfläche von der Probe entfernt.
- Der Probenhalter wurde vorsichtig entnommen.
- Da dabei versehentlich die Spitze berührt wurde, musste die Spitze aus dem Messkopf [NAIOSTM] entfernt werden. Gemäß der Beschreibung in Kapitel 2.3 wurde eine neue Spitze gefertigt und eingesetzt.
- Die Goldprobe wurde vom Probenhalter entfernt.
- Eine Graphitprobe (die auf einer magnetischen Platte angeklebt war) wurde magnetisch am Probenhalter angebracht.
- Der Probenhalter wurde in den STM Messkopf [NAIOSTM] eingelegt, so dass die Platindrahtspitze nicht berührt wurde.
- Der Probenhalter wurde vorsichtig manuell auf ca. 1 mm an die Probe herangeschoben.
- Der Probenhalter wurde (unter ständiger Beobachtung von Spitze und Probe) mittels der ”Advanve”-Funktion der Easyscan Software [ESS] weiter angenähert, ohne dass sich Spitze und Probe berührten.

- Folgende Scanparameter wurden eingestellt:

ScanSize = 10 nm

Time/Line = 0,2 s

Points = 128

Rotation = 0°

Setpoint = 1 nA

P – Gain = 1000

D – Gain = 0

I – Gain = 2000

TipVoltage = 49,1 mV

- Die endgültige Annäherung der Spitze an die Probe wurde mit der “Approach”-Funktion initiiert.
- Der Scan wurde mit “Finish” regulär beendet.
- Das fertige Bild wurde nach Beendigung des Scans mit der “Export”-Funktion als PNG-Datei gesichert.

4.4 Messergebnis

Abbildung 3 zeigt den STM-Scan der Graphitoberfläche.

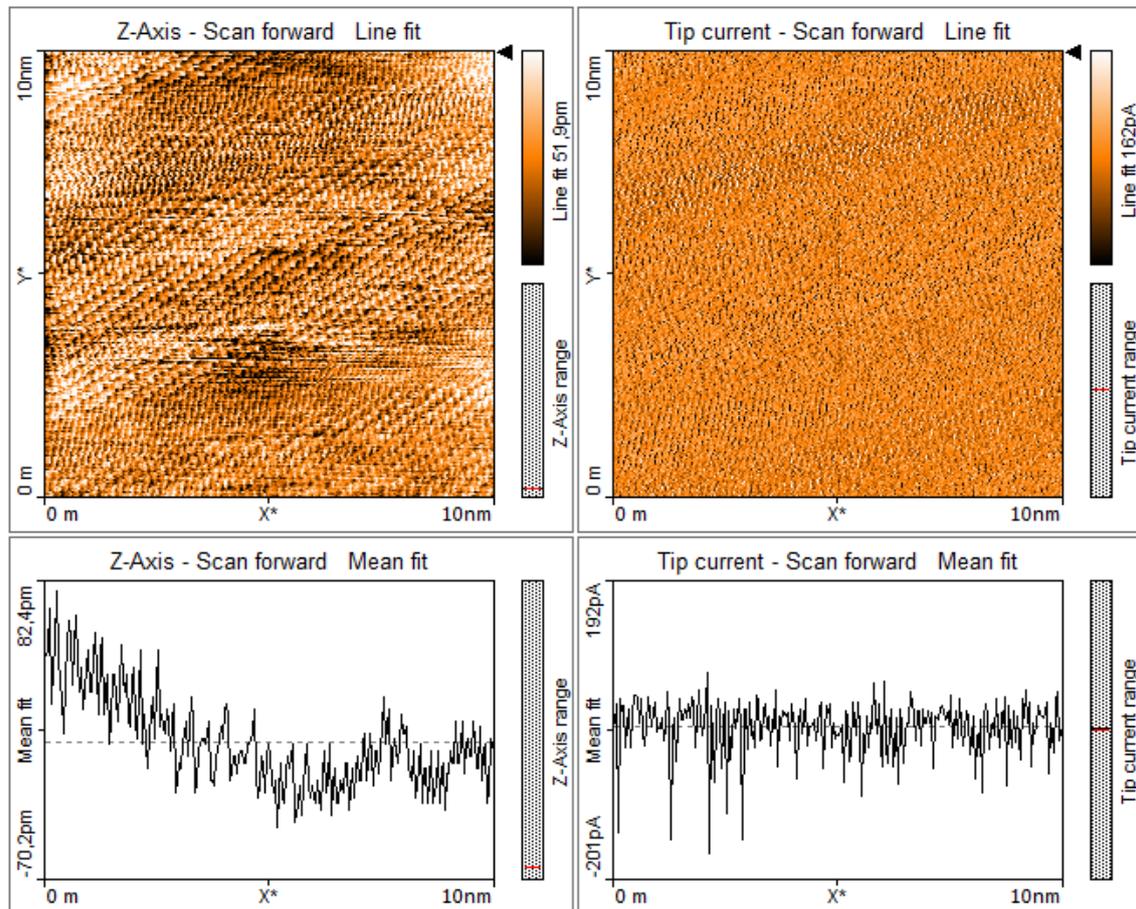


Abbildung 3: STM-Abbildung einer Graphitoberfläche bei Konstantstromscan.
 $ScanSize = 10 \text{ nm}$, $Time/Line = 0,2 \text{ s}$, $Points = 128$

4.5 Interpretation

Die Qualität des Scans ist mangelhaft, was vermutlich an einer nicht optimal einatomaren Spitze liegt. Ein Austausch der Nadel und ein erneuter Scan wurden versucht, dies ergab jedoch ein noch mangelhafteres Bild. Immerhin kann man in Abbildung 3 Strukturen erkennen, die in der Größenordnung der erwarteten Graphitkristallstruktur liegen:

Bei Graphit sind die C-Atome in einer hexagonalen Struktur angeordnet, wobei jedes zweite Atom im Hexagon eine starke Bindung zur nächsten (versetzten) Atomlage hat

und daher auf dem STM-Scan nicht sichtbar ist. Der Abstand zweier benachbarter, im STM-Bild sichtbarer Atome beträgt laut Literatur 246 pm (vgl. [Napetschnig, S. 21]). Daher sollten auf einem Scanbereich von 10 nm ca. 40 hell/dunkel-Übergänge zu sehen sein. Das deckt sich mit Abbildung 3.

Die Qualität der Abbildung erlaubt leider nicht, den Abstand der C-Atome aus dem Scan zuverlässig zu bestimmen. Geht man von einem Abstand von 246 pm aus, dann berechnet sich aus dem sichtbaren Atomabstand d_{sichtb} der tatsächliche Atomabstand d an Hand der Geometrie eines Hexagons mittels folgender Formel:

$$d = \frac{d_{sichtb}}{2 \cdot \cos(30^\circ)} \quad (7)$$

5 Anhang

Verwendetes Equipment

[EASYSKAN2]	Nanosurf Easyscan 2 Controller
[NAIOSTM]	Nanosurf Naio STM Scanning Tunneling Microscope
[ESS]	Nanosurf Easyscan 2 Software, installiert auf [ESPRIMO]
[ESPRIMO]	Fujitsu ESPRIMO Q920 Barebone Mini-PC mit Windows XP

Abbildungsverzeichnis

1	STM-Abbildung einer Goldoberfläche bei Konstantstromscan. $ScanSize = 200$ nm, $Time/Line = 0,5$ s, $Points = 256$	5
2	Tunnelstrom in Abhängigkeit vom Abstand der Spitze bei einer Goldprobe (rechtes oberes Diagramm).	7
3	STM-Abbildung einer Graphitoberfläche bei Konstantstromscan. $ScanSize = 10$ nm, $Time/Line = 0,2$ s, $Points = 128$	10

Literatur

[Napetschnig]	E. Napetschnig: Rastertunnelmikroskop (STM). Laboranleitung, TU-Wien, März 2000.
---------------	--