



FAKULTÄT FÜR PHYSIK
PHYSIKALISCHES PRAKTIKUM FÜR FORTGESCHRITTENE
PRAKTIKUM MODERNE PHYSIK

Gruppe Nr. 108

Kurs: Mo Mi

WS 2012 / 2013

Versuch: Raster-Tunnel-Mikroskopie

Namen: Tobias Renz

Raphael Schmager

Assistent: Vertretung von: Moritz Peter

durchgeführt am: 05. November 2012

Protokollabgabe am: _____

Note gesamt + - 0

Datum: _____

anerkannt: _____

Bemerkung:

Physikalisches Praktikum für Fortgeschrittene 1

Raster-Tunnel-Mikroskopie

Protokoll von
Tobias Renz und **Raphael Schmager**

Gruppe: **108**

Durchgeführt am 05. November 2012

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	2
2	Rastertunnelmikroskop	2
3	Theoretische Beschreibung	3
3.1	Das Bändermodell	3
3.2	Der Tunneleffekt	4
4	Probenmaterialien	5
4.1	Graphit	6
4.2	Gold	7
5	Fragen zur Vorbereitung	8
5.1	Bedingungen an die Materialien bei Untersuchung an Luft	8
5.2	Informationen der RTM-Bilder	9
5.3	Veränderung des Tunnelstroms und der Tunnelspannung	9
5.4	Anzahl der Elektronen bei 1nA	9
5.5	Einfluss adsorbierter Wassermoleküle und Gase	10
5.6	Atomare Auflösung auf Graphit und auf Gold	10
5.7	Schwierigkeiten des Piezomaterials	10
5.8	Strom-Spannungs-Linien	11
6	Durchführung und Auswertung der Aufgaben	11
6.1	Präparation einer Tunnelspitze und weitere Messvorbereitungen	11
6.2	NanoGrid	12
6.3	Gold	13
6.3.1	Untersuchung der Oberfläche	13
6.3.2	Strom-Spannungskennlinie	14
6.4	Graphit	14
6.4.1	Atomare Auflösung der HOPG-Oberfläche	14
6.4.2	Variation der verschiedenen Parameter	16
6.5	Strom-Spannungs-Kennlinie	18
6.6	Abhängigkeit des Tunnelstroms	19
7	Quellen	21

1 Einführung

Im diesem Versuch geht es um das Kennenlernen des Raster-Tunnel-Mikroskops. Dieses ist weit, in vielen Wissenschaftszweigen verbreitet. Im Praktikumsversuch sollen durch die praxisnahe Auseinandersetzung die Vorzüge und vor allem die Grenzen dieser Apparatur entdeckt werden.

2 Rastertunnelmikroskop

Zunächst jedoch erst einmal zum Raster-Tunnel-Mikroskop selbst. Hierbei wird mit Hilfe einer Spitze, die nur wenige Å über eine Probe fährt, deren Oberflächentopographie bestimmt. Der Abstand ist gerade so groß, dass es zwischen den Materialien eine Potentialbarriere gibt, die nicht überwunden werden kann. Durch anlegen einer Spannung (Tunnelspannung) zwischen Spitze und Probe herrscht eine Potentialdifferenz, welche Elektronen aus besetzten Zuständen im Probenmaterial zu unbesetzten Zuständen in der Spitze tunneln lässt.

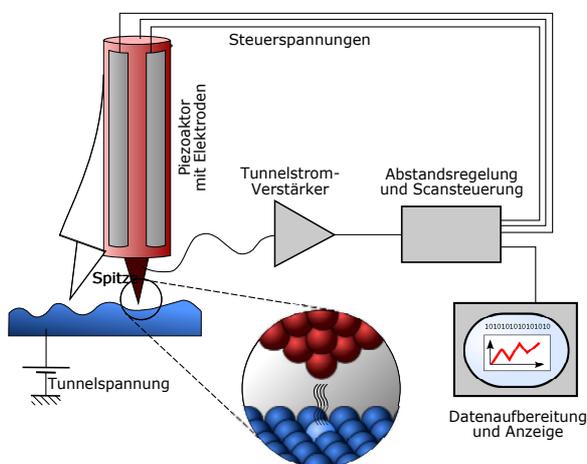


Abbildung 1: Schema eines Raster-Tunnel-Mikroskops

Die Spitze fährt nun entlang der Probenoberfläche und rastert diese ab. Dabei wird der Tunnelstrom konstant gehalten. Durch eine entsprechende Feinmechanik (Piezoelemente¹) wird der Abstand der Spitze über der Oberfläche so variiert, dass der Tunnelstrom konstant bleibt.

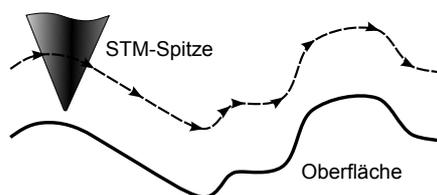


Abbildung 2: Konstanter Abstand der Spitze

¹Piezoelemente besitzen eine spannungsabhängige Länge

3 Theoretische Beschreibung

3.1 Das Bändermodell

Gehen zwei Atome eine Bindung ein, so verbinden sich die äußeren Elektronenorbitale zu einem neuen Molekülorbital. Die durch neue Anordnung um die Atomkerne entstehen auch neue, leicht andere Energieniveaus. Bringt man nun eine große Anzahl (gleicher) Atome zusammen, so entstehen für jede chemische Bindung zwei neue Energiebänder. Man bezeichnet diese als Energiebänder. Zwischen den einzelnen Energiebändern befinden sich die sogenannten Bandlücken. Das bedeutet energetisch verbotene Bereiche, in denen sich keine Energieniveaus befinden.

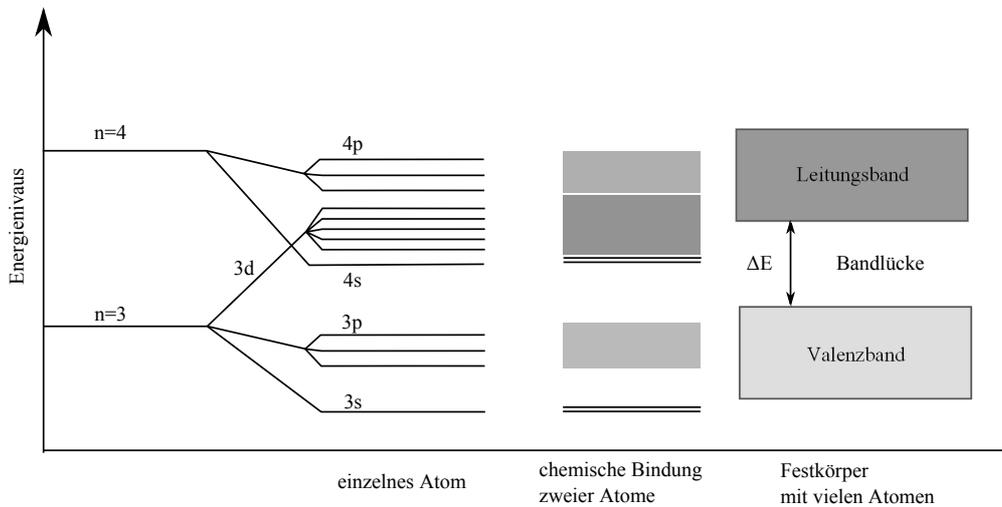


Abbildung 3: Entstehung der Energiebänder

Je nach Besetzung der Bänder können Festkörper in Isolatoren, Halbleiter und Leiter unterteilt werden. Dabei ist das Valenzband das, bei einer Temperatur von 0K, am höchsten voll besetzte Energieband. Das energetisch darüber liegende Band wird Leitungsband genannt. Dort können sich die Elektronen frei bewegen.

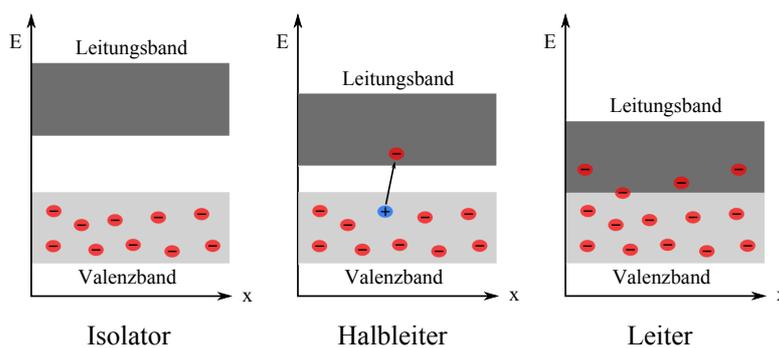


Abbildung 4: Isolatoren, Halbleiter und Leiter im Bändermodell

Bei einer Temperatur von 0K füllen die vorhandenen Elektronen die vorhandenen Energieniveaus lückenlos von unten bis zu einer Grenze E_F , der Fermienergie, auf. Die Fermienergie

entspricht also dem bei $T=0K$ energiereichsten Elektron. Die Verteilung wird beschrieben durch die sogenannte Fermi-Dirac-Verteilung:

$$f_F(E) = \frac{1}{1 + e^{\left(\frac{E-E_F}{k_B T}\right)}} \quad (1)$$

Betrachtet man dagegen eine Temperatur $T>0K$, so können aufgrund der thermische Bewegung nicht mehr alle Plätze unterhalb der Fermienergie besetzt sein. Elektronen müssen also Energiezustände größer als die der Fermienergie einnehmen und gelangen demnach vom Valenz- ins Leitungsband. Die Verteilungsfunktion geht dabei über in die Maxwell-Boltzmann-Verteilung:

$$f_B(E) = e^{\left(\frac{E-E_F}{k_B T}\right)} \quad (2)$$

Hierbei entspricht die Fermienergie genau derjenigen Energie, bei der die Wahrscheinlichkeit einen Zustand zu besetzen genau 50% beträgt.

3.2 Der Tunneleffekt

Beim Rastertunnelmikroskop macht man sich, wie schon der Name verrät, den Tunneleffekt zu Nutzen. Es handelt sich dabei um einen Quantenmechanischen Effekt, der auftritt, wenn ein Teilchen (beispielsweise ein Elektron) an eine Potentialbarriere gelangt. Ist seine Energie geringer, als die der Barriere, so würde man klassisch annehmen, dass das Teilchen die Hürde nicht überwinden kann. Quantenmechanisch verschwindet die Wellenfunktion und damit die Aufenthaltswahrscheinlichkeit jedoch nicht sofort an der Barriere, sondern fällt exponentiell mit zunehmender Eindringtiefe ab. Hat dieser Potentialwall eine begrenzte Ausdehnung, so kann sich Wellenfunktion hinter der Barriere weiter ausbreiten.

Betrachten wir die Bandlücke oder auch den sehr geringe Abstand zwischen Spitze und Probe beim RTM so lässt sich diese(r) in vereinfachter Betrachtung durch einen solchen Potentialwall beschreiben. Im eindimensionalen veranschaulicht man den Potentialverlauf der Tunnelbarriere wie folgt:

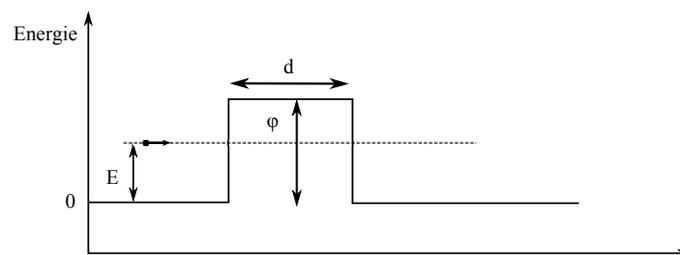


Abbildung 5: Potentialverlauf der Tunnelbarriere

Löst man für dieses Problem (im ein- sowie im dreidimensionalen) die Schrödingergleichung, so stellt man fest, dass sich für den Tunnelstrom eine charakteristische Abstandsabhängigkeit ergibt:

$$I_T \sim e^{-2\kappa d} \quad (3)$$

mit der Abklingkonstante:

$$\kappa^2 = \frac{2m}{\hbar^2} \bar{\varphi} \quad (4)$$

Dabei ist $\bar{\varphi}$ die Potentialbarriere, die der tunnelnde Ladungsträger „sieht“. Also:

$$\bar{\varphi} = \varphi - E = \frac{\phi_1 + \phi_2}{2} + \frac{eU_T}{2} - E \quad (5)$$

Man stellt außerdem fest, dass die Tunnelspannung (für kleine Werte) proportional zum angelegten Tunnelstrom ist: $U_T \sim I_T$.

Fährt das RTM die Probe sehr dicht über der Oberfläche ab, so wird dabei der Tunnelstrom beim Aufnehmen des Bildes konstant gehalten. Man erhält so Flächen konstanter lokaler Elektronenzustandsdichte (bei der Fermienergie E_F) der Probenoberfläche. Daraus folgt, dass die Bilder, welche man mit dem RTM aufnimmt sowohl Information über die Oberflächentopographie als auch über die elektronischen Eigenschaften der Probenoberfläche enthalten.

Inelastisches Tunneln

In der Realität hingegen stehen dem Tunneln weitere Hürden im Wege. Das Elektron verliert dabei auf seinem Weg durch Stöße mit anderen Molekülen (Luft), Kontaminationen oder sonstige dünne Schichten an Energie.

4 Probenmaterialien

Es ist wichtig zu wissen, welche Materialien sich besonders gut zur Untersuchung mit dem RTM eignen.

Folgende Abhängigkeiten gelten für den Tunnelstrom:

$$I_T \sim e^{-2\kappa \cdot d} \quad (6)$$

wobei κ die sogenannte Abklingkonstante mit $\kappa^2 = \frac{2m_e}{\hbar^2} \bar{\varphi}$ und d der Abstand zwischen der Oberfläche und der Spitze ist.

$$I_T \sim U_T \quad (7)$$

diese Abhängigkeit gilt nur für kleine U_T

$$I_T \sim \rho(\vec{r}_0, E_F) \quad (8)$$

wobei $\rho(\vec{r}_0, E_F)$ die Zustandsdichte der Probenoberfläche am Spitzenort \vec{r}_0 bei der Fermi-Energie E_F ist.

Die Fermi-Energie ist die höchste Energie, die ein Teilchen eines Vielteilchensystems von Fermionen besitzen kann, wenn sich das System im Grundzustand befindet. In einem Festkörper bei $T=0K$ ergibt sie sich zu $E_F = \frac{\hbar^2 k_F^2}{2m}$.

Aufgrund der exponentiellen Abhängigkeit des Tunnelstroms vom Abstand und der Tatsache, dass die Bewegungsmöglichkeiten des Piezoelements eingeschränkt sind, kommen nur Proben in Frage, dessen Unebenheit der Oberflächenhöhe im Angströmbereich liegt.

Aufgrund der Tatsache, dass der Tunnelstrom proportional zur Elektronenzustandsdichte der Oberfläche bei E_F am Spitzenort ist, gibt es zusätzliche Bedingungen an das Probenmaterial.

Isolatoren können für RTM Untersuchungen nicht genutzt werden, da die Energielücke zwischen dem energetisch am höchsten liegenden vollbesetzten Band und dem nächsten leeren Band zu groß ist.

Metalle eignen sich gut für die Untersuchung mit dem RTM, da die Zustände innerhalb eines erlaubten Energiebandes um das Fermi-Niveau besetzt sind. Die Zustandsdichte der Probenoberfläche ist somit groß.

Halbleiter eignen sich nur im Ultra-Hoch-Vakuum zu RTM-Untersuchungen, da diese Materialien an ihrer Grenzfläche freie Valenzen besitzen. Außerdem benötigt man Tunnelspannungen von einigen Volt, da die Fermi-Energie bei nicht vorhandener Tunnelspannung in der Energielücke liegt.

4.1 Graphit

Im folgenden wird nun kurz auf Graphit eingegangen, da es sich sehr gut für die Untersuchung mittels dem RTM eignet. Es ist elektrisch leitend und kann auf einfache Weise von Verunreinigungen gereinigt werden und eignet sich somit für die Untersuchung an Luft.

Graphit besteht aus einzelnen Schichten hexagonaler Struktur, welche geschichtet und zueinander verschoben sind. Die Schichten werden auch Basalebene genannt. Eine solche Schicht besteht aus kovalent verknüpften Sechsecken, mit sp^2 -hybridisierten Kohlenstoffatomen an den Gitterplätzen. Drei der vier Valenzelektronen des Kohlenstoffatoms tragen zur Bindung bei, wobei der Bindungswinkel bei sp^2 -Hybridisierung 120° beträgt. Die übriggebliebenen Valenzelektronen bilden durch Überlappung der p_z -Orbitale das Leitungsband.

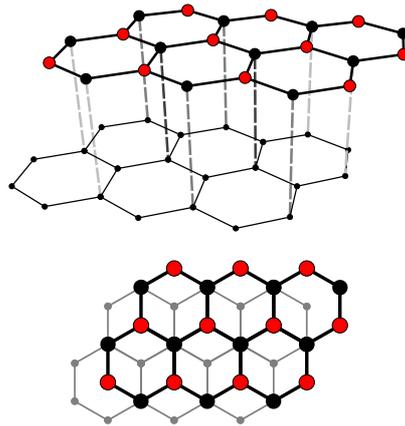


Abbildung 6: Darstellung des Graphit-Gitters

Innerhalb einer Ebene beträgt die Bindungsenergie ca. $4,3\text{eV}$, zwischen den Ebenen beträgt die Bindungsenergie der Kohlenstoffatome lediglich $0,07\text{ eV}$.

Aufgrund dieses Aufbaus von Graphit ergeben sich folgende Eigenschaften:

- elektrische Isolation orthogonal zu den Basalebene
- fast metallische Leitfähigkeit entlang der Schichten
- leichte Spaltbarkeit entlang der Kristallschichten
- keine freien Valenzelektronen an der Grenzfläche

Aufgrund dieser Eigenschaften eignet sich Graphit besonders gut zur Untersuchung mittels des RTM.

Macht man nun eine Aufnahme der Graphitoberfläche, so könnte man erwarten, dass die hexagonale Struktur zu erkennen ist. Dies ist aber nicht der Fall. Bei Aufnahmen an Luft ist eine dreieckige Gitterstruktur erkennbar.

Der Grund hierfür ist, dass es C-Atome gibt, die direkt ein C-Atom unter sich haben (α -Plätze) und welche, die erst in der übernächsten Schicht ein C-Atom unter ihrem Platz finden (β -Plätze). Die α -Plätze sind in der Darstellung schwarz und die β -Plätze rot gezeichnet.

Die α - und β -Plätze haben aufgrund dieser Tatsache eine unterschiedliche Zustandsdichte. Da der Tunnelstrom ein Maß für die Zustandsdichte am Fermi-Niveau ist, werden die unterschiedlichen Plätze unterschiedlich abgebildet.

An den β -Plätzen entspricht die Zustandsdichte einer δ -Funktion und deshalb werden die β -Plätze als Erhebung abgebildet.

4.2 Gold

Edelmetalle eignen sich besonders gut für Untersuchungen mittels des RTM an Luft, da sie so gut wie nicht mit den Luftmolekülen reagieren und somit eine stabile Oberfläche besitzen.

Um die Oberfläche von Gold untersuchen zu können, werde sehr flache Goldoberflächen benötigt.

Eine Möglichkeit ist es Gold-Einkristalle zu verwenden, die aber zu teuer sind und so für uns nicht zur Verfügung stehen.

Die andere Möglichkeit besteht darin, flache Goldschichten aufzudampfen. Die Schichtdicken betragen dabei einige hundert Angström.

Mit dem RTM möchte man aber atomar flache Goldoberflächen untersuchen, die monoatomare Stufen enthalten können.

Durch thermische Behandlung der aufgedampften Goldprobe können atomar flache Bereiche entstehen, die sich dann besonders gut für Untersuchungen eignet.

Mittels solcher atomar flachen Ebenen, mit Stufen kann nun auch die z-Bewegung des Piezos geeicht werden, in dem man mit den vom RTM erhaltenen Bilder die Stufenhöhe ausmisst und in einem Histogramm aufträgt. Daraus liest man den Netzebenenabstand ab und vergleicht ihn mit dem Soll-Wert.

5 Fragen zur Vorbereitung

Im folgenden werden die Frage aus der Versuchsvorbereitungshilfe beantwortet. Manche Themen der Fragen wurden schon in vorherigen Kapitel behandelt, diese Fragen werden hier aber nochmal kurz beantwortet.

5.1 Bedingungen an die Materialien bei Untersuchung an Luft

Wir werden die Untersuchung mittels des RTM an Luft durchführen, deshalb ist es wichtig zu wissen, welche Materialien sich dafür eignen.

Grundsätzlich sollte das Material eine sehr flache Oberfläche mit sehr geringer Rauigkeit haben, da das Piezoelement in seiner Beweglichkeit eingeschränkt ist.

Außerdem ist es wichtig, dass das Material keine Oberflächenverunreinigungen besitzt und da die Messung an Luft durchgeführt wird, eignen sich besonders Edelmetalle (z.B. Gold), da diese nur sehr wenig mit den Luftmolekülen reagieren.

Da der Tunnelstrom von der Zustandsdichte abhängt benötigt man leitende Materialien (z.B. Metall).

Auch Graphit eignet sich gut, da es leitend ist ("Halbmetall") und sich sehr gut von Verunreinigungen reinigen lässt, indem man die obersten Schichten einfach mittels eines Klebestreifens ablöst.

5.2 Informationen der RTM-Bilder

Es ist wichtig zu wissen, dass das RTM-Bild nicht nur das topographische Bild der Oberfläche widerspiegelt sondern eine Mischung aus Abstand d und Zustandsdichte $\rho(\vec{r}_0, E_F)$ der Elektronen.

$$I_T \sim e^{-2\kappa \cdot d} \quad (9)$$

$$I_T \sim \rho(\vec{r}_0, E_F) \quad (10)$$

Da der Tunnelstrom abhängig vom Abstand d ist, kann man somit durch Abfahren der Probe ein topographisches Bild der Oberfläche, es ist aber zu beachten, dass der Tunnelstrom auch von $\rho(\vec{r}_0, E_F)$ abhängt und deshalb die resultierende Abbildung oft nicht dem topographischen Bild der Oberfläche entspricht.

Beispielsweise erhält man bei Graphit trotz seiner hexagonalen Struktur eine Abbildung mit dreieckiger Gitterstruktur. Auch bei Adsorbaten muss man den Einfluss der Wellenfunktion beachten, so erscheint ein adsorbiertes He-Atom in der RTM Darstellung sogar als Loch.

5.3 Veränderung des Tunnelstroms und der Tunnelspannung

An der Abhängigkeit des Tunnelstroms vom Abstand erkennt man, dass eine Erhöhung des Tunnelstroms eine Verringerung des Abstands zwischen Probe und Spitze entspricht.

Die Tunnelspannung hängt über κ in (4) folgendermaßen zusammen:

$$\kappa^2 = \frac{2m_e}{\hbar^2} \bar{\varphi} \quad (11)$$

wobei die effektive Potenzialbarriere $\bar{\varphi}$ folgendermaßen mit der Tunnelspannung U_T zusammenhängt:

$$\bar{\varphi} = \frac{\phi_1 + \phi_2}{2} + \frac{eU_T}{2} - E \quad (12)$$

Verringert man nun die Spannung verringert sich also κ und damit verringert sich, bei gleichbleibendem Tunnelstrom, der Abstand d zwischen Probe und Spitze.

5.4 Anzahl der Elektronen bei 1nA

Es wird nun angenommen, dass die Spitze stationär über einer bestimmten Stelle der Probe steht, wobei der Abstand einem Tunnelstrom von 1nA entspricht.

Die Stromstärke ist definiert über:

$$I = \frac{Q}{t} = \frac{N \cdot e}{t} \quad (13)$$

Damit ergibt sich die Anzahl der tunnelnden der Elektronen pro Sekunde zu:

$$N = \frac{I \cdot t}{e} = \frac{1nA \cdot 1s}{1,602 \cdot 10^{-19}C} = 6,24 \cdot 10^9 \quad (14)$$

5.5 Einfluss adsorbierter Wassermoleküle und Gase

Bei RTM Experimenten an Luft befinden sich auf der Probe immer adsorbierte Wassermoleküle und Gase (z.B. Sauerstoffatome). Die Adsorbaten verändern die Wellenfunktion der Oberfläche und es kann somit passieren, dass Adsorbaten als Loch in der RTM-Abbildung erscheinen.

Da sich zwischen Spitze und Probe Moleküle befinden, die von den tunnelnden Teilchen angeregt werden können, ergibt sich das sogenannte inelastische Tunneln. Durch die neuen Streuzentren gibt es nun mehrere Möglichkeiten für das Elektron in das unbesetzte Metall überzugehen. Dadurch steigt die Tunnelwahrscheinlichkeit, was einer Absenkung der mittleren lokalen Barrierenhöhe entspricht.

Dieser Effekt reicht alleine aber nicht aus um die an Luft berechneten Potentialbarrierenhöhen erklären zu können. Deshalb geht man davon aus, dass sich zwischen Spitze und Probenoberfläche eine isolierenden Schicht befindet, die zusammengedrückt wird, wenn sich die Spitze der Probe nähert und somit eine Deformation der Spitze oder der Probe bewirkt.

5.6 Atomare Auflösung auf Graphit und auf Gold

Die hohe atomare Auflösung von Graphit kommt durch den Aufbau zustande, wobei es α - und β -Plätze gibt (siehe Abbildung 6). Wobei die Elektronen gut lokalisiert sind und die Zustandsdichte der β -Plätze einer δ -Funktion entspricht. Die β -Plätze sind folglich sehr gut erkennbar.

Bei Gold ist das Problem, dass dünne Schichten aufgedampft werden und somit eine polykristalline Form entsteht, wobei versucht wird durch thermische Behandlung atomar flache Bereiche auszubilden.

Die einzelnen Atomrümpfe sind nicht so stark aufgelöst wie bei Graphit, da die Elektronen im Leitungsband delokalisiert sind.

5.7 Schwierigkeiten des Piezomaterials

Die Piezomaterialien eignen sich sehr gut um Bewegungen im Angströmbereich zu steuern, haben aber auch folgende Nachteile:

- **Hysterese:** Das Problem ist, dass die Ausdehnung der Piezomaterialien nicht linear von der angelegten Spannung abhängt, sondern einen Hystereseverlauf zeigt. Deshalb wird versucht, die angelegte Feldstärke und somit die Breite der Hysterese möglichst gering zu halten.
- **Kriechen:** Die Zeitabhängigkeit der Längenänderung des Piezomaterials ist nicht linear. Die Länge ändert sich in einer relativ kurzen Zeit sehr stark, „kriecht“ aber noch eine relativ lange Zeit nach. Deshalb sollte die Spitze nach einer Verschiebung zunächst

zur „Ruhe“ kommen zu lassen, indem man z.B. mehrmals hintereinander den gleichen Oberflächenbereich abbildet.

- **Thermischer Drift:** Unterschiedliche Materialien haben einen unterschiedlichen Wärmeausdehnungskoeffizienten, deshalb ist beim Bau des RTMs auf die verschiedenen Materialien acht zu nehmen.

5.8 Strom-Spannungs-Linien

Strom-Spannungs-Kennlinien aufzunehmen bietet die Möglichkeit zum einen die Stabilität des Tunnelkontaktes zu überprüfen und zum ändern können Spitzen-, Probenoberfläche und die Tunnelbedingung manipuliert werden.

Die Stabilität des Tunnelkontaktes überprüft man, indem man mehrerer Strom-Spannungs-Kennlinien aufnimmt und diese vergleicht. Sind sie annähernd identisch, kann man von einem stabilen Tunnelkontakt ausgehen.

Manipulationen der Tunnelbedingung erreicht man durch variieren der Tunnelspannung. Indem man hohe Spannungen anlegt, kann z.B. Fremdatome von der Spitze entfernen.

6 Durchführung und Auswertung der Aufgaben

6.1 Präparation einer Tunnelspitze und weitere Messvorbereitungen

Bevor eine Messung durchgeführt werden konnte, musste eine Tunnelspitze hergestellt werden und die Apparatur vorbereitet werden. Da dies bei allen Messungen gleich war, wird es hier nun einmal erläutert.

Die Tunnelspitze haben wir aus einem Platin-Iridium (PrIr) Draht hergestellt, indem wir den Draht mit einer gesäuberten Pinzette an einer Seite festgehalten haben und mit Hilfe eines feinen Seitenschneiders nahe der Pinzette abgeschnitten. Dabei ist es wichtig, dass der Draht nicht einfach durchtrennt wird. Der Seitenschneider wird schräg an den Draht angesetzt und mit dem Seitenschneider am Draht gezogen, so entsteht eine sehr feine Spitze, die im Optimalfall ein einzelnes Atom an der Spitze hat.

Nun wird die Apparatur mit Ethanol gereinigt und auch den Probenträger gereinigt. Der Probenträger besitzt auf einer Seite einen schwachen Magnet, auf dem die Probe befestigt und richtig platziert werden kann.

Die Spitze wird nun sehr vorsichtig platziert, wobei immer darauf geachtet werden muss, dass die Spitze nicht zerstört wird. Anschließend wird der Probeträger mit Probe eingebracht und Nahe an die Spitze herangeschoben.

Nun wird die Apparatur verschlossen und durch eine angebrachte Lupe kann nun der Abstand

zwischen Spitze und Probe beobachtet werden.

Mittels dem Programm wird die Spitze nun positioniert. Die Spitze wird so nahe wie möglich, natürlich ohne die Probe zu berühren, an die Probe herangefahren und dann kann das Programm die Feineinstellung selbst durchführen.

Ist die Spitze richtig eingestellt, kann nun mit der Messung begonnen werden.

Der Vorgang des Einstellens musste unter Umständen mehrmals versucht werden, bis die richtige Position der Spitze gefunden wurde.

6.2 NanoGrid

Wir haben zunächst die NanoGrid Probe untersucht, um eine x- und y-Eichung durchzuführen. Die Probe enthält ein AuPd Gitter mit einer Gitterkonstanten von 160nm. Wir wählten für den Bereich, den die Spitze abscannen sollte $1\mu m$. Wir haben folgendes Bild aufgenommen:

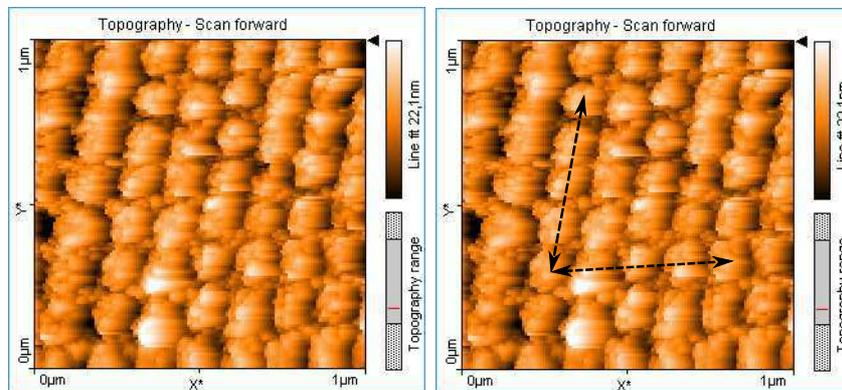


Abbildung 7: NanoGrid Probe (rechts mit Messwerkzeug)

Wie man erkennen kann, sind die Atome nicht parallel zur x- und y-Achse. Außerdem besitzen die vertikale und horizontale Atomreihen keinen rechten Winkel. Um die tatsächlichen Winkel- und Längenverhältnisse der Probenoberfläche abmessen zu können müssen wir eine Eichung durchführen. Dazu bestimmen wir je einen Eichfaktor für die x- sowie die y-Komponente. Der Eichfaktor berechnet sich allgemein durch:

$$\epsilon_i = \frac{l_i^{theo} \cdot n_{Atome}}{l_i^{exp}} \quad (15)$$

Mit dem schon zur Aufnahme verwendeten Programm EasyScan kann man die Abstände relativ einfach bestimmen. Dazu ziehen wir eine Linie zwischen zwei Atommittelpunkten. NanoGrid gibt dann direkt die Länge des Pfeiles sowie den x- bzw. y-Achsenabschnitt an, der uns hier interessiert. Der Abstand zwischen zwei Mittelpunkten beträgt in der Theorie 160nm. Für die

Eichfaktoren erhalten wir damit:

$$\epsilon_x = \frac{l_x^{theo} \cdot 4}{l_x^{exp}} = \frac{160nm \cdot 4}{542,8nm} = 1,179$$

$$\epsilon_y = \frac{l_y^{theo} \cdot 4}{l_y^{exp}} = \frac{160nm \cdot 4}{519,3nm} = 1,232$$
(16)

Mit diesen Eichfaktoren kann man nun gemessene Abstände im Bild direkt in reale Abstände umrechnen.

6.3 Gold

Bei diesem Versuch sollten eigentlich zwei Goldproben untersucht werden, eine geflammte und eine ungeflammte. Da aber keine geflammte Probe zur Verfügung stand, konnten wir nur eine Untersuchung der ungeflamten Probe durchgeführt werden.

6.3.1 Untersuchung der Oberfläche

Dazu haben wir die Apparatur wie oben beschrieben vorbereitet und die Goldprobe eingebracht. Folgendes Bild haben wir erhalten:

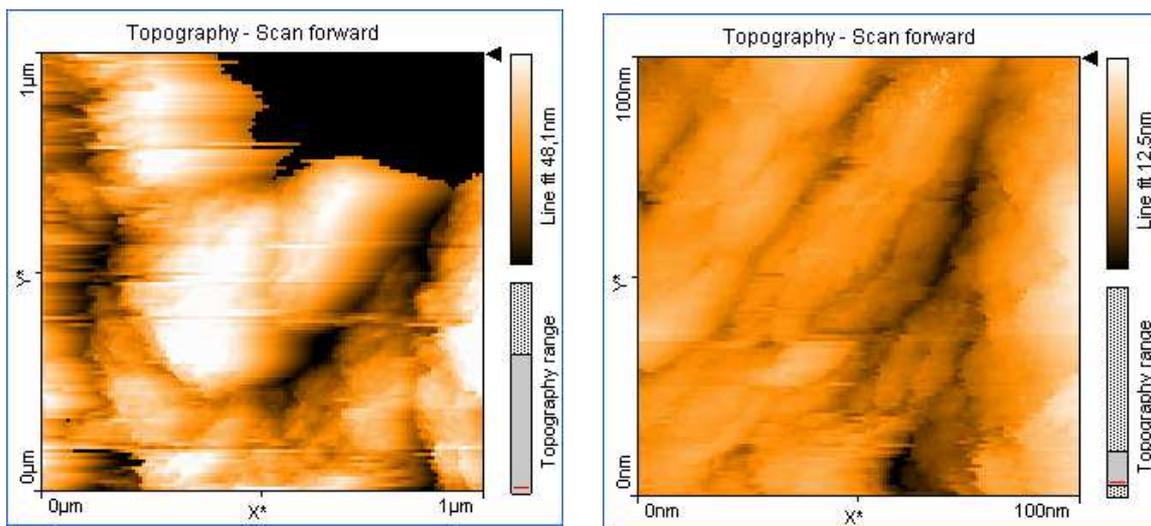


Abbildung 8: Aufnahme der Goldoberfläche

Hier sind zwei verschiedene Aufnahmen der Goldoberfläche dargestellt. Wobei sie sich dadurch unterscheiden, wie groß der aufgenommene Bereich ist. Das linke Bild bildet einen Bereich von $1\ \mu m \times 1\ \mu m$ und das rechte $100\text{nm} \times 100\text{nm}$ ab.

Das rechte Bild zeigt somit eine etwas feinere Struktur der Oberfläche ab.

Man sieht, dass die Oberfläche uneben ist und verschiedene Ebenen besitzt. Im linke Bild ist oben rechts ein Teilbereich komplett schwarz, wir vermuten, dass entweder ein Fehler auftrat,

oder dass dort kein Tunnelstrom gemessen werden konnte und somit der Abstand zu groß war, was darauf schließen lässt, dass dort die Oberfläche eine Kante oder Loch besitzt. Wir vermuten aber eher einen Fehler bei der Messung.

Aufgedampftes Gold besitzt einen mittleren Korndurchmesser von ca. 300 Å (30nm). Im rechten Bild ist die polykristalline Struktur zu erkennen, wobei der Korndurchmesser hier im erwarteten Bereich liegt.

6.3.2 Strom-Spannungskennlinie

Mit dem verwendeten Programm konnte geschickt eine Strom-Spannungskennlinie aufgenommen und gespeichert werden. Sie ist im folgenden dargestellt.

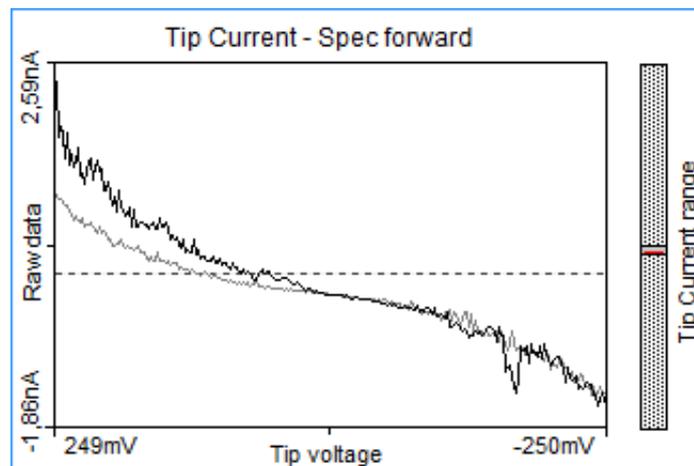


Abbildung 9: Aufnahme der Goldoberfläche

Im Schaubild sind zwei Kurven zu erkennen, wobei die graue Kurve beim zurück-laufen der Spannung entsteht. Sie sollte eigentlich identisch mit der schwarzen Kurve sein, der Unterschied kann durch thermischen Drift oder anderen äußeren Einflüssen zustande kommen.

Beachtet man die schwarze Linie kann man einen etwa linearen Bereich bei kleinen Spannungen und einen etwa exponentiellen Verlauf bei größeren Spannungen erkennen. Dies ist der erwartete Verlauf.

6.4 Graphit

6.4.1 Atomare Auflösung der HOPG-Oberfläche

Bei dieser Aufgabe sollte die atomare Struktur von Graphit untersucht werden. Dazu wurde zunächst die obersten Schichten der Graphitprobe mit einem Klebestreifen entfernt, um Verunreinigungen zu beseitigen. Anschließend wurde die Probe in das RTM eingebaut.

Um einen geschickten Bereich zu finden, haben wir zunächst einen größeren Bildbereich gewählt um die Eigenschaften der Oberfläche zu überprüfen.

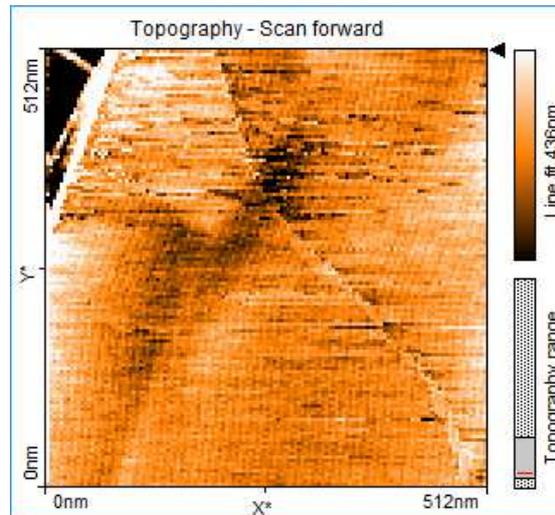


Abbildung 10: Aufnahme der Graphit Oberfläche

Hier ist ein Bild zu sehen, bei dem ein Bereich von $512\text{nm} \times 512\text{nm}$ abgebildet wurde. Man sieht, dass die Oberfläche recht glatt ist. An einigen Stellen sind Unebenheiten bzw. Fehler in der Oberfläche zu sehen. Die Oberfläche sollte aber gut dazu geeignet sein um die atomare Struktur untersuchen zu können.

Nun haben wir versucht die atomare Auflösung zu untersuchen, indem wir die Auflösung auf 4nm bzw. 2nm gesetzt haben. Außerdem haben wir die Modulationszeit, die Zeit, in der die Spitze die Probe abfährt, herabgesetzt um Rauschen zu verringern.

Es ist nun an der Zeit zu erwähnen, dass es sehr schwierig bzw. nicht möglich war die atomare Struktur von Graphit aufzunehmen. Wir und unsere Betreuer haben mehrmals eine neue Spitze präpariert und andere Stellen der Probe untersucht um eine gute Aufnahme zu erhalten. Außerdem haben wir die verschiedenen Parameter bei der Aufnahme variiert. All diese Mühen haben leider nicht wirklich geholfen.

Im folgenden sind unsere besten Aufnahmen bei 2nm und 4nm dargestellt.

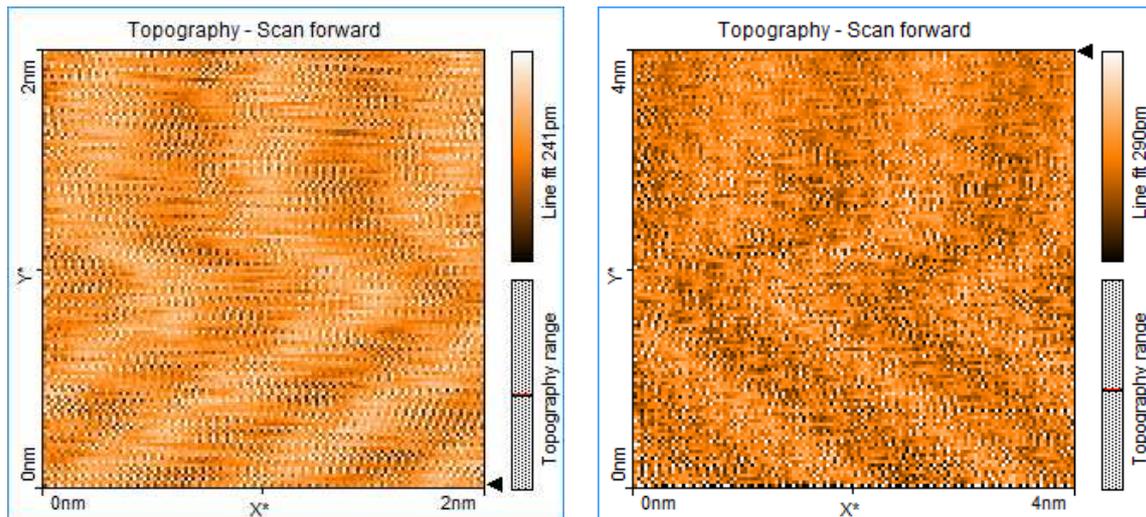


Abbildung 11: Atomare Aufnahme der Graphit Oberfläche

Bei der linken Aufnahme (2nm Bereich) kann man die Struktur erwartete Struktur erkennen. Die erwartete Struktur ist ausführlich in der Vorbereitung diskutiert. Bei der rechten Aufnahme (4nm Bereich) ist so gut wie keine Struktur mehr zu erkennen.

Bei beiden Aufnahmen ist durch Rauschen so gut wie keine Struktur mehr zu erkennen. Da sehr viele andere Gruppen im selben Raum Experimente durchgeführt haben, kann es vielleicht sein, dass dadurch zu große Störungen zustande gekommen sind. Vielleicht waren die zahlreichen Spitzen oder die Probe nicht gut genug präpariert um eine gute atomare Auflösung zu erhalten.

Da wir keine guten atomaren RTM-Bilder der Hoch-Orientierten Pyrolytischen Graphit Oberfläche (HOPG-Oberfläche) bekommen haben, können wir keine x-,y- Eichung wie bei NanoGrid durchführen. Die Durchführung dieser Eichung würde aber analog zur Eichung bei NanoGrid erfolgen.

6.4.2 Variation der verschiedenen Parameter

Nun sollten wir noch die Auswirkung der unterschiedlichen Parameter auf die Bilder untersuchen. Folgende Größen können wir einstellen:

- Tunnelstrom I in nA
- P-Gain (proportional gain)
- I-Gain (integral gain)
- Tunnelspannung in V
- Rastergeschwindigkeit bzw. Zeit t in s

Die Auswirkung dieser Größen haben untersucht, indem wir von den optimalen Einstellungen ($I = 10\text{nA}$; P-Gain: 4000; I-Gain: 1000 ; $U = 0,05\text{V}$; $t = 0,03\text{s}$) ausgegangen sind und jeweils eine der Größen verändert haben.

Änderung des Tunnelstroms

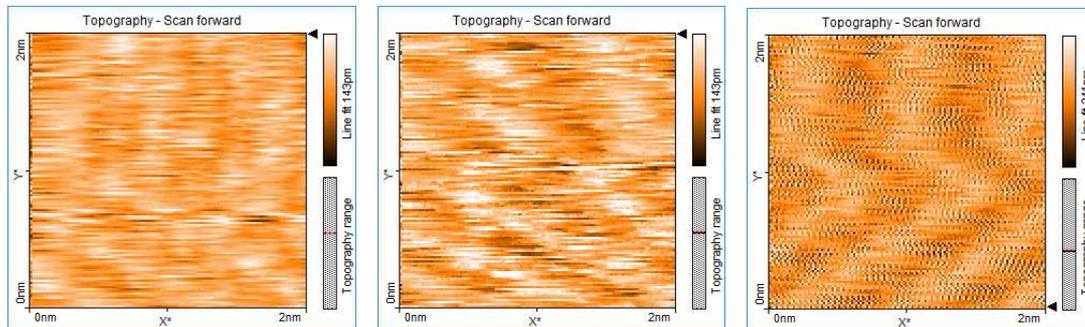


Abbildung 12: $I = 1\text{nA}$; 4nA ; 10nA

Zunächst haben wir den Tunnelstrom verändert. Man erkennt, dass bei Graphit ein relativ hoher Tunnelstrom benötigt wird um eine gute Aufnahme zu bekommen. Bei niedrigem Tunnelstrom erkennt man nur Rauschen.

Änderung der Verstärkung

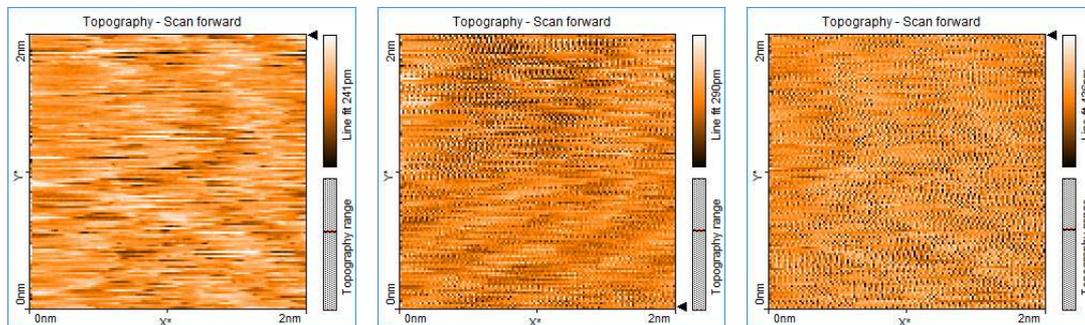


Abbildung 13: P-Gain = 1000; 5000; 10000

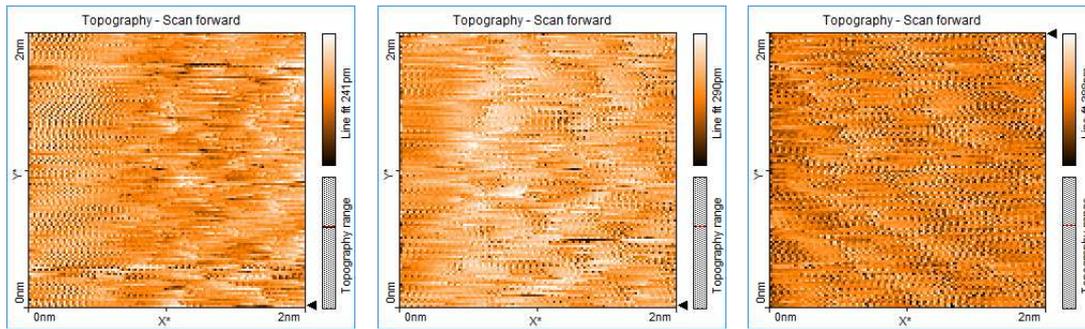


Abbildung 14: I-Gain = 2000; 3000; 5000

Bei den Verstärkungen erkennt man, dass eine große Verstärkung nicht bedeutet, dass es ein gutes Bild gibt. Eine zu große Verstärkung führt dazu, dass nur noch Rauschen zu erkennen ist. Beim P- Gain ist z.B 10000 zu groß und bei I-Gain ist wahrscheinlich 2000 schon zu groß.

Änderung der Tunnelspannung

Hier sind leider alle drei Bilder nicht besonders gut, wobei bei 0,02V und 0,2V vielleicht noch etwas Struktur zu erkennen ist. Bei zu hoher Spannung (analog zu hohem Tunnelstrom) ist nur noch Rauschen zu erkennen.

Änderung der Rasterzeit

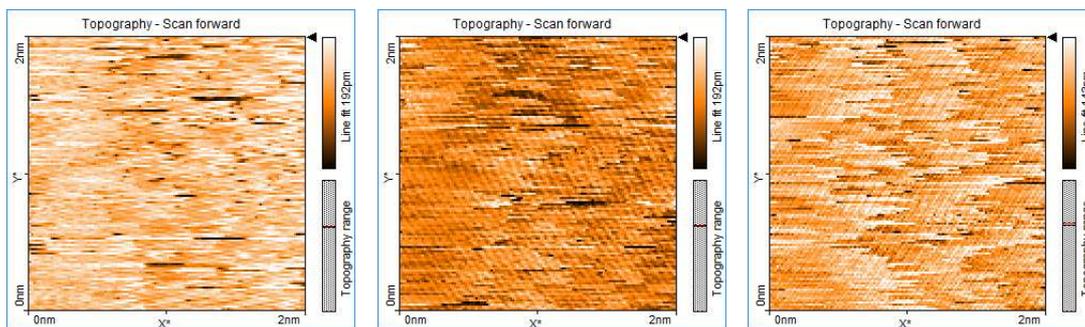


Abbildung 15: Zeit $t = 0,2s ; 0,3s ; 0,5s$

Mit einer niedrigen Rasterzeit, also einer hohen Rastergeschwindigkeit haben wir versucht das Rauschen zu verringern. Da unsere optimale Rasterzeit bei 0,03s liegt, sind vermutlich die oben dargestellten Zeiten zu lange. Die Bilder ermöglichen uns auch keine Aussage über die Struktur.

6.5 Strom-Spannungs-Kennlinie

Zum Abschluss der Untersuchung von Graphit haben wir noch Strom-Spannungs-Kennlinien aufgenommen. Die beste haben wir im folgenden dargestellt.

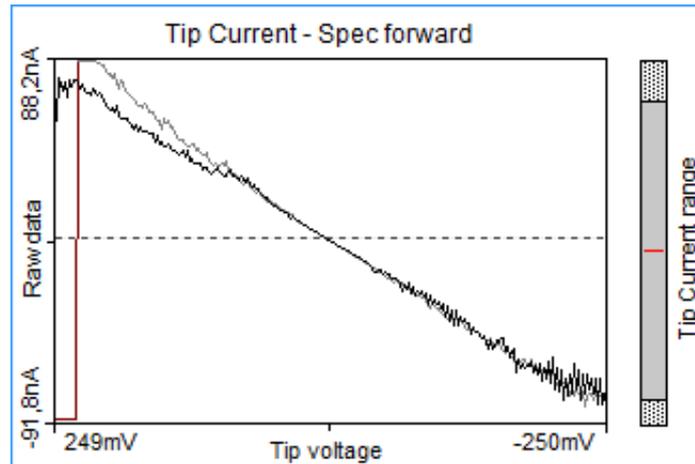


Abbildung 16: Strom-Spannungs-Kennlinie

Hier sieht man, dass fast der komplette Bereich einen linearen Verlauf aufweist, im Gegensatz zum Strom-Spannungs-Verlauf bei Gold. Außerdem sind hier die beiden Kurven fast identisch. Man sieht, dass bei Graphit der lineare Bereich bei Graphit ausgeprägter ist als bei Gold.

6.6 Abhängigkeit des Tunnelstroms

Wir haben nun bei jeder Messung zusätzlich ein I-d-Diagramm aufgenommen. Basierend auf dieser Abstandsabhängigkeit des Tunnelstroms kann man nun eine quantitative Aussage über die mittlere lokale Potentialbarrierenhöhe treffen.

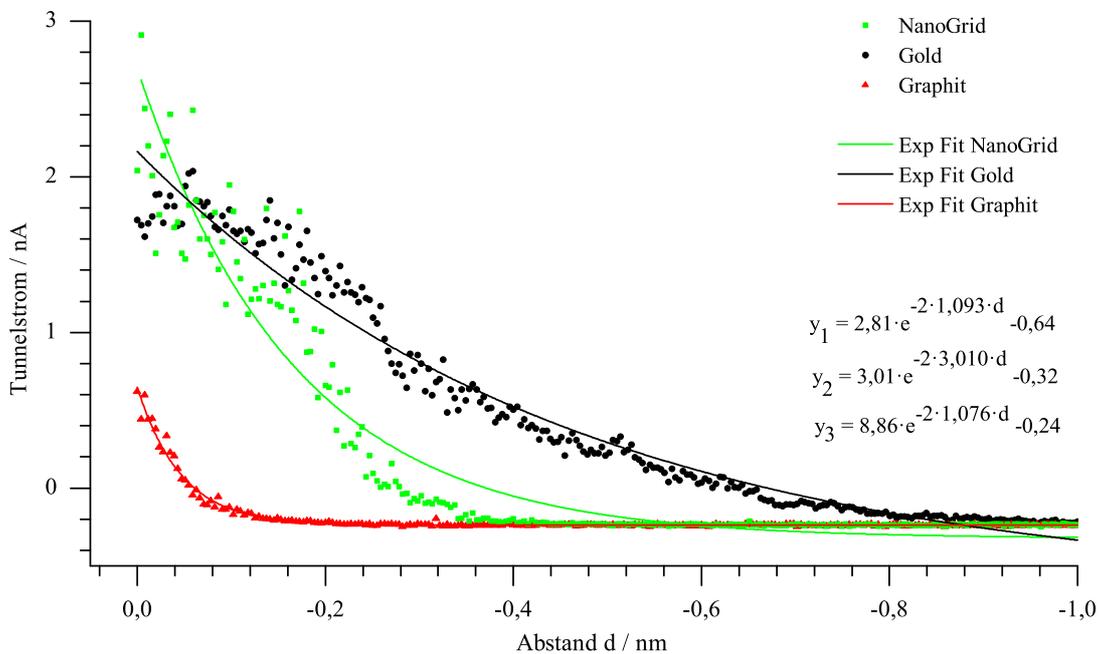


Abbildung 17: Tunnelstrom über Probenabstand (Exponent in $\frac{1}{nm}$)

Zunächst wurden für die drei Materialien der Tunnelstrom über dem Abstand aufgetragen. Dazu wurde die Spitze von ihrer aktuellen Position (nahe über der Probe bei einem gut messbaren Tunnelstrom) um 1nm von der Probe weggefahren.

Anschließend wurden drei exponentielle Fits gemacht. In der Exponentialfunktion kann man nun einfach κ_i ablesen.

Für die mittlere Potentialhöhe gilt nach Formel (4):

$$\bar{\varphi}_i = \frac{\hbar^2 \kappa_i^2}{2m} \quad (17)$$

Mit der Abklingkonstante κ_i aus den exponentiellen Fits und der Elektronenmasse $m = 9,11 \cdot 10^{-31} \text{kg}$ ergibt sich:

$$\begin{aligned} \bar{\varphi}_{NanoGrid} &= 1,64 \text{eV} \\ \bar{\varphi}_{Gold} &= 4,52 \text{eV} \\ \bar{\varphi}_{Graphit} &= 1,62 \text{eV} \end{aligned} \quad (18)$$

Vergleicht man diese Potentialbarrieren mit der von Vakuum von 4-5eV so kann man erkennen, dass wir bei Gold recht gut im Bereich sind. Bei den anderen weichen unsere Werte jedoch stark ab. Ein Grund dafür ist die inelastische Streuung mit anderen Molekülen (siehe oben) und die damit verbundene Änderung der Tunnelwahrscheinlichkeit.

7 Quellen

- Abbildung 1 - <http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/d/d0/Rastertunnelmikroskop-schema.svg> 04.11.2012, 22Uhr
- Abbildung 2 - http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/d/d1/Constant_current.svg 04.11.2012, 22Uhr
- Abbildung 6 - <http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/5/54/GraphitGitter4.png> 04.11.2012, 22Uhr