

P3 Festkörperphysik

13. November 2009

Raster-Tunnel-Mikroskopie (RTM) / *scanning-tunneling-mikroscope* (STM)

Gruppe 58 - Saskia Meißner, Arnold Seiler

Inhaltsverzeichnis

1	Ziel des Versuchs	2
2	theoretische Grundlagen	2
2.1	Optische Mikroskopie	2
2.2	Elektronenmikroskopie	3
2.3	Rastersondenmikroskopie	3
2.3.1	Modi des STM	3
2.3.2	Tunneln zwischen Spalt und Spitze	4
2.3.3	Strom- und Spannungs-Linie	4
2.3.4	Probenmaterialien	4
2.3.5	Adsorbate	6
2.3.6	Stufenförmige Oberflächen	6
2.3.7	Oberflächendiffusion	6
2.4	Piezomaterial	7
2.4.1	Piezoelektrischer Effekt	7
2.5	Probleme des STM	7
2.6	Theoretische Ansätze	8
2.6.1	1D Ansatz	8
2.6.2	3D Ansatz	9
2.6.3	inelastisches Tunneln	10
3	experimenteller Aufbau	11
3.1	Eichung	11
4	Durchführung des Versuchs	12
4.1	Präparation einer Tunnelspitze	12

4.2	Gold	12
4.3	Graphit	13
4.3.1	Tunnelspannung, Tunnelstrom, Verstärkung (Gain) und Rastergeschwindigkeit	14
4.3.2	atomar aufgelöstes Graphit	14
5	Auswertung	14
5.1	Eichung	14
5.1.1	Eichung des z-Piezos	14
5.1.2	NanoGrid (Eichung der x und y-Piezos)	15
5.1.3	Überprüfen der x- und y-Eichung des Piezos (mit HOPG)	15
5.2	Strom-Spannungskennlinien	17
5.3	Abstandabhängigkeit des Tunnelstroms	17
5.3.1	Mittlere lokale Potentialbarrierenhöhe	17
6	Anhang	18
6.1	Fehlerrechnung	18
6.2	Abbildungen	19
6.3	Tabellen	19

1 Ziel des Versuchs

Mit Hilfe eines STMs untersuchen wir die Oberflächen einer Gold- und einer Graphit-Probe. Dabei erhalten wir einen Einblick in die Funktionsweise des STM und in die Analyse der Ergebnisse, die trotz des einfachen Versuchsaufbaus ermöglichen, einzelne Atome sichtbar zu machen.

2 theoretische Grundlagen

2.1 Optische Mikroskopie

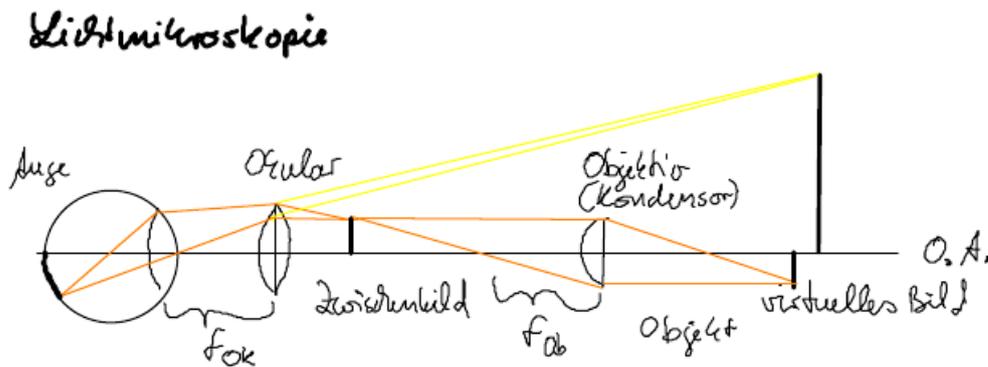


Abbildung 1: Schematischer Aufbau eines Lichtmikroskops

Bei der optischen Mikroskopie ist das Auflösungsvermögen abhängig von der Wellenlänge λ des Lichts. Der kleinste auflösbare Abstand ist gegeben durch $g = \frac{\lambda}{n \cdot \sin(\alpha)}$.

- Brechungsindex n der Immersionsflüssigkeit (kleinere Apertur als bei trockenen Systemen)
- Winkel α zwischen Mikroskopachse und 1. Ordnung gebeugtes Licht am Objekt

Die Wellennatur des Lichtes führt zu dem Zusammenhang: $\lambda = \frac{h}{p}$.

2.2 Elektronenmikroskopie

Aufgrund der Entdeckung, dass Licht sowohl Teilchen als auch Wellennatur besitzt, kam man auf die Idee mit Elektronen zu mikroskopieren.

Im Prinzip ist der Aufbau eines Elektronenmikroskops ähnlich wie beim optischen Mikroskop. Es werden lediglich die Linsen durch magnetische oder elektrische Felder ersetzt und die Lichtquelle durch eine Elektronenkanone (mit Hochspannungsanlage). Der ganze Aufbau ist nur im Vakuum sinnvoll, da die Elektronen sonst stark mit den Teilchen in der Luft wechselwirken können. Verschiedene Methoden der Elektronenmikroskopie sind

- das Durchstrahlungs-Elektronenmikroskop: zur Untersuchung von dünnschichtigen Proben
- das Reflexions-Elektronenmikroskop: zur Untersuchung von elektrisch leitfähigen Oberflächen (nicht leitfähige Objekte können mit leitfähiger Schicht bedampft werden). Hierzu gehört z.B. das Rasterelektronenmikroskop (REM)
- oder Elektronenstrahl von der Probe selbst: thermisch, durch Photoemission oder durch Feldemission. Das Feldelektronenmikroskop und das Feldionenmikroskop werden dazu benutzt.

Ein direkter Vorgänger des STM ist das Raster-Feldemissions-Mikroskop. Eine leitende Spitze (Abstand Spitze Oberfläche $> 100 \text{ \AA}$) wird über die Probenoberfläche gerastert. Mit der Abstandabhängigkeit des Feldemissionsstroms kann die Oberflächentopographie der Probe erstellt werden. Durch den großen Abstand ist natürlich keine atomare Auflösung möglich.

2.3 Rastesondenmikroskopie

Das STM ist ähnlich wie das Raster-Feldemissions-Mikroskop jedoch ist der Abstand (wenige \AA) zwischen Spitze und Probe viel geringer und die Tunnelspannung (ca. 100mV) viel kleiner als die Feldemissionsspannung. Anders als bei der Feldemission tunneln Elektronen aus der Probe in unbesetzte Zustände in der Spitze.

Das Atomare Kraft Mikroskop AFM (*atomic force microscope*) tastet die Probe mit einer Spitze ab, die mit einer Kraft F auf die Oberfläche gedrückt wird. Verwendet man eine Spitze mit atomaren Abmessungen, erhält man auch eine atomare Auflösung der Probentopografie.

Wir verwenden in diesem Versuch ein Raster-Tunnel-Mikroskop.

2.3.1 Modi des STM

- Konstanter Tunnelstrom / *constant current method (CCM)* : Bei dieser Methode gibt die Position der Spitze über der Probe direkt die Topografie wieder. Der Zusammenhang zwischen Tunnelstrom und Abstand d der Spitze von der Probe lautet: $I_T \propto e^{-2 \cdot k \cdot d}$. Durch den Exponentiellen Zusammenhang erreicht man sehr hohe Auflösungen der Oberfläche im atomaren Bereich. Vergrößert sich der Abstand zwischen Spitze und Probe um eine Elektronen-Wellenlänge λ , so sinkt der Strom auf $I(z + \lambda) = \frac{1}{e^{4\pi}} I(z) = e^{-2k(z+\lambda)} = e^{-2k(z + \frac{2\pi}{k})} = e^{-2kz} e^{-4\pi}$, was auch kleinste Abstandsänderungen im Bereich einer Elektronen-Wellenlänge gut messbar macht.
- Konstante Höhe / *constant height method (CHM)*: Die Spitze ist während der ganzen Messung auf einer konstanten Höhe über der Probe. Diese Methode ist nur für sehr flache Oberflächen geeignet, da die Gefahr einer Kollision von der Spitze mit der Oberfläche sehr

groß ist. Für Zeitauflösende Messungen ist diese Methode von Vorteil, da man die Probe sehr schnell abrastern kann.

- Spektroskopie / *scanning tunneling spectroscopy (STS)*

2.3.2 Tunneln zwischen Spalt und Spitze

Angenommen, die Spitze steht stationär über einer bestimmten Stelle der Probe, wobei der Abstand einem Tunnelstrom von 1nA entsprechen soll.

Der Tunnelstrom entspricht dann $I = 1nA = 10^{-9}A = 10^{-9} \frac{C}{s}$. Da ein Elektron eine Ladung von $1,6 \cdot 10^{-19}C$ hat, müssen n Elektronen je Sekunde durch den Spalt tunneln: $I = 10^{-9} \frac{C}{s} = \frac{n}{s} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}C \implies n = \frac{10^{-9}}{1,6 \cdot 10^{-19}} = \frac{1}{1,6} \cdot 10^{10} = 6,25 \cdot 10^9$.

2.3.3 Strom- und Spannungs-Linie

Theoretisch sollte zwischen der Spannung U_T und dem Strom I_T ein linearer Zusammenhang bestehen. Ist dies nicht der Fall, sieht man z.B. um $U_T = 0$ und $I_T = 0$ ein Plateau, so ist die Spitze oder die Oberfläche von einer isolierenden Schicht überzogen, die durch eine hohe Tunnelspannung erst überwunden werden müsste - so sind jedoch keine hochauflösenden STM-Bilder möglich.

Ein stabiler Tunnelkontakt besteht nur dann, wenn mehrmals hintereinander aufgenommene Strom-Spannungs- Linien recht ähnlich aussehen. Zur Manipulation von der Spitze und der Probe verwendet man Spannungspulse zwischen Spitze und Probe.

2.3.4 Probenmaterialien

Das zu untersuchende Material muss elektrisch leitfähig sein - nicht wegen des Tunneleffektes, sondern um den Tunnelstrom abfließen lassen zu können. Der Tunneleffekt tritt auch bei Isolatoren auf, jedoch können die getunnelten Elektronen nicht abfließen (Elektronen von Spitze zu Probe) bzw. ersetzt werden (Elektronen von Probe zu Spitze). Eine Lösung ist, die Probe mit einer leitfähigen Schicht zu bedampfen, eine andere, das zu untersuchende Material selbst auf einen leitfähigen Träger aufzutragen - allerdings so dünn, dass Elektronen aus dem Träger in die oberste Atomlage der isolierenden Schicht tunneln können.

Metall Da die meisten Metalle an Luft sehr schnell isolierende Oxidschichten bilden die sowohl die Messung behindern (da sie isolieren) als auch die Struktur der Oberfläche verändern sind diese Metalle nur für Untersuchungen im Ultrahochvakuum geeignet. Die Edelmetalle bleiben als einzige für die Untersuchung an der Luft, da sich Adsorbate hier langsamer ablagern und sie nicht bzw. nur langsam mit dem Luftsauerstoff reagieren.

Halbleiter Da sie nur bedingt leitfähig sind, muss man dafür sorgen, dass ein Strom fließen kann. Dazu kann man bei reinen Halbleitern die Tunnelspannung entsprechend hoch wählen (bis zu einigen V), wodurch man Elektronen aus dem Valenzband in die Spitze tunneln lassen kann (oder von der Spitze ins Leitungsband - je nach Vorzeichen der Spannung).

Isolator Wie bereits erwähnt kann man Isolatoren nur in Verbindung mit einer leitfähigen Schicht oder einem leitenden Träger untersuchen. Adsorbate wie O_2 sind ebenfalls Isolatoren die jedoch in so dünnen Schichten auf den Träger aufgebracht sind (i.d.r. einzelne Moleküle - keine geschlossenen Schichten), so dass man sie ebenfalls untersuchen kann. Im Fall der Adsorbate

müssen jedoch vorher die Eigenschaften des Untergrunds bekannt sein um sie identifizieren zu können.

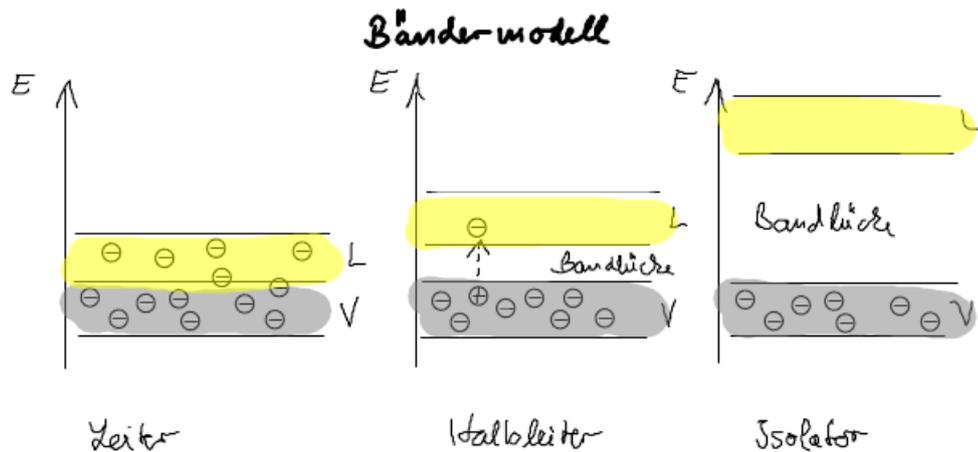


Abbildung 2: Bändermodell

Gold Um Gold untersuchen zu können, muss man es in dünnen Schichten möglichst Glatt präparieren. Dies erreicht man, indem man es auf Quarzglas aufdampft und die entstandenen Körner durch Erhitzen auf ca. 600-700°C (Flammen) dazu bringt, durch Oberflächendiffusion eine atomar glatte Oberfläche zu bilden. Die Fläche enthält in der Regel Stufen, die dem Ende einer Netzebene entsprechen. Da Gold in diesem Verfahren bevorzugt in (111)-Richtung wächst, kann mit dem bekannten Abstand der Ebenen von 2,4Å das z-Piezo geeicht werden.

Graphit Graphit ist ideal für die Untersuchung an Luft mit dem STM, denn es

- besitzt eine stabile und saubere Oberfläche, auch wenn sie längere Zeit an Luft liegt - aus der Oberfläche ragen keine offenen Valenzen heraus, an die Sauerstoff binden könnte
- besteht aus Schichten, die sich leicht abtrennen lassen - mit einem Klebstreifen lassen sich einige Lagen abnehmen, so dass die entstehende Oberfläche glatt ist
- ist ein Halbmetall - hat also entlang der Ebenen eine hohe Leitfähigkeit

Trotz der hexagonalen Struktur des Graphit sieht man mit dem STM nur eine Dreieckige, was daran liegt, dass man nicht die Lage der Atome sondern die Elektronenzustandsdichte misst. Die C-Atome in der Oberfläche, die direkt unter sich wieder ein C-Atom haben (α -Plätze) haben eine geringere Elektronen-Zustandsdichte um die Fermi-Energie als die Atome, die erst in der übernächsten Schicht einen Partner unter sich haben (β -Plätze). Daher sind die Atome an β -Plätzen wesentlich deutlicher als Erhebung zu erkennen als die an α -Plätzen.

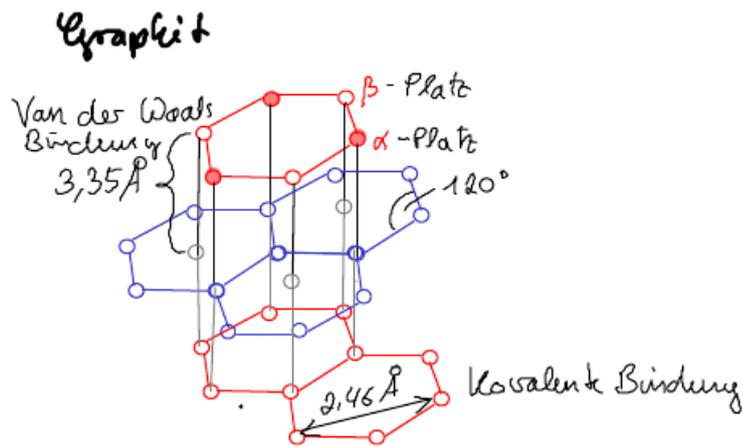


Abbildung 3: Struktur von Graphit

2.3.5 Adsorbate

An der Oberfläche der Probe befinden sich adsorbierte Atome und Moleküle aus der Umgebung. Wenn man die Probe mit dem STM untersucht muss man die Wechselwirkungen mit den Atomen, die im Gitter gebunden sind beachten. Sie sind schwer von Gitterstörungen zu trennen. Der Einfluss auf die Wellenfunktion der Oberfläche wird mit dem STM sichtbar und nicht direkt die Topographie. Das heißt ein Adsorbat kann auch als „Loch“ in der Oberfläche erscheinen. Auch die Spitze kann eine Auswirkung auf die Adsorbate haben, sodass z. B. der Tunnelstrom plötzlich steigt nicht wie die Abstandsabhängigkeit vermuten lässt.

2.3.6 Stufenförmige Oberflächen

Stufen werden mit Hilfe der Tunnelspitze nicht als scharfe Kanten identifizierbar, da die runde Spitze im Verhältnis zur Kante recht groß ist. Außerdem ist der Tunnelstrom ein Faltungsintegral der Oberflächenkontur und des Spitzenprofils.

2.3.7 Oberflächendiffusion

Wenn eine Oberfläche rau und ungleichmäßig ist, diffundieren Atome an schwach gebundenen Stellen (z.B. Kanten, Ecken oder Spitzen) zu günstigeren Stellen an der Oberfläche an der sie besser gebunden sind. Ein Beispiel ist das Flammen von Gold: die Atome an der Oberfläche bilden glatte Terrassen aus Monolagen von Atomen.

Oberflächendiffusion

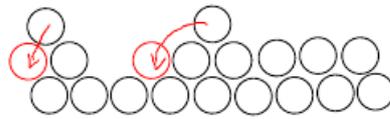


Abbildung 4: Oberflächendiffusion

2.4 Piezomaterial

2.4.1 Piezoelektrischer Effekt

Um ein piezoelektrisches Material herstellen zu können, benötigt man zunächst einen Kristall, dessen Einheitszellen ein elektrisches Dipolmoment besitzen. Ähnlich einem Ferromagneten kann man diese Dipolmomente durch ein starkes äußeres elektrisches Feld ausrichten, wodurch die Dipole sich makroskopisch aufaddieren und so einen Zusammenhang zwischen der Ausdehnung entlang der Dipolachse und der Spannung, die in dieser Richtung am Kristall anliegt herstellen.

Legt man nun eine äußere Spannung an, werden die Ladungsschwerpunkte verschoben und die Einheitszelle verformt. Da die Dipolmomente aller Einheitszellen in die selbe Richtung zeigen, nimmt die Länge des Kristalls makroskopisch zu oder ab.

Probleme der verwendeten Piezomaterialien

Die verwendeten Keramiken reagieren auf die angelegte Spannung nicht sofort, sondern „kriechen“ noch eine Weile, bis sie die endgültige Länge erreicht haben. Dies ist bei Kristallen nicht der Fall, dafür ist bei den Keramiken mit geringerer Spannung die gleiche Beweglichkeit erreichbar. Bei größeren Änderungen der Piezo-Länge, wie sie beim Verschieben des Bildbereichs auftreten, muss man zunächst eine Weile warten.

Die Keramik durchläuft eine Hysteresis-Kurve. Beim scannen kann also der Hin- und der Rückweg bei gleicher angelegter Spannung etwas verschoben sein. Im Bild wären dann alle geraden Zeilen zu den ungeraden verschoben. Ist der verwendete Spannungsbereich klein, ist auch die Hysteresis klein.

2.5 Probleme des STM

Es gibt noch weitere Dinge außer den Problemen der Piezostellelemente, die zu Artefakten in STM-Bildern führen können.

Schwingungen

- Gebäudeschwingungen im Bereich von 15-20Hz
- Luftschall
- irreguläre Bewegungen, z. B: laufende Leute mit Frequenzen von 2-4Hz
- Eigenfrequenzen der Tunneleinheit, z. B. die Resonanzfrequenzen der Tunneleinheit oder Eigenschwingung der Spitze, wenn sie nicht fest genug eingeklemmt ist.

Im Praktikum wird eine Aufhängung verwendet um das STM zu dämpfen.

Elektronische Störungen

- z.B. Fehlsignale der DACs

Mehrfachspitzen Durch Variation des Stroms kann man die Spitze dazu anregen, eine andere Gestalt zu bekommen.

2.6 Theoretische Ansätze

2.6.1 1D Ansatz

Man nimmt an, dass sowohl das Metall als auch die Spitze ein 1D Potentialtopf mit einer bestimmten Fermienergie E_F sind. Die Geometrie der Spitze wird vernachlässigt. Bei $T = 0k$ sind alle Zustände unterhalb von E_F voll besetzt. Bringt man beide Potentialtöpfe dicht (einige Å) zueinander wird die Barriere aus Luft oder Vakuum klein genug, dass Elektronen hindurch tunneln können. Ein Tunnelstrom fließt erst, wenn man eine Tunnelspannung U_T zwischen Spitze und Probe anlegt. Im vereinfachten Modell nimmt man eine Rechteckige Barriere. Mit der Austrittsarbeit ϕ die man braucht um ein Elektron aus dem Potentialtopf ins Vakuum zu bringen kann man die mittlere Höhe der Barriere wie folgt wählen: $\varphi = \frac{\phi_1 + \phi_2}{2} + \frac{e \cdot U_T}{2} - E = \frac{\phi_1 + \phi_2}{2} - \frac{e \cdot U_T}{2}$ für $E = U_T$

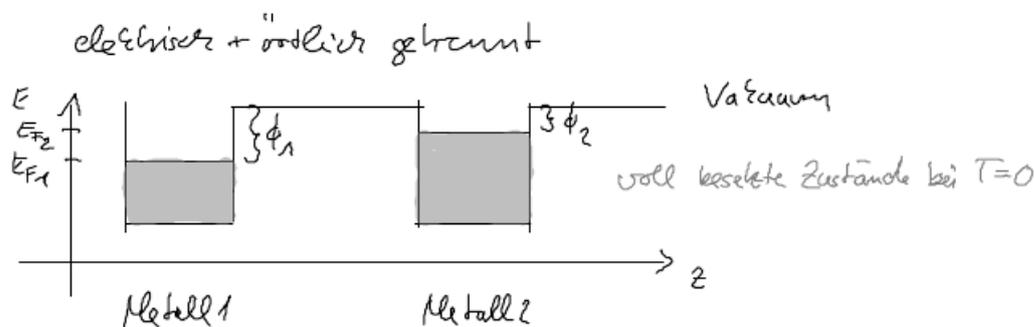


Abbildung 5: Potentialtöpfe örtlich und elektrisch getrennt

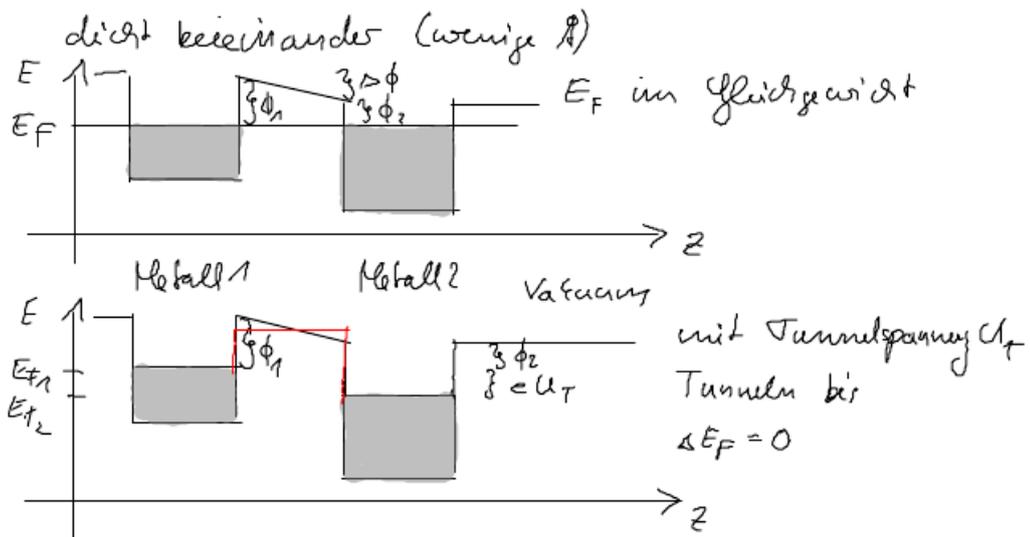


Abbildung 6: Potentialtöpfe nah zusammen

Ansatz: $H\psi = E\psi$ stationäre Schrödinger-Gleichung mit $H = \frac{\hbar^2}{2m_e} \frac{\partial^2}{\partial z^2} + \varphi(z)$ folgt $E = \frac{\hbar^2}{2m_e} k^2 + \varphi(z)$

$$\psi_1 = A \cdot e^{ikz} + A' \cdot e^{-ikz} \text{ mit } k = \sqrt{\frac{2m_e E}{\hbar^2}}$$

$$\psi_2 = B \cdot e^{-\rho z} \text{ mit } \rho = \sqrt{\frac{2m_e(E - \varphi(z))}{\hbar^2}}$$

$$\psi_3 = C \cdot e^{ikz}$$

Der Tunnelstrom ist proportional zur Tunnelwahrscheinlichkeit $|\psi|^2$ und somit $I_T \propto e^{-2\rho z}$

2.6.2 3D Ansatz

Mit Hilfe von Fermi's Goldener Regel der Quantenmechanik für die Übergangswahrscheinlichkeit in einem Zeitintervall bei konstanter Energie (Störungstheorie 1. Ordnung) folgt der Ausdruck für den Tunnelstrom: $I_T = \frac{2\pi e}{\hbar} \sum_{\mu, \nu} (f(E_\mu) - f(E_\nu)) \cdot |M_{\mu\nu}|^2 \cdot \delta(E_\nu + e \cdot U_T - E_\mu)$ mit der Fermi-Dirac-Verteilung $f(E) = \frac{1}{1 + e^{\frac{E - E_F}{k_B T}}}$, die die Wahrscheinlichkeit angibt, dass ein Zustand mit der Energie

E besetzt ist. Das Matrixelement für den Tunnelstrom zwischen dem Zustand ψ_μ und ψ_ν kann man aus den beiden Wellenfunktionen berechnen. Unter der Annahme, dass die Spitze eine Kugel mit Radius R ist hat sie eine s-Welle mit $l=0$. Die Wellenfunktion der Oberfläche kann nach ebenen Blochwellen entwickelt werden.

3D Modell

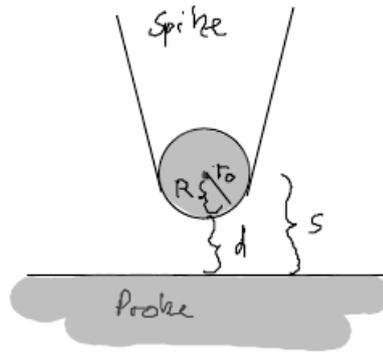


Abbildung 7: Spitzenmodell

Bei $T = 0$ und kleiner Tunnelspannung U_T ist der Tunnelstrom $I_T = \frac{\hbar^3 \cdot e^2}{m_e^2} \cdot \frac{R^2}{V_{Kugel}} \cdot e^{2\pi R} \cdot U_T \cdot D_T(E_F) \cdot \rho(\vec{r}_0, E_F)$ mit der Zustandsdichte $\rho(\vec{r}_0, E_F)$ der Probenoberfläche und $D_T(E_F)$ der Spitze.

- Abstandsabhängigkeit: $\rho(\vec{r}_0, E_F) = \sum_{\nu} |\psi(r_0)|^2 \delta(E_{\nu} - E_F) \implies I_T \propto e^{-2\rho d}$
- ohmsches Verhalten (für kleine U_T): $I_T \propto U_T$
- konstanter Tunnelstrom (Flächen lokaler konstanter Elektronenzustandsdichte): $I_T \propto \rho(\vec{r}_0, E_F)$

Hier sieht man, dass die Bilder Des STM zur Oberflächentopografie auch die elektronischen Eigenschaften der Oberfläche enthalten.

2.6.3 inelastisches Tunneln

Die Proben sind in der Realität nicht rein, sondern es befinden sich Adsorbate (z. B. Moleküle, Atome) an der Oberfläche. Dadurch gibt es in Folge von inelastischem Tunneln mehrere Möglichkeiten für Tunnelkanäle. Untersucht man Oberflächen an Luft, ist die Tunnelwahrscheinlichkeit viel größer als im Vakuum. Das entspricht einer Absenkung der Tunnelbarriere. Die Hauptursache dafür ist aber eher der mechanische Kontakt zwischen Spitze und Probe.

3 experimenteller Aufbau

Schematischer Aufbau des STM

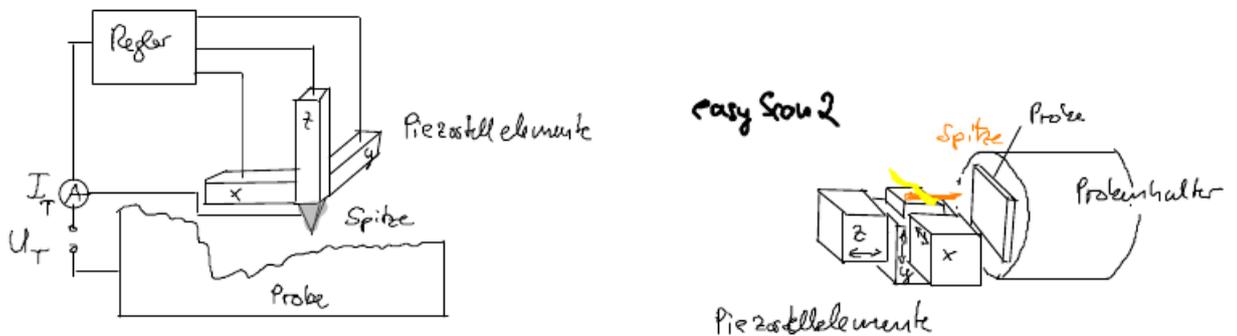


Abbildung 8: Schematischer Versuchsaufbau

3.1 Eichung

Die Eichung ist erforderlich, um die tatsächlichen Winkel- und Längenverhältnisse der Probenoberfläche abmessen zu können. Die x- und y-Achsen können unterschiedliche Eichfaktoren haben, wenn das Bild perspektivisch verzerrt ist.

Die Stärke des Piezoeffekts bzw. die Länge der Piezoelemente sind temperaturabhängig, deshalb sollte man am Tag der Messung Eichen.

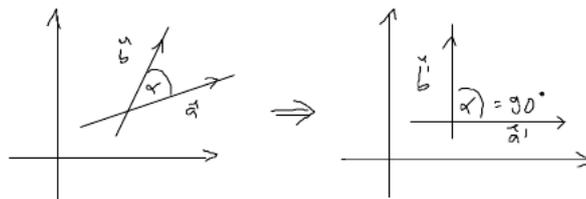


Abbildung 9: Übergang vom Bild zu tatsächlichen Größenverhältnissen

Mit der Gleichung $\cos(\alpha) = \frac{\vec{a} \cdot \vec{b}}{|\vec{a}| |\vec{b}|}$ wobei $\vec{a} = (a_x, a_y)$ und $\vec{b} = (b_x, b_y)$ kann man die Eichfaktoren ρ und ξ bestimmen:

$$a_x = \rho \cdot a'_x \text{ und } a_y = \xi \cdot a'_y$$

$$b_x = \rho \cdot b'_x \text{ und } b_y = \xi \cdot b'_y$$

Folgende Größen sind bekannt bzw. messbar:

- Gitterabstände im Bild $|\vec{a}|$ und $|\vec{b}|$
- tatsächliche Abstände $|\vec{a}'|$ und $|\vec{b}'|$
- Koordinaten im Bild a_x und a_y
- Winkel α im Bild und in Realität $\alpha' = 90$ (NanoGrid)

Um die beiden Eichfaktoren zu bestimmen muss man zwei Gleichungen aufstellen:

$$1. \cos(\alpha') = 0 = \frac{a'_x \cdot b'_x + a'_y \cdot b'_y}{|\vec{a}'| |\vec{b}'|} = \frac{\rho^2 \cdot a_x \cdot b_x + \xi^2 \cdot a_y \cdot b_y}{|\vec{a}'| |\vec{b}'|} \implies \rho^2 \cdot a_x \cdot b_x = -\xi^2 \cdot a_y \cdot b_y$$

$$2. |\vec{a}'|^2 = \rho^2 \cdot a_x + \xi^2 \cdot a_y$$

$$\implies \rho = \sqrt{\frac{|\vec{a}'|^2}{a_x^2 - \frac{a_x a_y b_x}{b_y}}} \quad \text{und} \quad \xi = \sqrt{\frac{|\vec{a}'|^2}{a_y^2 - \frac{a_x a_y b_y}{b_x}}}$$

4 Durchführung des Versuchs

4.1 Präparation einer Tunnelspitze

Zuerst muss die Unterlage und das Werkzeug (Golddraht, spitze Pinzette, Zange, Flachzange) mit Ethanol gereinigt werden. Den Golddraht nur mit dem Werkzeug berühren.

- alten Draht der Tunnelspitze mit der Pinzette entfernen
- Golddraht mit der Flachzange fest halten und mit der Zange abschneiden, sodass eine Spitze entsteht.

Die zu untersuchenden Teile (Probe und Spitze) dürfen nicht mit bloßen Fingern angefasst werden - sonst lagert sich eine Fettschicht ab, die nicht leitfähig ist. Die Spitze wird unvermeidlich in die Fettschicht gedrückt und so zerstört.

Beim Herstellen der Spitze kann man im ersten Moment nicht beurteilen wie gut sie ist, da man es nicht mit dem bloßen Auge sehen kann. Erst bei den STM-Bildern und der Strom-Spannungskennlinie sieht man wie schlecht sie ist.

4.2 Gold

Wir untersuchen mit dem STM eine aufgedampfte nicht geflammte Goldprobe. Es war nicht einfach überhaupt ein STM-Bild von dieser Probe zu erhalten. Zuerst kam kein Tunnelkontakt zustande, nachdem wir die Rückseite der Probe gereinigt hatten war das Problem behoben. Zusätzlich war die Probe ziemlich stark beschädigt, von Tunnelspitzen zerkratzt, aber wir haben einen Bereich auf der Probe gefunden, den man abbilden kann.

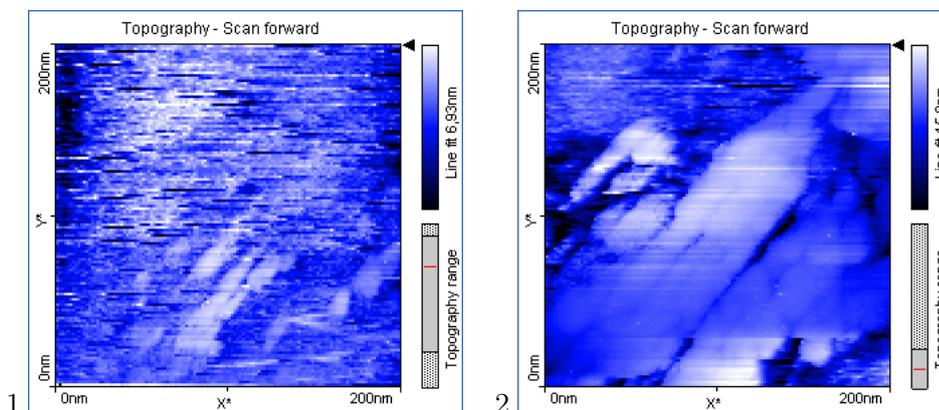


Abbildung 10: STM-Bilder von Gold

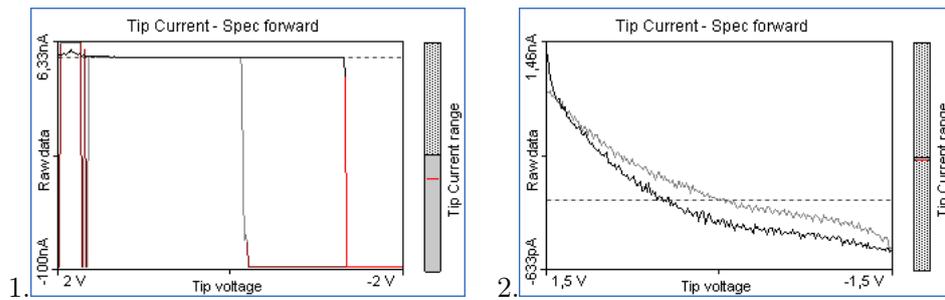


Abbildung 11: Strom-Spannungskennlinien auf Gold

Auf dem linken Bild (1.) kann man nicht so viel erkennen, da keine stabile Tunnelbedingungen vorhanden war. Auf dem rechten Bild (2.) ist deutlich zu sehen, dass die Oberfläche sehr unregelmäßig ist. Beim Aufdampfen von Gold auf ein Trägermaterial wächst es polykristallin auf. Der mittlere Korngrößenabstand beträgt etwa 300\AA .

4.3 Graphit

Aufgrund der Van der Waals Bindungen zwischen den Ebenen von Graphit kann man mit einem Klebstreifen eine Schicht abziehen. So hat man eine saubere Oberfläche zur Untersuchung der Probe.

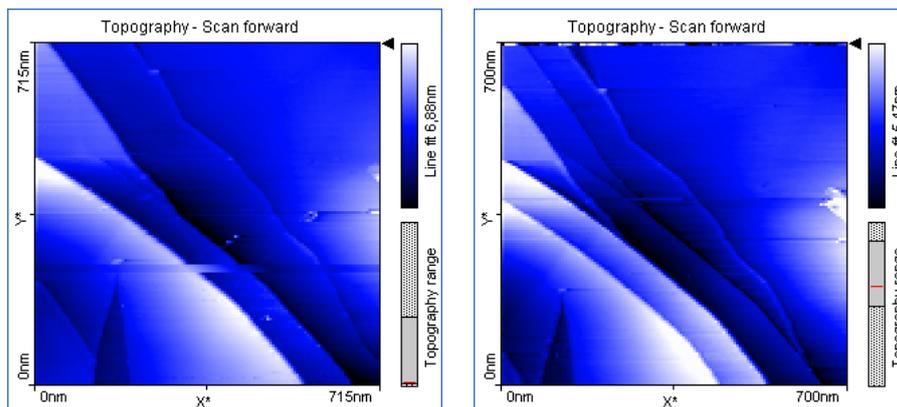


Abbildung 12: Graphit

Man kann mehrere Schichten erkennen.

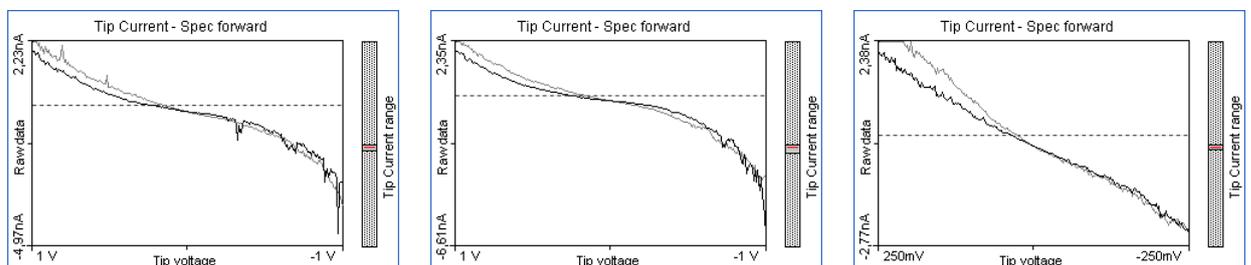


Abbildung 13: Strom-Spannungskennlinie auf Graphit

Es herrscht eine konstante Tunnelbedingung und der Vor- und Rücklauf der Spannung stimmt gut überein. Der lineare Bereich der Kennlinien ist recht groß.

4.3.1 Tunnelspannung, Tunnelstrom, Verstärkung (Gain) und Rastergeschwindigkeit

- Ist die Tunnelspannung zu klein kann es sein, dass die Spitze in die Probe hinein fährt. Bei zu großer Tunnelspannung ist keine Struktur mehr erkennbar, weil der Tunnelstrom schon durch Feldemission erreicht wird.
- Die Verstärkung bewirkt die Verschiebung von Hin und Rückweg beim Rastern. Man sollte sie so einstellen, dass die Verschiebung möglichst klein ist, das heißt die Kurven sollten ähnlich aussehen.
- Die Rastergeschwindigkeit verringert die Auflösung des Bildes. Man sollte kleine Bereiche (größere Vergrößerung) langsamer rastern als größere.

4.3.2 atomar aufgelöstes Graphit

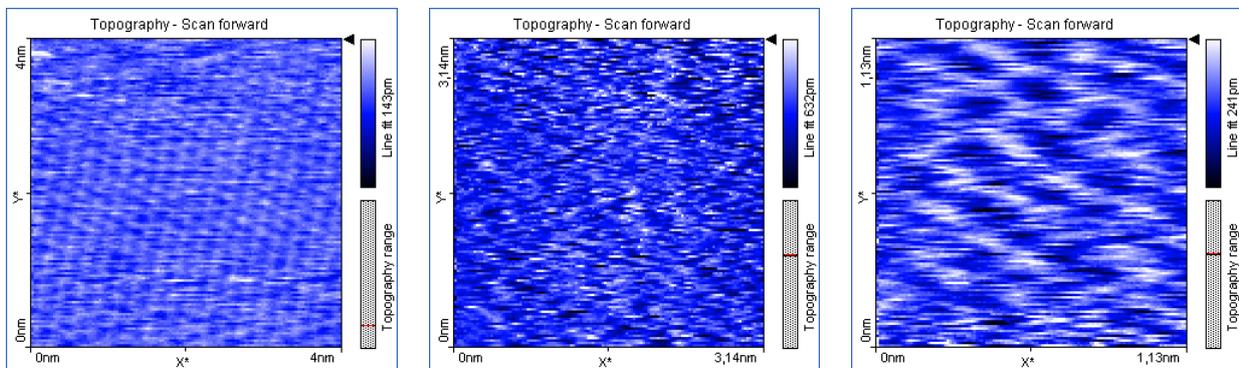


Abbildung 14: HOPG atomar aufgelöst

Wie bereits in der Vorbereitung erwähnt, sieht man nur jedes zweite Atom der Oberfläche als Maximum.

5 Auswertung

5.1 Eichung

Bevor wir die augemessenen Bilder quantitativ beurteilen, müssen wir den Maßstab der Bilder eichen. Dies geschieht, wie in 3.1 beschrieben.

5.1.1 Eichung des z-Piezos

Die Eichung des z-Piezos konnten wir nicht durchführen, da keine geflammte Goldprobe zur Verfügung stand.

5.1.2 NanoGrid (Eichung der x und y-Piezos)

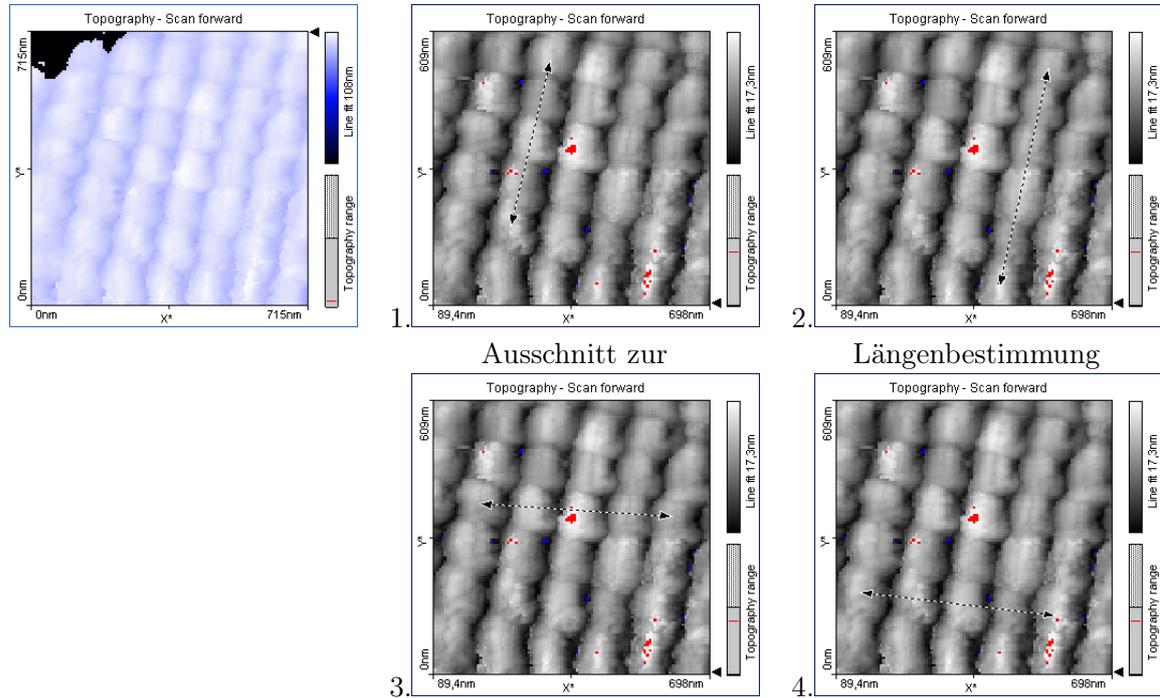


Abbildung 15: NanoGrid

Da der Winkel der \vec{a} Richtung (horizontal, Bild 3) und 4)) nur sehr ungenau zu bestimmen ist, verwenden wir für die Eichung \vec{b} (vertikal, Bild 1) und 2)). Dazu vertauscht man in den Gleichungen in 3.1 $|\vec{a}|$ mit $|\vec{b}|$. So erhält man als Eichfaktor für die x-Achse $x' = (1,045 \pm 0,014) \cdot x$ und für die y-Achse $y' = (1,577 \pm 0,005) \cdot y$. Offensichtlich ist die Aufnahme in y-Richtung gestaucht, was durch die Eichung behoben wird.

Da sich die bereits gemessenen Bilder mit der Messsoftware EasyScan nicht nachträglich umnormieren lassen, haben wir diese Faktoren nur in den Rechnungen berücksichtigt. Die Achsenbeschriftung ist in den Bildern einfach mit den entsprechenden Faktoren zu multiplizieren.

5.1.3 Überprüfen der x- und y-Eichung des Piezos (mit HOPG)

Die Aufnahmen von Graphit in zwei Auflösungsstufen haben wir ausgewertet und so die verschiedenen Längen eines Kohlenstoffrings vermessen. Da es sich um ein regelmäßiges 6-Eck handelt, lassen sich auch alle Seitenlängen berechnen.

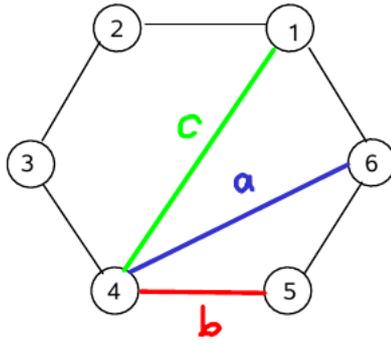
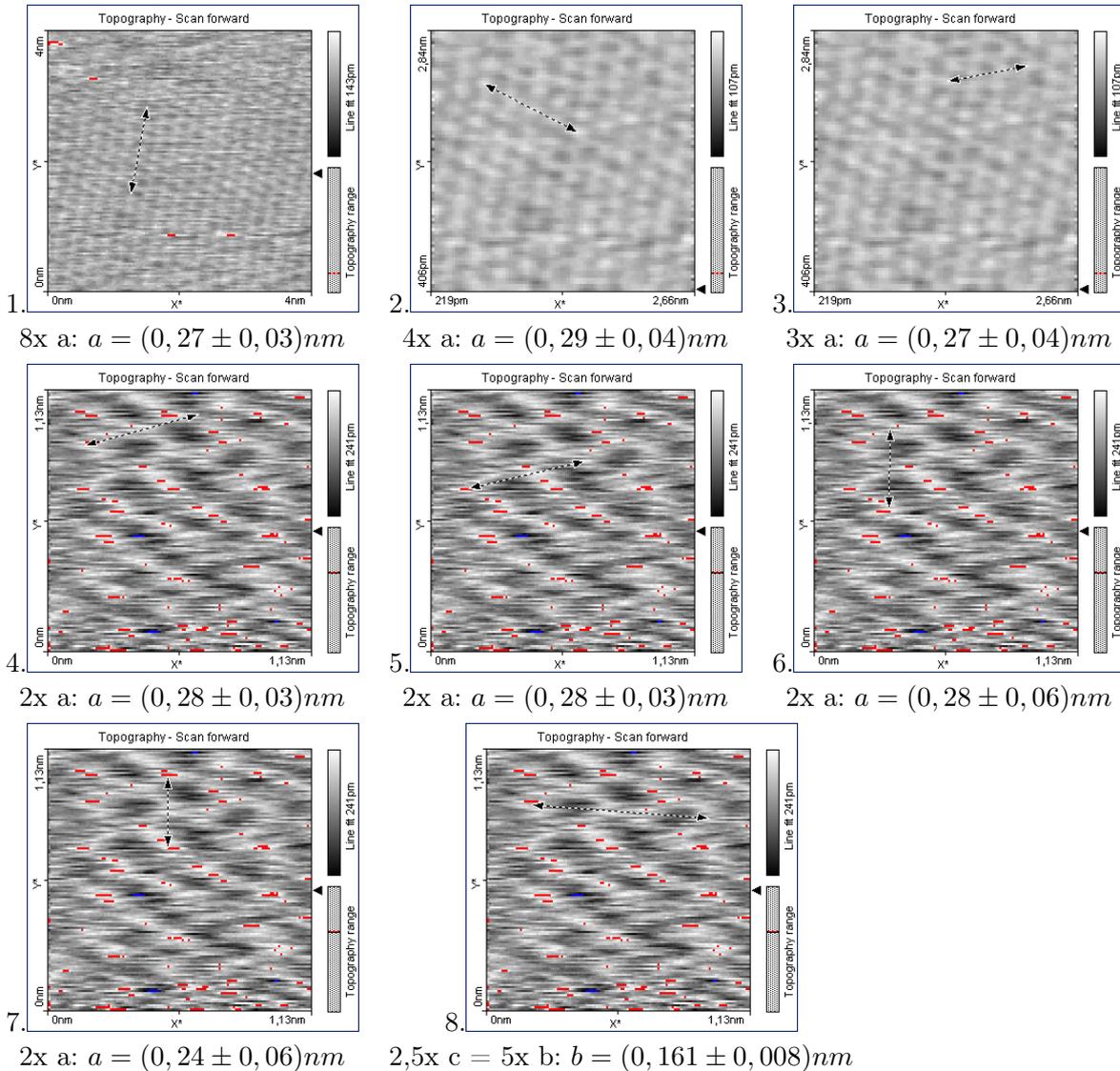


Abbildung 16: Nummerierung der C-Atome im Graphit

Von den 6 Atomen ist nur jedes zweite als heller Punkt erkennbar. Da jedoch das „Loch“ in der Mitte sehr gut zu sehen ist, kann man auch erkennen, wo die nicht so deutlich sichtbaren Atome sitzen. Im Folgenden sind nun einige gut erkennbare Längen ausgemessen. Beachte: die Bilder sind nicht der Eichung entsprechend Skaliert - die Ringe sehen flachgedrückt aus. In den Längenangaben ist die Eichung selbstverständlich berücksichtigt.



Die Werte zeigen sowohl für horizontale als auch vertikale Strecken, dass die Ringe in beide Richtungen das gleiche Längenverhältnis haben. Dies deutet bereits auf eine gute Eichung hin. Zudem stimmen die gemessenen Strecken gut mit den Literaturwerten $a = 0,246nm$ bzw. $b = 0,142nm$ überein.

Der Fehler der Längen wurde folgendermaßen abgeschätzt: Ein Bild hat eine Auflösung von 128×128 Pixeln. Beim Einzeichnen der Längen liegt man wegen der unscharfen Konturen im Schnitt ca. 4 Pixel daneben. Mit der Länge des Bildes L ist der Fehler dann $\Delta x = \frac{L}{\#Pixel} \cdot 4$.

5.2 Strom-Spannungskennlinien

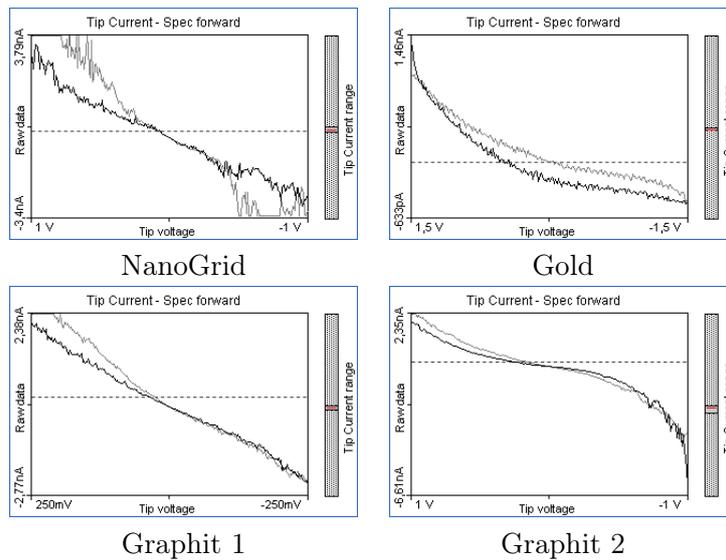


Abbildung 17: Strom-Spannungskennlinien auf verschiedenen Materialien

Die Strom-Spannungskennlinie ist in einem kleinen Bereich um 0V linear, bei höheren Spannungen steigt der Strom nichtlinear an.

5.3 Abstandabhängigkeit des Tunnelstroms

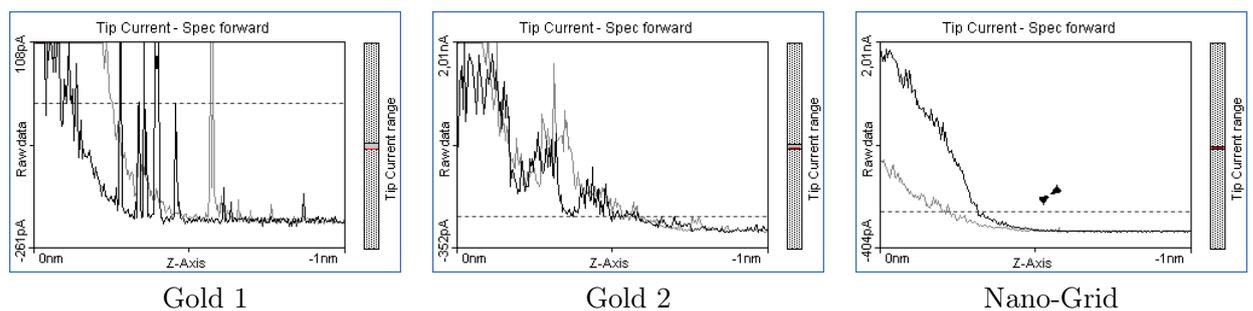


Abbildung 18: Strom-Abstand Abhängigkeit

5.3.1 Mittlere lokale Potentialbarrierenhöhe

Die mittlere lokale Potentialbarrierenhöhe von Gold beträgt $\varphi = \frac{\phi_1 + \phi_2}{2} - \frac{e \cdot U_T}{2}$.

- Bei $U_T = 2V$ und $\phi_1 = \phi_2 = 5,1eV$ $\varphi = 4,1eV$

- Bei $U_T = 1,5V$ $\varphi = 4,35eV$

gemessene Barrierenhöhe

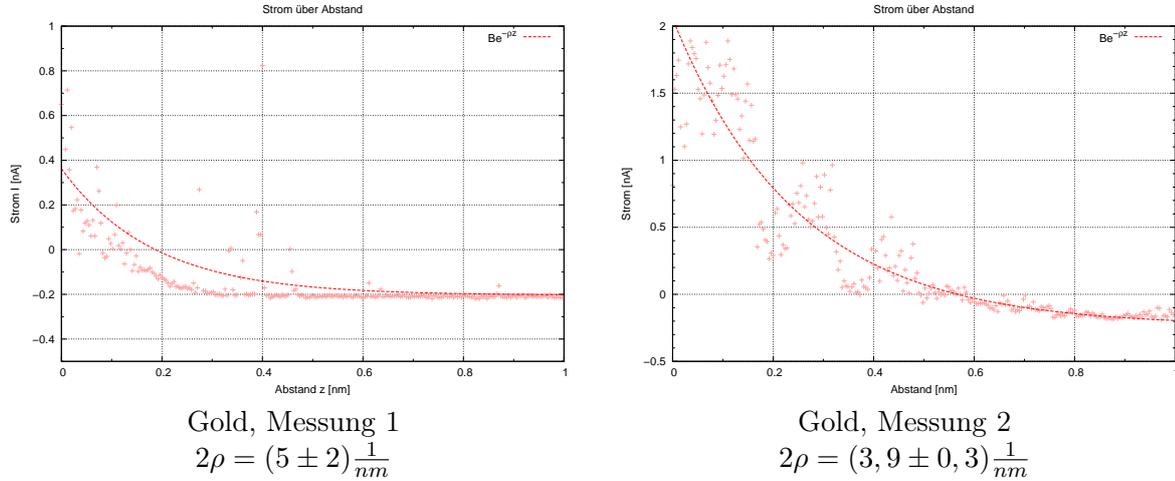


Abbildung 19: Strom-Abstandskennlinien

Aus dem 1D Ansatz des Problems erhält man als Wellenfunktion in der Barriere $\psi_2 = B \cdot e^{-\rho z}$ mit $\rho = \sqrt{\frac{2m_e(E-\varphi)}{\hbar^2}}$ (siehe 2.6.1). Da der Strom $I \propto |\psi_2|^2$ ist, kann man eine Exponentialfunktion an die Strom-Abstand Kennlinie anpassen und erhält so 2ρ . Da die Fermi-Energie E für Gold bekannt ist, kann man obige Gleichung nach der Barrierenhöhe φ auflösen: $\varphi = E - \rho^2 \frac{\hbar^2}{2m_e}$. Mit $E = 5,5eV$ erhält man:

Gold, Messung 1	Gold, Messung 2
$\varphi = (8,4 \pm 0,4) \cdot 10^{-19} J$	$\varphi = (8,57 \pm 0,04) \cdot 10^{-19} J$
$= (5,2 \pm 0,2) eV$	$= (5,35 \pm 0,02) eV$

Die Mittlere lokale Potentialbarrierenhöhe im Vakuum beträgt 4-5eV. Unsere Ergebnisse sind ebenfalls in diesem Bereich. Die experimentellen Werte sind größer als die theoretisch abgeschätzten Werte. Der theoretische Ansatz vernachlässigt z.B. die Wasserschicht zwischen Spitze und Probe und berücksichtigt nur eine Dimension.

6 Anhang

6.1 Fehlerrechnung

- Fehlerfortpflanzung einer Funktion: $\sigma_{f(x,y,\dots)} = \sqrt{\sigma_x^2 \cdot \left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^2 + \sigma_y^2 \cdot \left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)^2 + \dots}$
- statistischer Fehler (Poisson-Verteilung): $\sigma_x = \sqrt{x}$
- Standardabweichung vom Mittelwert (Abschätzung für systematischen Fehler):

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{1}{(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \text{ und } \bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

- gewichteter Mittelwert: $\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{x_i}{\sigma_i^2}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{\sigma_i^2}}$

mit Fehler $\sigma_{\bar{x}} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{\sigma_i^2}}$

- relativer Fehler von R: $\frac{\sigma_R}{R}$
- Notation:

(Wert \pm statistischer Fehler \pm systematischer Fehler) bzw. (Wert \pm systematischer Fehler)

6.2 Abbildungen

Abbildungsverzeichnis

1	Schematischer Aufbau eines Lichtmikroskops	2
2	Bändermodell	5
3	Struktur von Graphit	6
4	Oberflächendiffusion	7
5	Potentialtöpfe örtlich und elektrisch getrennt	8
6	Potentialtöpfe nah zusammen	9
7	Spitzenmodell	10
8	Schematischer Versuchsaufbau	11
9	Übergang vom Bild zu tatsächlichen Größenverhältnissen	11
10	STM-Bilder von Gold	12
11	Strom-Spannungskennlinien auf Gold	13
12	Graphit	13
13	Strom-Spannungskennlinie auf Graphit	13
14	HOPG atomar aufgelöst	14
15	NanoGrid	15
16	Nummerierung der C-Atome im Graphit	16
17	Strom-Spannungskennlinien auf verschiedenen Materialien	17
18	Strom-Abstand Abhängigkeit	17
19	Strom-Abstandskennlinien	18

6.3 Tabellen

- Eichung (Seite 1)
- Graphit (Seite 2)
- Barriere (Seite 3)