



BERGISCHE  
UNIVERSITÄT  
WUPPERTAL

BERGISCHE UNIVERSITÄT WUPPERTAL

FORTGESCHRITTENEN PRAKTIKUM

---

# Rastertunnelmikroskopie

---

*Verfasser:*

Henrik JÜRGENS

Frederik STROTHMANN

*Tutor:*

Vitali PORSHYN

**Abstract:**

Mithilfe eines Rastertunnelmikroskops wird die Struktur verschiedener Materialien analysiert, indem deren Oberfläche in verschiedenen Modi abgefahren wird.

Bereich	max. %	+ / 0 / -	erreicht %
Einleitung & Theorie	15		
Durchführung	70		
Auswertung			
phys. Diskussion			
Zusammenfassung			
Formales	15		
Note			

26. September 2015

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>Theorie</b>	<b>2</b>
2.1	Tunneleffekt . . . . .	2
2.2	Oberflächenrauheit . . . . .	3
<b>3</b>	<b>Struktur der Proben</b>	<b>4</b>
3.1	Graphit . . . . .	4
<b>4</b>	<b>Versuchsaufbau</b>	<b>5</b>
4.1	Betriebsmodi . . . . .	7
4.1.1	Constant Current Mode . . . . .	7
4.1.2	Constant Hight Mode . . . . .	7
4.2	Versuchsdurchführung . . . . .	8
4.3	Verwendete Formeln . . . . .	8
4.4	Messergebnisse . . . . .	8
4.5	Auswertung . . . . .	8
4.6	Diskussion . . . . .	8
<b>5</b>	<b>Fazit</b>	<b>8</b>

# 1 Einleitung

In diesem Versuch werden Oberflächen verschiedener Proben mittels Rastertunnelmikroskopie auf deren Gitterstruktur und morphologische Eigenschaften untersucht. Elektronendichte, Oberflächenrauheit und die atomare Gitterstruktur können mit dem Rastertunnelmikroskop (RTM) analysiert werden. Der quantenmechanische Tunneleffekt wird genutzt, um leitende Materialien zu untersuchen. Indem zwischen einer einatomigen Platin-Iridium-Elektrode und der zu untersuchenden Probe eine Potentialdifferenz angelegt wird, kommt es abhängig von der Entfernung der Pt-Ir-Elektrode zur Probe und dessen Elektronendichte zu einem Tunnelstrom, welcher Rückschlüsse auf die Struktur der Probe erlaubt. Die Elektronendichte der Oberfläche kann durch systematisches Abrastern der Probe erfasst werden, sodass mithilfe verschiedener Modi (CC und CH: Constant Current und Constant Height) ein Bild der Materialoberfläche entsteht.

## 2 Theorie

In diesem Versuchsteil werden die für diesen Versuch wichtigen theoretischen Grundlagen erklärt.

### 2.1 Tunneleffekt

Der Tunneleffekt, auf dem die Funktionsweise des RTM basiert, kann nichtrelativistisch mit der stationären Schrödingergleichung für Materiewellen beschrieben werden.

$$E\psi = \hat{H}\psi \quad (1)$$

Über das Korrespondenzprinzip erhält man aus dem klassischen nichtrelativistischen Hamiltonian für ein Teilchen im Potential  $V$  die Ortsdarstellung der Schrödingergleichung:

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

$|\psi|^2$  gibt dabei die Aufenthaltswahrscheinlichkeit des Teilchens im Volumenelement  $dV(\mathbf{x})$  an. Der Tunneleffekt kann anhand eines einfachen Beispiels verstanden werden, indem in einer Dimension ein Potentialwall in Form eines Kastens angenommen wird. Ein veranschaulichendes Bild ist wichtiger, als ein langer Rechenweg, weshalb es vorzuziehen ist, die Lösung mit Abbildung 1 zu veranschaulichen.



Abbildung 1: Eindimensionale Schrödigergleichung mit Potentialwall in der Mitte. Zu sehen ist der exponentielle Abfall der Amplitude der Wellenfunktion, wodurch die Aufenthaltswahrscheinlichkeit hinter dem Potentialwall  $D^2$  kleiner als  $A^2$  ist. (vgl. [3])

Die Herleitung kann ohne Probleme auf der Seite [2] nachvollzogen werden. Die Lösung der Schrödigergleichung innerhalb der Potentialbarriere ergibt einen exponentiellen Abfall der Aufenthaltswahrscheinlichkeit mit zunehmender Eindringtiefe, wobei die Wellenlänge gleich bleibt. Damit die Elektronen während des Versuches nicht in beide Richtungen gleich stark tunneln, wird eine Potentialdifferenz zwischen Bereich (I) und Bereich (III) erzeugt, wodurch die Elektronen eine Vorzugsrichtung bekommen. Der Tunnelstrom  $I_{Tunnel}$ , die entscheidende Messgröße, ist proportional zur Tunnelwahrscheinlichkeit multipliziert mit der angelegten Spannung  $V_{bias}$  und der Zustandsdichte  $\rho_s$  bei der Fermienergie  $E_f$ . Die Differenz der Austrittsarbeiten der Materialien wird mit  $\Phi$  bezeichnet, wobei  $z$  der Abstand der Sonde zum Material ist:

$$I_{Tunnel} \propto V_{bias} \rho_s(E_f) \exp \left[ -2 \frac{\sqrt{2m(\Phi - E)} z}{\hbar} \right] \approx V_{bias} \rho_s(E_f) \exp \left[ -1,025 \sqrt{\Phi} z \right] \quad (3)$$

Die zweite Näherung gilt, falls die Potentialbarriere  $\Phi \gg E$  ist und die erste Proportionalität gilt. Die erste Proportionalität ist dabei selber eine Näherung für  $2 \frac{\sqrt{2m(\Phi - E)} z}{\hbar} \gg 1$ , da die nicht genäherte Tunnelwahrscheinlichkeit

$$W_{Tunnel} = \frac{1}{1 + \frac{\Phi^2}{4E(\Phi - E)} \sinh^2 \left( \frac{\sqrt{2m(\Phi - E)} z}{\hbar} \right)} \quad (4)$$

entspricht. Die starke  $z$ -Abhängigkeit wird in diesem Versuch ausgenutzt.

## 2.2 Oberflächenrauheit

Die Oberflächenrauheit oder kurz Rauheit ist in der Oberflächenphysik eine Größe zur Charakterisierung der Unebenheit der Oberflächenhöhe. Beschrieben wird sie mit der mittleren

betragsmäßigen Abweichung von der mittleren Oberflächenhöhe, oder mit der mittleren quadratischen Abweichung von der Oberflächenhöhe. Die Formeln sind im Zweidimensionalen, wie auch im Dreidimensionalen, auf Hyperflächen anwendbar. Für die Berechnung der Rauheit wird Formel 5 und Formel 6 für das arithmetische Mittel  $R_a$  und für das quadratische Mittel  $R_q$  verwendet.

$$R_a = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |z_i - \bar{z}| \quad (5)$$

$$R_q = \frac{1}{N} \sqrt{\sum_{i=1}^N (z_i - \bar{z})^2} \quad (6)$$

Das quadratische Mittel gewichtet größere Abweichungen stärker als das arithmetische Mittel. Der Mittelwert  $\bar{z}$  wird über Formel 7 bestimmt.

$$\bar{z} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N z_i \quad (7)$$

### 3 Struktur der Proben

Alle in diesem Versuch untersuchten Materialien (Gold, Graphit und eine unbekannte Probe) sind Leiter, sie unterscheiden sich jedoch in der Konfiguration der Elektronen. Es gibt einen Unterschied zwischen der Verteilung der Elektronen in Metallen und Halbleitern. Metalle werden dabei durch das Elektronen-Gas beschrieben und somit eine homogene Verteilung angenommen. Bei der Beschreibung von Halbleitern müssen noch Bandlücken berücksichtigt werden. Da die räumliche Verteilung der Elektronen nicht homogen ist, kann aus der Ladungsverteilung die Position der Atome bestimmt werden. Es soll nun genauer auf die beiden bekannten Proben Gold und Graphit eingegangen werden.

#### 3.1 Graphit

Die Graphitprobe ist ein HOPG (Highly ordered pyrolytic graphit), ein Halbleiter mit einer hcp-Gitterstruktur. In Abbildung ?? ist die Gitterstruktur des Graphit zu sehen. In einer Ebene werden die Kohlenstoffatome aufgrund der sp<sup>2</sup>-Hybridisierung stark durch kovalente Bindungen zusammengehalten. Zwischen den Ebenen werden die Kohlenstoffatome nur von Van-der-Waals-Kräften zusammengehalten.

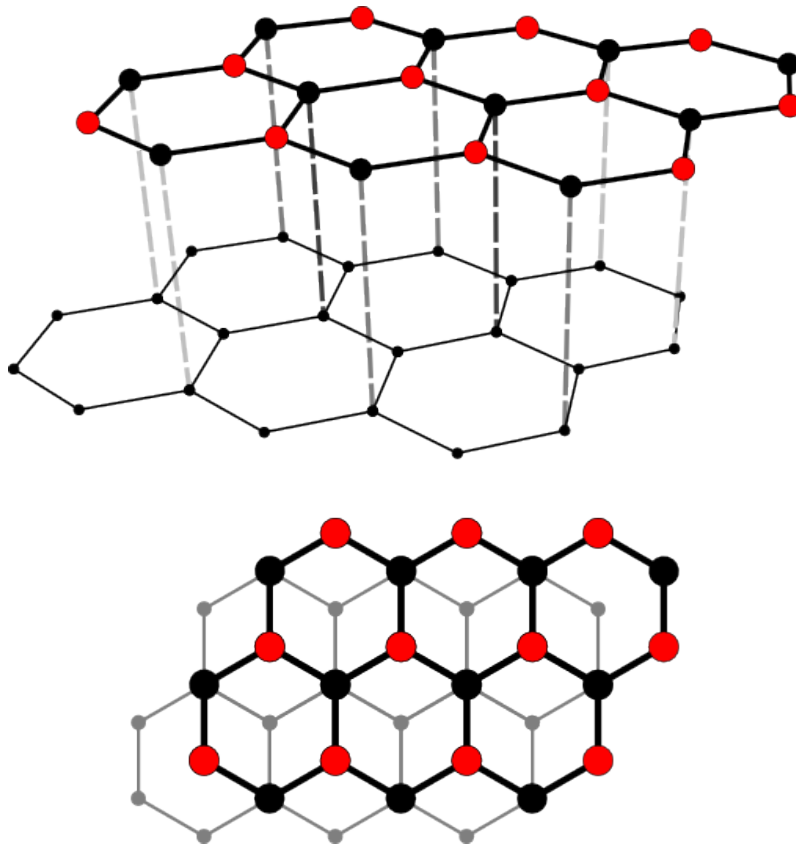


Abbildung 2: Schematische Struktur von Graphit. Es liegen immer die  $2n$  und die  $2n-1$  Ebene genau übereinander. Die Ebenen untereinander besitzen nur an jedem zweiten Punkt der Hexagonale eine Verbindung. Entnommen von ??

## 4 Versuchsaufbau

In diesem Abschnitt wird der Aufbau des Rastertunnelmikroskops beschrieben. Das Rastertunnelmikroskop basiert auf dem in Abschnitt ?? beschriebenem Tunneleffekt. Die leitende Spitze des Rastertunnelmikroskops wird hinreichend nah an die Oberfläche des zu untersuchenden Material geführt, berührt diese jedoch nicht. Wird eine Spannung angelegt, so kann ein “Tunnelstrom” fließen. Bewegt man nun die Spitze nun Parallel zur Oberfläche, so erhält über den Tunnelstroms ortal aufgelöste Informationen über die Oberfläche.

Grundlegend ist das Rastertunnelmikroskop aus drei Elementen aufgebaut, einem Tastkopf, einem Piezosteurelement und einer Probe. Der Tastkopf besteht aus einem Draht, mit einer Spitze, die möglichst einatomig sein soll. Durch die Dicke der Spitze wird das Auflösungsvermögen des Mikroskops festgelegt. In diesem Versuch wird ein Platin-Iridium-Draht als Tastkopf verwendet. Das Piezosteurelement dient zur Positionierung der Spitze. Dabei kann der Tastkopf im nm-Bereich verschoben werden. Für die Untersuchung einer Oberfläche mit einem Rastertunnelmikroskops muss die Probe bestimmte Eigenschaften erfüllen. Die Probe muss ein Leiter oder ein Halbleiter sein. Das beschichten der Oberfläche mit einem leitendem Material ist nicht möglich, da die Oberflächenstruktur durch die Beschichtung verdeckt wird.

Ein schematischer Versuchsaufbau ist in Abbildung 3 zu sehen.

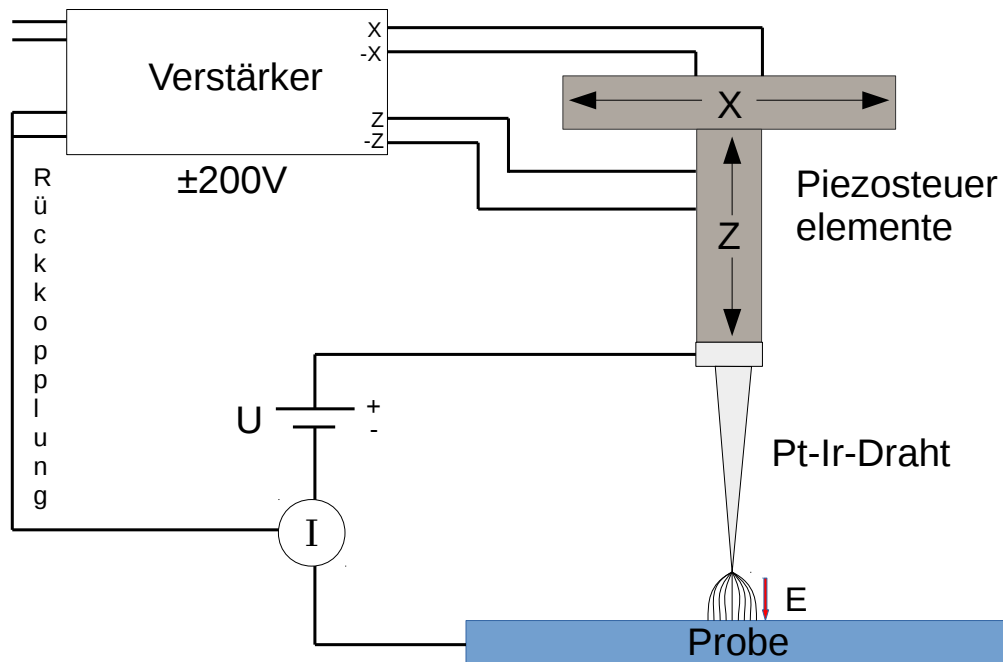


Abbildung 3: Schematische Skizze des Versuchsaufbaus. Die Positionierung der Platin-Iridium-Tastkopes wird über die Piezoelemente im nm-Bereich gesteuert. Die Rückkopplung dient zur Steuerung der Höhe des Tastkopfes.

Da eine Spannung angelegt wird, sind die Fermi-Energien der beiden Materialien nicht mehr auf dem selben Niveau. Ist der Abstand zwischen der Spitze und dem Material hinreichend klein, so kann die Potenzialbarriere durchtunnelt werden und es fließt ein Tunnelstrom. Der Tunnelstrom wird durch den Verstärker in eine Spannung umgewandelt und kann so gemessen werden. Dabei ist die Spannung proportional zu Tunnelstrom und kann in Abhängigkeit des Abstandes zwischen der Spitze und der Probe mit Gleichung ?? bestimmt werden. Die Feldstärke  $E$ , des E-Feldes zwischen der Spitze und der Probe kann mit  $E = \frac{U}{d}$  bestimmt werden. Die Stromdichte  $j$  erhält man durch  $j = \frac{I}{A}$ . Für die Oberfläche der Spitze wird angenommen, dass sie aus nur einem Atom besteht. Die Oberfläche lässt sich mit  $A = \pi \cdot R_{Atom}^2$  bestimmt. Für den Radius wurde ein Wert von  $1.35 \text{ \AA}$  [1] angenommen, es ergibt sich eine Oberfläche von  $5.73 \text{ \AA}^2$ . Die Parameter und die erwarteten Werte sind in Tabelle 1 beschrieben.

Tabelle 1: Parameter mit Erwartungswerten für die Graphit und Gold.

Parameter	Gold	Graphit
tip voltage U	50mV	500mV
unnelstrom U	1nA	1nA
Feldstärke E	50kV/mm	500kV/mm
Stromdichte j	17,5kA/mm <sup>2</sup>	17,5kA/mm <sup>2</sup>

Anhand der Werte in Tabelle 1 kann man sehen, dass die Feldstärke und die Stromdichte sehr große Werte annehmen, dies liegt an der geringen räumlichen Ausdehnung.

## 4.1 Betriebsmodi

Das Rastertunnelmikroskop kann in zwei Modi betrieben werden, Constant Current Mode (“Topographie”) und Constant Hight Mode (“Elektronendichte”).

### 4.1.1 Constant Current Mode

Im Constant Current Mode wird der Abstand zwischen der Probe und dem Tastkopf konstant gehalten. Dafür wird ein über ein PID-Regler der Abstand so geregelt, dass der Tunnelstrom konstant bleibt. Die Information über die Oberflächenstruktur kann aus der Veränderung der z-Position entnommen werden. Ein schematische Skizze der Funktionsweise ist in Abbildung ?? zu sehen.

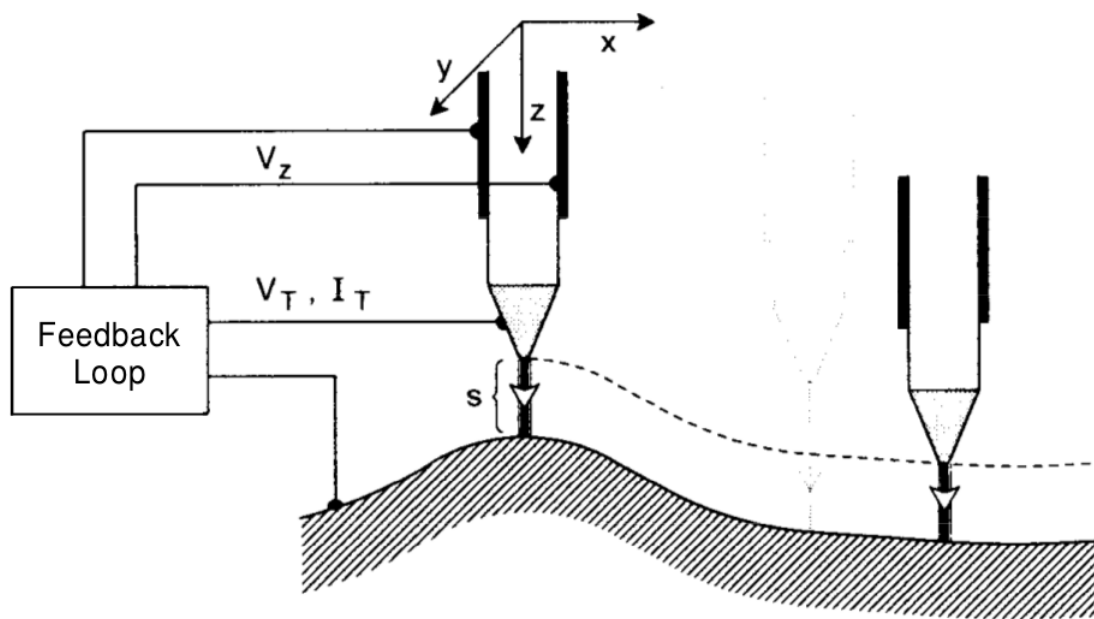


Abbildung 4: Darstellung des Constant Current Mode für das Rastertunnelmikroskop. Entnommen von ??

### 4.1.2 Constant Hight Mode

Im Constant Hight Mode wird der Abstand zwischen Probe und Tastkopf einmal eingestellt und nicht mehr verändert. Bei Unebenheiten in der Oberfläche kann es jedoch zu Kollisionen kommen, wodurch der Tastkopf zerstört werden kann. Der Vorteil der Messmethode ist, dass der gemessenen Tunnelstrom proportional zur Elektronendichte bei der Fermi-Energie ist.



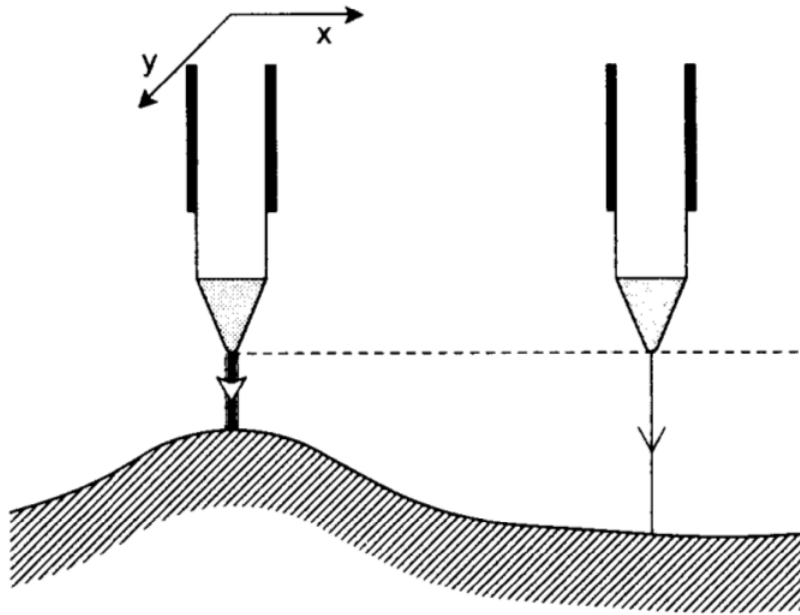


Abbildung 5: Darstellung des Constant Hight Mode für das Rastertunnelmikroskop. Entnommen von ??

## 4.2 Versuchsdurchführung und Auswertung

## 4.3 Diskussion

## 5 Fazit

## Literatur

- [1] *Iridium*. URL: <https://de.wikipedia.org/wiki/Iridium> (besucht am 24.09.2015).
- [2] *Tunneleffekt*. URL: <https://de.wikipedia.org/wiki/Tunneleffekt> (besucht am 23.09.2015).
- [3] *Tunneleffekt - Wellenfunktion und Potential (1)*. URL: <http://www.semibyte.de/wp/graphicslibrary/gl-physics/tunneleffekt> (besucht am 23.09.2015).