

# **422: Rastertunnelmikroskopie**

Leonie Dessau & Lena Beckmann

1.-2.12.2025

# 1 Einleitung

## 1.1 Versuchsziel

Rastertunnelmikroskopie ist eine wichtige Methode, um Strukturen zu untersuchen, die mit klassischen optischen Mikroskopen nicht aufgelöst werden können. Auch eine atomare Skala der Auflösung ist dabei erreichbar [3, S. 2]. In dem Versuch wird ein Rastertunnelmikroskop (RTM) genutzt, um die Oberflächentopologie und damit die Kristallstruktur von auf Saphir oder Silizium aufgedampften Goldkügelchen und anschließend von hochgeordneten pyrolytischem Graphit (HOPG) zu untersuchen und letzteres auch auf atomarer Skala aufzulösen [3, S. 1]. Außerdem wird auch die Oberflächenstruktur von Molybdändisulfid ( $\text{MoS}_2$ ) mit dem RTM untersucht.

## 1.2 Funktionsweise eines RTM

Grundsätzlich nutzt ein RTM den quantenmechanischen Tunneleffekt, sowie feine Positionierung über Piezokristalle, aus um die Oberfläche einer Probe mit einer atomar dünnen Spalte abzurastern und Daten über ihre Struktur zu messen.

### 1.2.1 Tunnelstrom

Bei quantenmechanischer Betrachtung können Teilchen durch Potentialbarrieren Tunneln, die bei klassischer Betrachtung das Teilchen stoppen sollten. [2, S. 707–709]

Der Resultierende Tunnelstrom ist hängt exponentiell vom Abstand ab und ist sehr empfindlich bei Änderungen in den Größenordnungen weniger Angström. Es gilt die folgende Proportionalität:[1]

$$I \propto U_T \exp(-A\Phi^{1/2}z) \quad (1.1)$$

Wobei  $z$  der Abstand von Spalte zu Probe darstellt. **[geschlossene Form für Strom. ggf gerthsen S.708/709]**

### 1.2.2 Piezoeffekt

Der Piezoeffekt beschreibt den Zusammenhang zwischen elektrischer Spannung und Verformung

von Materialien mit polaren Achsen. Dieser Zusammenhang ist näherungsweise linear;

$$\Delta x = \delta U \quad (1.2)$$

Dieser Effekt ist in der Größenordnung von  $10^{-11}$ – $10^{-9}\text{ m V}^{-1}$  und erlaubt somit relativ einfach Positionsregelung auf atomaren Größenskalen. [2, S. 339–341]

### 1.2.3 Regelkreis

Der Abstand der Spalte über der Probe muss geregelt werden, damit der Abstand stets klein genug ist, damit ein messbarer Tunnelstrom fließt ohne jedoch die Probe zu berühren und so potentiell die Spalte zu zerstören.

Zu diesem Zweck wird eine PID-Schleife verwendet. Dies ist eine in der Regelungstechnik übliche Art, ein System zu regeln, so dass es sich möglichst effizient einem Sollpunkt annährt. **[cite] macht es Sinn hier die Standardform der PID Regelgleichung hinzupacken und zu erläutern??]**

Wird der Proportionalfaktor auf Null gesetzt und die Integrationszeit sehr lang gewählt, folgt die Spalte nur noch der generellen Tendenz oder Schieflage der Oberfläche, nicht mehr aber Unebenheiten. Dies entspricht dem Wechsel vom konstanten Strom Modus (CCM) zum konstanten Höhen Modus (CHM). [3]

## 2 Untersuchung von Gold im RTM

Um die Funktionsweise des RTM im Bereich größer der atomaren Auflösung von Graphit-Gittern zu überprüfen, wird zunächst die Oberflächentopologie einer mit Gold bedampften Silizium- oder Saphir-Probe untersucht.

### 2.1 Theoretische Überlegungen

### 2.2 Experimenteller Aufbau

Es werden zwei Goldproben mit dem RTM untersucht. Hierbei wird nicht direkt Gold untersucht, welches aufgrund seiner kristallinen Struktur aus elektrisch gleichberechtigten Elektronen [Reference und mehr Info zu Struktur von Gold va in RTM-Aufnahmen] isoliert zu keinen ausschlussreichen Aufnahmen führen würde. Statt dessen werden Proben von Silizium bzw. Saphir verwendet, auf welche Gold aufgedampft wurde, mit anschließendem Erhitzen [was tut das erhitzen?].

Auf der glatten Si- oder Saphir-Oberfläche sind so kleine Goldkügelchen ohne festes Muster angeordnet. Sie sollten so bei supra-atomaren Auflösungen des Mikroskops gut sichtbar sein. Eine atomare Auflösung ist bei diesen Proben auch nicht sinnvoll, da Gold, wie genannt, sehr gleichmäßige Elektronenverteilungen aufweist [fact check this] und so keine deutlichen Strukturen innerhalb des Kristallgitters erkennbar sein würden.

Da die Goldproben durch die unvorhersehbar verteilten Goldkügelchen hohe Korrugation aufweisen, wird im Folgenden das RTM immer im *constant current*-Modus betrieben. Die Parameter des Regelkreises waren dabei auf  $P = 1000, I = 2000$  eingestellt. Eine Aufnahme im *constant height*-Modus hätte eine ausreichend große ebene Fläche erfordert, was bei den Goldproben zu keinen interessanten Ergebnissen geführt hätte. Es war zu erwarten, dass die Goldkügelchen, die sich physisch erhöht auf der Oberfläche des Basismaterials befinden, auch im Höhenbild (Verlauf der Spitzenhöhe als *z-Höhe*) als größere, für sich relativ homogene Strukturen erhöht erscheinen würde, während die Lücken zwischen ihnen aufgrund ih-

rer deutlich geringere Elektronenaufenthaltswahrscheinlichkeiten (also niedrigeren Tunnelstrom) zu niedrigeren Spitzenposition (z-Werte) führen würden. Die relativ (zur atomaren Größenordnung  $\mathcal{O}(10^{-10} \text{ m} = \text{\AA})$ ) großen Kugelchen sollten deutlich als mehr oder weniger zufällig über das Basismaterial verteilt sichtbar werden. [citations needed]

Es wurden die beiden Goldproben (Probe 1: Nummer 16, Probe 2: Nummer 14) nacheinander mit dem RTF untersucht.

### 2.3 Messergebnisse

### 2.4 Auswertung

### 3 Highly Ordered Pyrolytic Graphite (HOPG)

[Kristallstruktur] [Bindungen zwischen Ebenen] [Messbare Elektronen]

#### 3.1 Durchführung

Die HOPG Probe wird zunächst unter dem USB Mikroskop dokumentiert (siehe ??) [\[bild mit skala\]](#)

Anschließend wird die Probe vorbereitet in dem ein Stück Tesa Film auf die Probe geklebt und dann abgezogen wurde. Dies sorgt dafür, dass eine Frische, unverschmutzte Graphitschicht freigelegt wird. Es wird zunächst im CCM ein  $200 \text{ nm} \times 200 \text{ nm}$  STM Bild 3.1 aufgenommen und eine geeignete Flache Stelle gesucht.

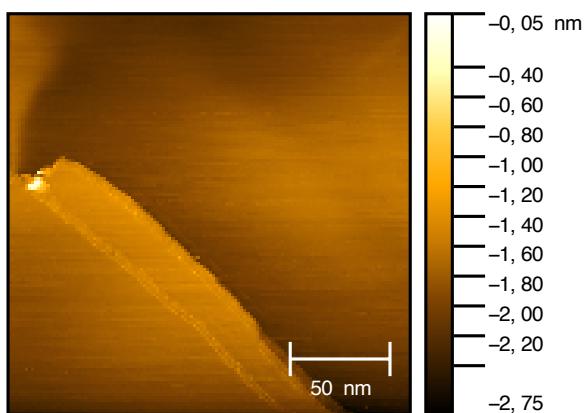


Abbildung 3.1: Übersichtsaufnahme der Graphoberfläche im konstanten Strom Modus [\[scanspeed\]](#)

In der unteren linken Hälfte der Aufnahme 3.1 fand sich eine Stufe, ansonsten wird die Oberfläche als eben identifiziert. Es wird im weiteren ein Ausschnitt in der rechten oberen Hälfte von Abbildung 3.1 genutzt. Schrittweise wird der Ausschnitt verkleinert und im CCM die Glätte des Ausschnitts verifiziert. Bei einer Größe von  $4 \text{ nm} \times 4 \text{ nm}$  wird anschließend auf den konstanten Höhen Modus (CHM) gewechselt, in dem die Konstante P auf 0 und I auf 4 gesetzt werden.

Nun werden Aufnahmen mit atomarer Auflösung hergestellt (siehe 3.2).

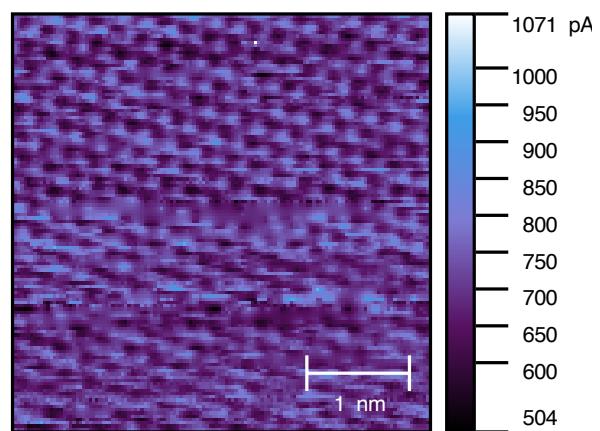


Abbildung 3.2: hopg go brr

## Literatur

- [1] H. Rohrer G. Binnig. In: *Surface Science* 126 ().
- [2] Christian Gerthsen und Dieter Meschede. *Gerthsen Physik*. Springer, 2013. doi: 10 . 1007/978-3-662-45977-5.
- [3] *Versuchsbeschreibung P422: Rastertunnelmikroskopie*. Physikalisches Institut, Universität Bonn. URL: <https://uni-bonn.sciebo.de/s/0FYPwvfOVjkYhBE> (besucht am 04.12.2025).