

Rastertunnelmikroskopie

Harald Haakh, Heiko Harder. Messungen vom 15.01.2007

Zusammenfassung: Die Rastertunnelmikroskopie bietet eine robuste und technisch einfache Möglichkeit Oberflächen in bis hin zu atomarer Auflösung abzubilden. Ein Rastertunnelmikroskop (STM) wurde mit einem bekannten Gitter kalibriert, die Oberflächenbeschaffenheit von Graphit untersucht und der Gitterabstand des Graphits gemessen.

1 Einführung

Die Bestimmung der Oberflächenstruktur verschiedener Materialien mittels eines Rastertunnelmikroskops soll mit der Arbeitsweise dieses Gerätes vertraut machen. Im Gegensatz zur wellenoptischen Mikroskopie, bei der das Auflösungsvermögen durch die Wellenlänge der verwendeten Strahlung begrenzt ist, bedient sich die Rastertunnelmikroskopie eines völlig anderen Verfahrens. Hierbei findet der aus der Quantenphysik bekannte Tunneleffekt Anwendung. Statt die Probe also zu bestrahlen und die reflektierten Strahlen zu analysieren, fährt man mit einer feinen Nadel die Oberfläche des Materials ab und erhält auf diese Weise aus dem auftretenden Tunnelstrom räumliche Informationen bis in den atomaren Bereich.

2 Funktionsweise

Wie bereits erwähnt wird beim Rastertunnelmikroskop eine feine Metallspitze an die Oberfläche des Materials herangeführt. Der Abstand bewegt sich dabei in Größenordnungen von einigen Nanometern respektive einigen Atomlagen. Der Raum zwischen Nadel und Materialoberfläche stellt dabei klassisch betrachtet für die Elektronen eine verbotene Zone dar. Ist diese Zone dünn genug und die Potentialbarriere nicht zu hoch (siehe 1), kann sie jedoch von den Elektronen durchtunnelt werden, so dass ein messbarer Tunnelstrom fließt. Die Tunnelwahrscheinlichkeit ist nimmt exponentiell mit der Breite der Barriere ab. Der Tunnelstrom ist also ein Maß für den Abstand zwischen Nadel und Probe, oder genau genommen, zwischen demjenigen Atom an der Spit-

ze der Nadel und dem des Materials, die sich am nächsten liegen. Um die Richtung des Elektronenflusses zu bestimmen wird eine Spannung zwischen Probe und Nadel so angelegt, dass sich die Energieverhältnisse zu Gunsten eines Tunnelns in Richtung der Nadel verschieben. Die mit der Unschärferelation zusammenhängende Tunnelbedingung wird durch die Möglichkeit des präzisen Heranführens der Nadel auf wenige Nanometer erfüllt.

$$d \cdot \sqrt{E_{\text{Barriere}}} \leq h \cdot \sqrt{\frac{2}{m}} \quad (1)$$

Die Energiebarriere wird hierbei durch die Austrittsarbeit der Elektronen aus dem Material und die angelegte Spannung bestimmt.

Technisch wird die Nadel durch Piezostelelemente vorgenommen. Sowohl in der xy-Ebene kann so das Messfeld abgerastert werden, als auch der Abstand zur Probe in z-Richtung - in gewissen Grenzen - variiert werden, was für den Messmodus mit konstantem Tunnelstrom relevant ist. Der Vorteil besteht hier insbesondere in exakter Positionierung und schnellerer Reaktion der Piezoelemente gegenüber der Schrittmotorsteuerung.

Für die Untersuchung des Materials kann nun entweder der Tunnelstrom oder der Abstand der Nadel zur Probe konstant gehalten werden. Beide Verfahren liefern ein Abbild der Ladungsverteilung auf der Oberfläche, unterscheiden sich jedoch in der Vorgehensweise und im Zeitaufwand.

- Das erste Verfahren justiert die Höhe der Nadel mittels eines Piezo-Stellers jeweils so, dass der Tunnelstrom konstant gehalten wird. So wird die Geo-

metrie der Probe berücksichtigt und eine Beschädigung der Nadel vermieden. Der Zeitaufwand ist bei dieser Vorgehensweise relativ hoch, da sie für jeden Messpunkt durch die piezoelektrische Höheneinstellung der Nadel eine gewisse Einschwingzeit benötigt.

- Ist der Abstand klein genug gewählt und sind Beschädigungen der Nadel auszuschließen, liefert das Verfahren konstanter Höhe ebenfalls gute Resultate in wesentlich kürzerer Zeit. Da eine Nachjustierung nicht nötig ist, sondern lediglich der Tunnelstrom gemessen wird, kann das Abtasten der Oberfläche sehr schnell erfolgen.

3 Kalibrierung

Zur Kalibrierung des STM wurde ein quadratisches Gold-Punktgitter verwendet, dessen Linienabstand später mittels eines Rasterkraftmikroskops zu $d_{ref} = 135\text{nm}$ bestimmt wurde.

Mit dem STM wurde die Oberfläche im Tunnelstrommodus bei verschiedenen Vergrößerungsstufen aufgenommen (Abb. 1). Das Rauschen des Signals wurde durch Beschränkung des Fourierspektrums auf tiefe Frequenzen verringert.

An mehreren Stellen des Bildes wurde der Linienabstand in beiden Richtungen an mehreren Stellen der Aufnahme mittels einer Graphiksoftware bestimmt. Alternativ hätten mit geeigneter Software Schnitte durch die Bilder gelegt werden können. Die etwas höhere Genauigkeit im Pixelbereich ist aber in diesem Rahmen nicht relevant.

Die gemittelten Werte wurden mit dem Referenzwert verglichen, und Korrekturfaktoren

$$f_k = \frac{d_{ref}}{d_{gem}} \Rightarrow f_{kx} = 0.84 \quad f_{ky} = 1.05 \quad (2)$$

ermittelt.

4 Graphit

Graphit besteht aus festen Ebenen von sp^2 -hybridisiertem Kohlenstoff in hexagonaler An-

ordnung. Die Ebenen sind nur schwach durch Van-der-Waals-Kräfte gebunden, während die Kohlenstoffbindungen sehr stabil sind. Aus diesem Grunde lassen sich Schichten sehr leicht verschieben oder abtragen und das Material ist sehr weich.

Eine Graphitprobe wurde präpariert, indem mittels eines Klebestreifens eine dünne Schicht von der Oberfläche entfernt wurde. Auf diese Weise können grobe Verunreinigungen reduziert werden. Aufnahmen bei verschiedenen Vergrößerungsstufen zeigen die Abbildungen 2 bis 4.

Bei niedriger Vergrößerung (Abb. 2) zeigt sich die Makrostruktur der Oberfläche. Verunreinigungen und Bruchkanten sind gut zu erkennen. Bei höherer Auflösung sind Oberflächenfehler erkennbar, leider sind die Versetzungen immer höher, als es für eine einzelne Kristallebene zu erwarten ist. Es handelt sich also um Bruchkanten, nicht um Kristallebenen, so dass die Höhe der Einheitszelle nicht bestimmt werden konnte. Den Schnitt zeigt Abbildung 5.

Bei höchster Vergrößerungsstufe sind sogar einzelne Atome erkennbar (Abb. 3).

Man erkennt die hexagonale Struktur des Graphitgitters und kann einzelne Fehlstellen identifizieren. Auffällig ist, dass von den sechs Atomen der Einheitszelle jeweils nur drei zu erkennen sind.

In einem Bereich wurden die Abstände der Gitterebenen in allen drei ausgezeichneten Richtungen (rot nachgezogen) vermessen. Um den Abstand nächster Nachbarn zu bestimmen, wurde über alle drei Richtungen gemittelt. Der Abstand zweier im STM-Bild sichtbarer Atome beträgt danach $d_G = (23 \pm 4)\text{nm}$. Aus der Literatur¹ ergibt sich ein Wert von $d_{lit} = 24.56\text{nm}$.

Potsdam, den 25. Januar 2007

Harald Haakh

Heiko Harder

¹Wikipedia - The free encyclopedia: Graphite <http://en.wikipedia.org>

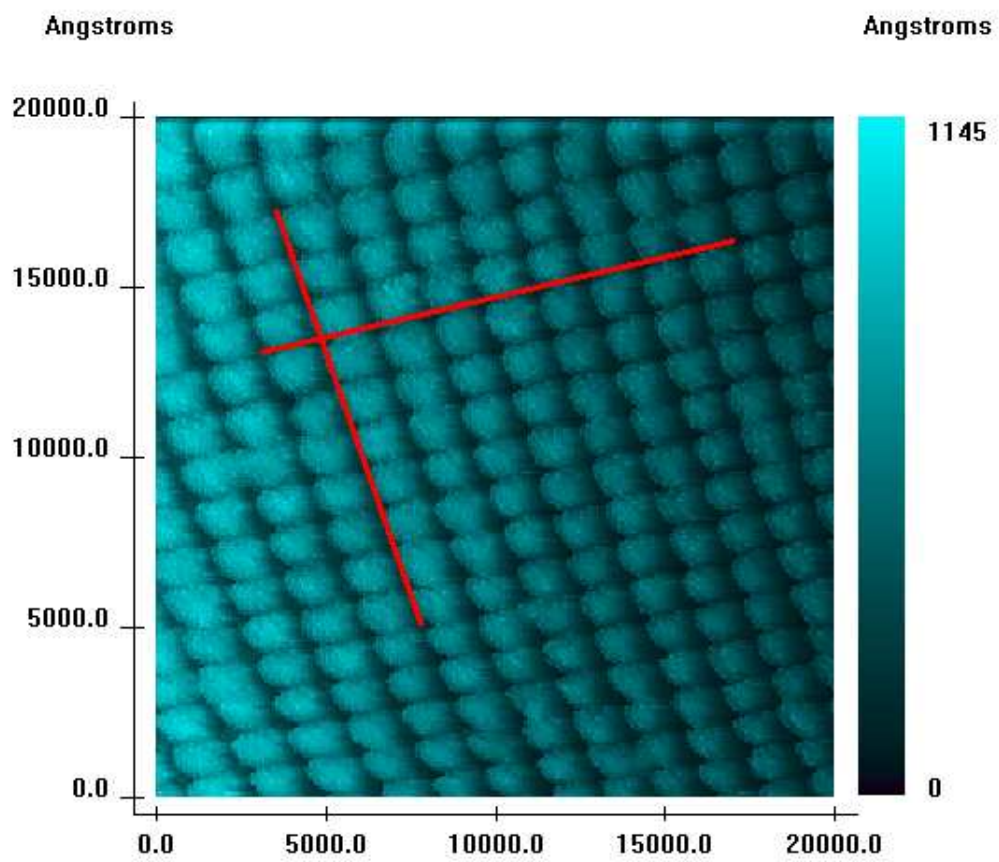


Abbildung 1: STM-Aufnahme des Gold-Gitters

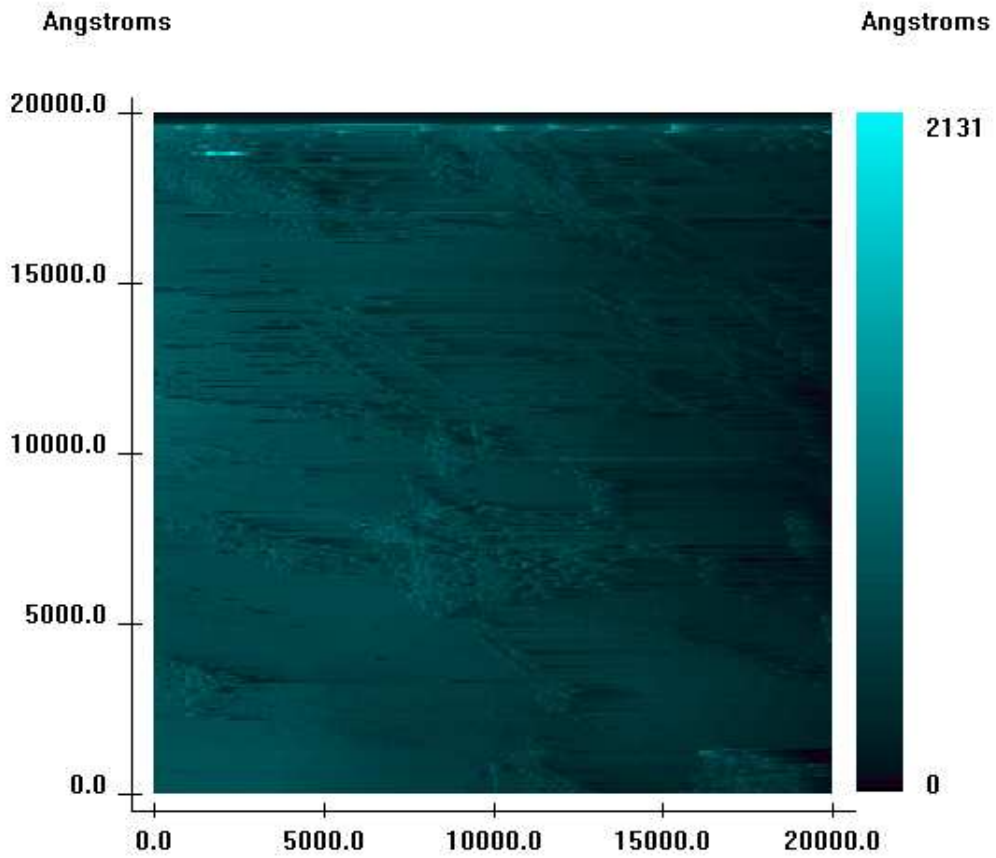


Abbildung 2: STM-Aufnahme der Graphit-Oberfläche bei Vergrößerungstufe 10

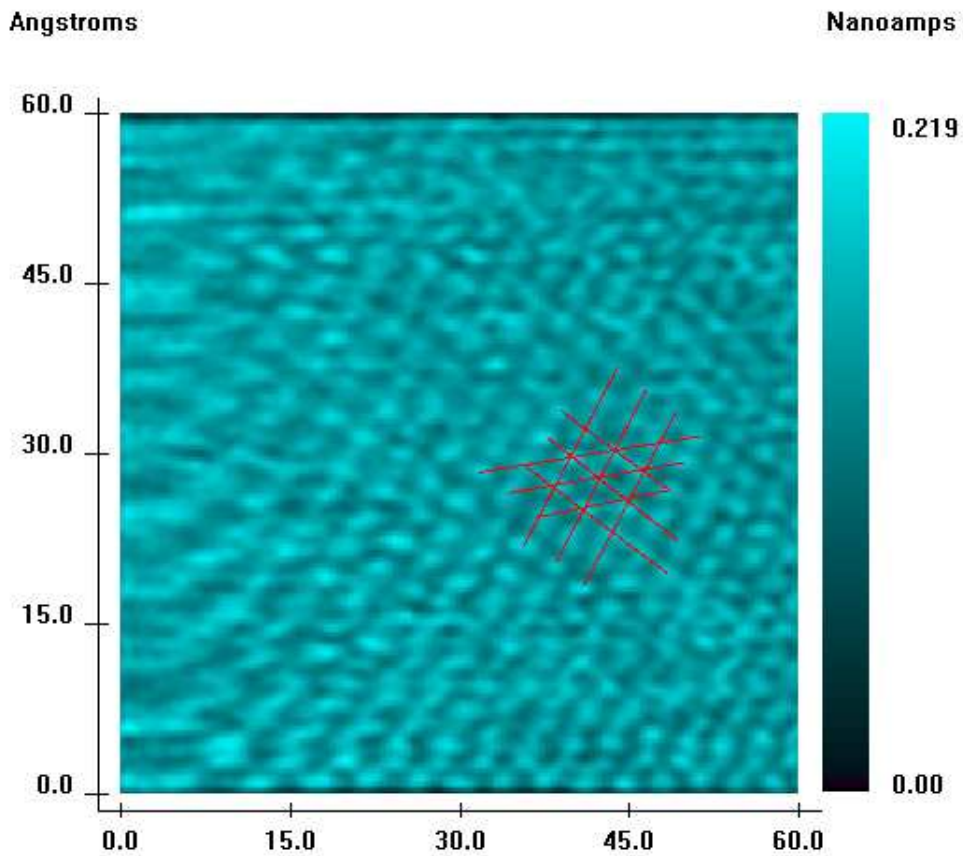


Abbildung 3: STM-Aufnahme bei Vergrößerungstufe 250

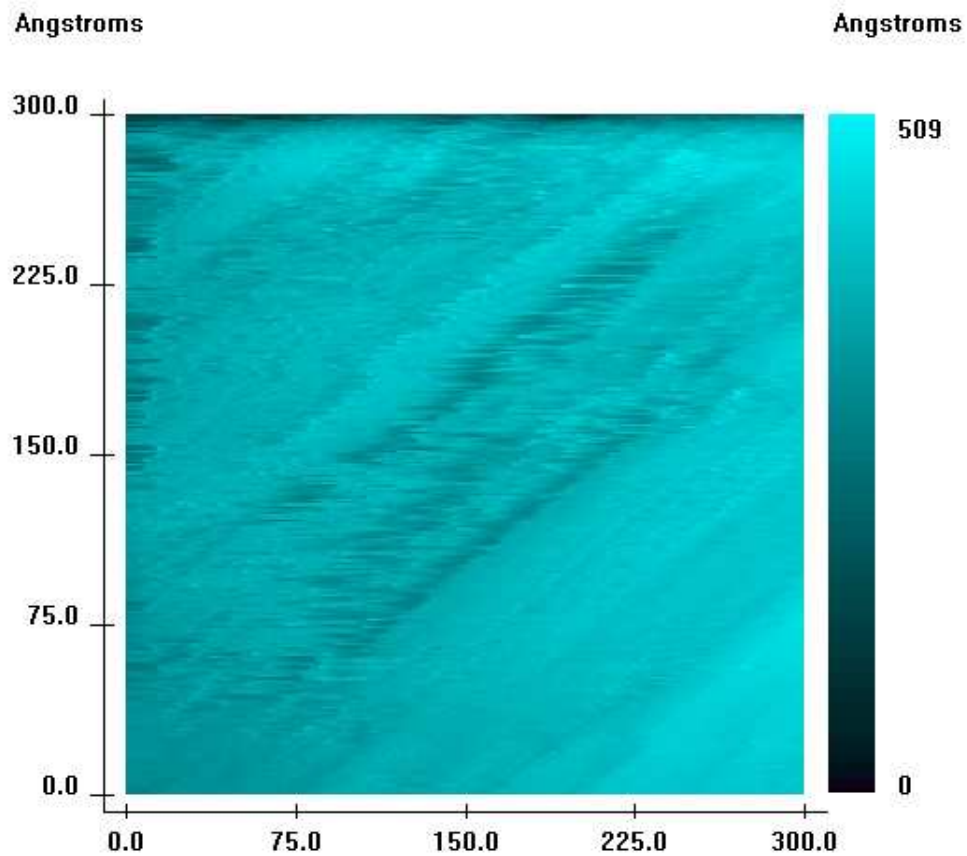


Abbildung 4: STM-Aufnahme bei Vergrößerungstufe 50

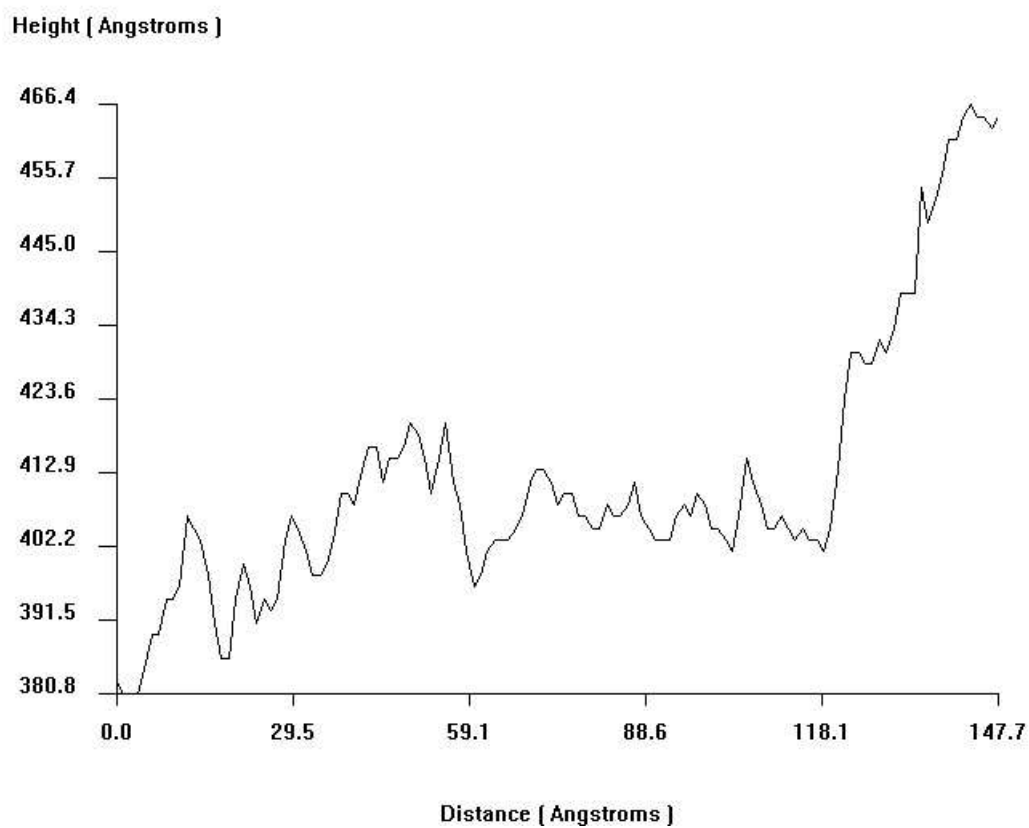


Abbildung 5: Schnitt dazu