

Physikalisches Praktikum Für Fortgeschrittene, Teil A

Rastertunnelmikroskop

Laborversuch

Gruppe 14

W.Bender (walter.bender@rwth-aachen.de), J.Luckas (c.hihiro@gmx.de)

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung in die Theorie	2
2	Modelle zur Beschreibung des Tunneleffekts	2
2.1	Eindimensionale Potentialbarriere	2
3	Messmodi	4
3.1	Messmodi der Rastertunnelmikroskopie	4
3.1.1	Konstant Strom-Modus	4
3.1.2	Konstant-Höhen-Modus	4
3.2	Messmodi der Rastertunnelspektroskopie	4
3.2.1	Spektroskopiefeldmodus	4
3.2.2	$\frac{dI}{dU}$ - Karten	5
4	Aufbau eines Rastertunnelmikrokops	5
4.1	Einführung	5
4.2	Aufbau	5
4.3	Einbau in Spektroskopieanlage	7
5	Messungen durch Rastertunnelspektroskopie	8

1 Einführung in die Theorie

Das Rastertunnelmikroskop macht sich den quantenmechanischen Tunneleffekt zu Nutze. Aufgrund der Unschärferelation ist es Teilchen möglich, klassische Barrieren zu überwinden. Das Rastertunnelmikroskop besteht im wesentlichen aus einer Spitze, die sich im Abstand $d = 2a \sim 1nm$ über der Oberfläche bewegt (Abbildung 1).

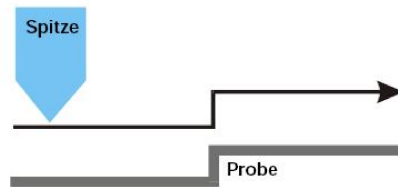


Abbildung 1: Tunnelspitze über Probe

2 Modelle zur Beschreibung des Tunneleffekts

2.1 Eindimensionale Potentialbarriere

Im einfachsten Modell kann der Bereich zwischen Spitze und Material als eindimensionale rechteckige Potentialbarriere der Höhe V_0 und Breite $2a$ angesehen werden. Dieses sehr vereinfachte Modell gibt schon entscheidende Aufschlüsse über den Tunnelstrom (siehe Abbildung 2).

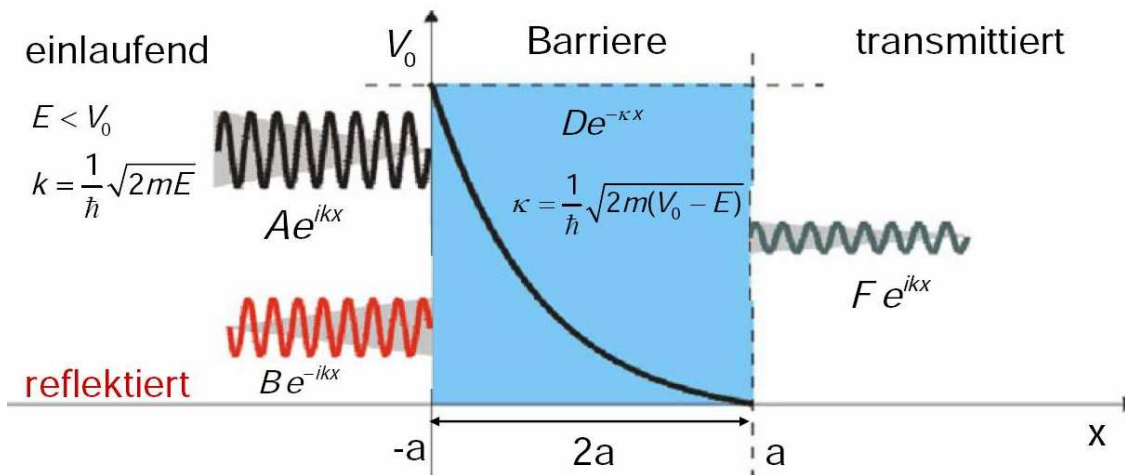


Abbildung 2: Tunnelbarriere

Eine von links einlaufende Teilchenwelle der Energie $E < V_0$ und Amplitude A trifft auf die Potentialbarriere. Dabei wird die Teilchenwelle zum Teil mit Amplitude B reflektiert, aber auch mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit mit Amplitude F transmittiert. Diese Wahrscheinlichkeit wird Tunnelwahrscheinlichkeit genannt. Die Lösung der Schrödingergleichung liefert den Transmissionskoeffizienten $T = \frac{F}{A}$. Für eine sehr hohe und breite Potentialbarriere gibt sich in erster Näherung: $T = \frac{\exp(-i2\kappa a)}{\cosh(2\kappa a) + (i\varepsilon/2) \sinh(2\kappa a)}$ mit $\varepsilon = \frac{\kappa}{k} - \frac{k}{\kappa}$. Die Tunnelwahrscheinlichkeit

ist $|T|^2 = \frac{1}{1+(1+\varepsilon^2/4)\sinh^2(2\kappa a)}$. Für einen sehr hohen und breiten Potentialpfop d.h. $\kappa a \gg 1$ folgt $\sinh(\kappa a) \sim 1/21$, folgt die Tunnelwahrscheinlichkeit $|T|^2 = \exp(-4\kappa a)$. Der durch den Tunneleffekt erzeugte Tunnelstrom I_T ist proportional zu dieser Tunnelwahrscheinlichkeit.

$$I_T \sim |T|^2 = \exp(-4\kappa a) = \exp\left(\sqrt{\frac{-8\Pi(V_0 - E)a}{h}}\right) \quad (1)$$

Der Tunnelstrom hängt exponentiell vom Abstand d von Spitze und Oberfläche ab. Eine Änderung dieses Abstandes von 0,1 nm, was ungefähr einem Atomradius entspricht, bewirkt eine Erhöhung des Tunnelstroms um eine Größenordnung.

Tersoff-Hamann- Modell

Die Bandstruktur von Tunnelspitze und Probenfläche blieb bisher unbeachtet. Im Bard-Tersoff-Hamann - Modell betrachtet man zwei entkoppelte Systeme der Zustandsdichten ρ_s der Spitze und ρ_p der Probe. Dabei ist zu beachten, dass ρ_p ortsabhängig ist. Durch elastisches Tunneln gelangen Elektronen aus dem Energieband der Spitze in das Energieband der Probe oder umgekehrt. Die Richtung des Tunnelstroms wird durch die Polung der angelegten Tunnelspannung festgelegt. Hab die Probe positives Potential, tunneln die Elektronen von der Spitze zur Probe. Ist sie auf negativem Potential eingestellt, tunneln sie von der Probe zur Spitze. Am Tunnelprozess können nur die Elektronen nahe der Fermikanten teilnehmen. Dementsprechend hängt der Tunnelstrom von den Zustandsdichten der Spitze ρ_s und Probe ρ_p ab. Aus diesem Grund muss die Spitze metallisch und die Probe ebenfalls leitend bzw. zumindest halbleitend sein. Für den Tunnelstrom beim Tunneln von Spitze zur Probe gilt folglich:

$$I_t \sim \int_0^{eU} \rho_p(E_F - eU + \varepsilon, \vec{x}) \rho_s(E_F - \varepsilon) |T|^2 d\varepsilon \quad (2)$$

Die Integration im Intervall $\varepsilon \in [0, eU]$ berücksichtigt, dass das elastische Tunneln nicht nur in den Energiezustand des Probenbandes, der gleich der zur Fermienergie der Spitze ist, stattfindet (siehe Abbildung 3). Dementsprechend wird mittels der Rastertunnelmikroskopie über ein breites Energiefenster gemittelt, was bereits Aufschluss über die topografischen Eigenschaften der Probe gibt. Es ist jedoch unmöglich nur eine Energie oder zumindest ein schmales Energiefenster zu analysieren. Die Auflösung der Rastertunnelmikroskopie ist somit begrenzt.

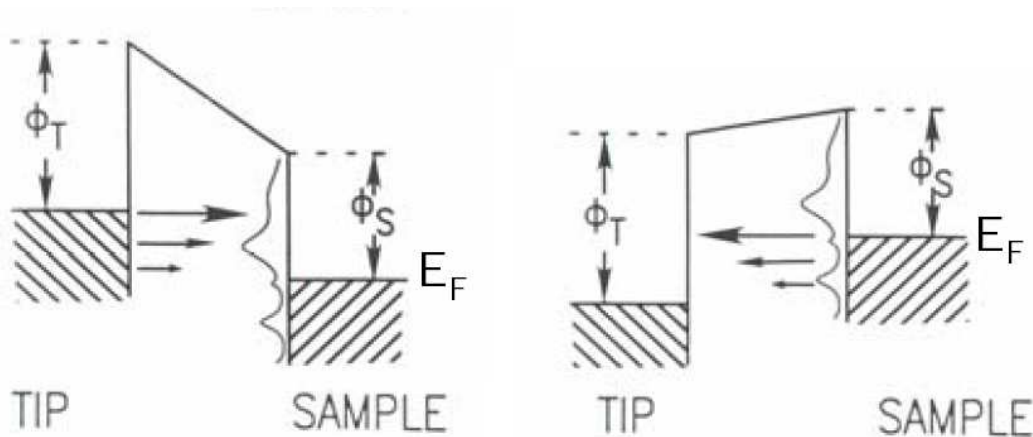


Abbildung 3: Tunnelströme zwischen Probe und Spitze

Abhilfe schafft die Rastertunnelspektroskopie. Bei der Tunnelspektroskopie wird die differentielle Leitfähigkeit $\frac{dI}{dU}$ gemessen. Für kleine Spannungsfenster kann die Tunnelwahrscheinlichkeit als unabhängig von der Spannung U angesehen werden. Es gilt somit für die differentielle Leitfähigkeit

$$\frac{dI_T}{dU} \sim \rho_p(E_F - eU, \vec{x}) \rho_s(E_F) |T|^2 \quad (3)$$

Die differentielle Leitfähigkeit ist proportional zur Zustandsdichte $n(E_F + eU)$ der Probe. Somit ist es möglich, das Betragsquadrat der Wellenfunktion $|\psi|^2$ experimentell zu visualisieren

$$- > \frac{dI}{dU} \sim |\psi|^2 \quad (4)$$

Durch Variation der Tunnelspannung U ist es möglich zu verschiedenen Energie E_i gehörenden Eigenfunktionen zu messen. Die differentielle Leitfähigkeit wird experimentell über einen Lock-In-Verstärker gemessen. Dazu wird die Tunnelspannung U mit einer Modulationsspannung mit geringer Amplitude U_A und einer Frequenz f von 2 kHz versehen. Durch diese experimentelle Notwendigkeit wird das Messergebnis verschlechtert. Es ist nunmehr nicht mehr möglich eine Energie E_i scharf zu messen, sondern man ist auf das Energiefenster $[E_i - U_A, E_i + U_A]$ eingeschränkt. Dieses ist aber bereits viel geringer als das Intervall der Rastertunnelmikroskopie, sodass die Auflösung der Bilder mit Rastertunnelspektroskopie sich stark verbessert hat.

3 Messmodi

Für Rastertunnelmikroskopie und Rastertunnelspektroskopie können jeweils zwei unterschiedliche Messmodi verwendet werden.

3.1 Messmodi der Rastertunnelmikroskopie

3.1.1 Konstant Strom-Modus

Bei diesem Modus wird der Tunnelstrom durch Variation der Höhe z konstant gehalten. Die Höhe z wird durch Piezokristalle reguliert. Piezokristalle stauchen oder dehnen sich, wenn man an ihnen eine Spannung anlegt. Man erhält somit sofort eine Aussage über die Topografie der Probe. Dieses Vorgehen ist besonders für raue Proben geeignet.

3.1.2 Konstant-Höhen-Modus

Bei diesem Modus wird die Spitze bei konstanter Höhe über die Probe geführt. Dieses Vorgehen ist zwar schneller als der Konstant-Strom-Modus, setzt aber auch voraus, dass die Probe sehr glatt ist. Die Topografie der Probe kann über die gemessene Variation des Tunnelstroms bestimmt werden.

3.2 Messmodi der Rastertunnelspektroskopie

3.2.1 Spektroskopiefeldmodus

Die Rastertunnelspektroskopie untersucht die differentielle Leitfähigkeit $\frac{dI}{dU}$. Im Spektroskopiefeldmodus wird jeder Datenpunkt (x,y) angefahren und die Spannung variiert. Für jeden

Punkt läßt sich somit eine charakteristische Kennline aufzeichnen, indem der gemessene Strom differenziell durch die angelegte Spannung geteilt wird. Leider ist dieses Verfahren sehr zeit-aufwendig, da für jeden Feldpunkt eine charakteristische Kennlinie aufgenommen wird.

3.2.2 $\frac{dI}{dU}$ - Karten

Bei diesen Modus wird ein konstante Spannung eingestellt. Nun wird der Messbereich zeilenweise abgefahren, während dabei die differentielle Leitfähigkeit $\frac{dI}{dU}$ gemessen wird. Aus diesen Daten lassen sich Rückschlüsse auf den Stromverlauf ziehen. Allerdings nur bis auf einem Offset der Integration, sodass keine $\frac{dI}{dU}$ -Karten mit verschiedenen angelegten Spannungen vergleichbar sind. Ebenfalls sind keine Rückschlüsse auf die Leitfähigkeit bei $U=0$ möglich.

4 Aufbau eines Rastertunnelmikrokops

4.1 Einführung

Das Herzstück einer jeden Spektroskopieanlage ist das Rastertunnelmikroskop. In ihr befindet sich die zu untersuchende Probe und die Apperatur zum Messen der Obefläche. Da das Mikroskop nur rund 10 cm lang ist und einen Druchmesser von 4 cm besitzt, sind auch sämtliche Komponenten in dem Mikroskop recht klein, sodass der Bau mit großer Sorgfalt durchgeführt werden muss.

4.2 Aufbau

Der Aufbau ist in Abbildung 4 dargestellt. Die angewendete Rastertunnelspektroskopie soll bei tiefen Temperaturen von 4 Kelvin und hohen Magnetfeldern bis zu 14 Tesla durchgeführt werden. Weiterhin muss in der Betriebskammer ein Hochvakuum herrschen. Dies setzt auch hohe Anforderungen an die verwendeten Materien vorraus. Bei solch tiefen Temperaturen wird das sonst gern benutze Material Titan supraleitend. Aus diesem Grund ist das Gehäuse aus Phosphorbronze gegossen. Zur besseren Wärmekopplung wurde das Gehäuse zusätzlich vergoldet. Bei früheren Versuchsaufbauten wurde zur besseren Haftung des Goldes eine Zwischenschicht Nickel aufgetragen. Bei starken Magnetfeldern reicht diese geringe Menge des ferromagnetischen Elements dazu aus, dass das Rastertunnelmikroskop so stark vom Magnetfeld angezogen wird, dass es gegen die Verkleidung gedrückt wird.

Der innere Aufbau gliedert sich grob in einen Teil zur Halterung der Spitze (1 bis 5) und einen Teil zur Halterung der Probe (6-8). Die Tunnelspitze, meist aus Wolfram, kommt in eine Halterung (3), die über ein rot/weises Makrostück aus Keramik (1) mit den 5 Anschlüssen der Spitze verbunden ist. Zur Leitung des Tunnelstroms werden Koaxialkabel von ca. 1mm Durchmesser verwendet, damit der Tunnelstrom möglichst unbeeinflusst gemessen wird. Um geringste Schwingungen der Spitze zu vermeiden, muss diese gut gelagert sein. Sie wird somit in ein Markohütchen aus Keramik eingebettet, welches eine Resonanzfrequenz von 2 kHz besitzt. Rot gekennzeichnet ist der aus Piezokristallen bestehende Röhrenscanner (2). Der Piezokristall verformt sich, wenn an ihn eine Spannung angelegt wird. Zu Grunde liegt hierbei der piezoelektrische Effekt. Wird ein Kristall mechanisch verformt, verschieben sich die Ladungen in der Einheitszelle, sodass Polarisaton entsteht. Aufgrund der regelmäßigen Struktur des Kristalls addieren sich diese Polarisatonen auf und an der Oberfläche des Kristalls ist eine Spannung messbar. Bei der Rastertunnelspektroskopie kommt der umgekehrte piezoelektrische Effekt zum Einsatz. Der Röhrenscanner besteht aus einem vierfach segmentierten Hohlzylinder (x,y-Piezo) in dessen Mitte sich ein Stift (z-Piezo) befindet, in welchem

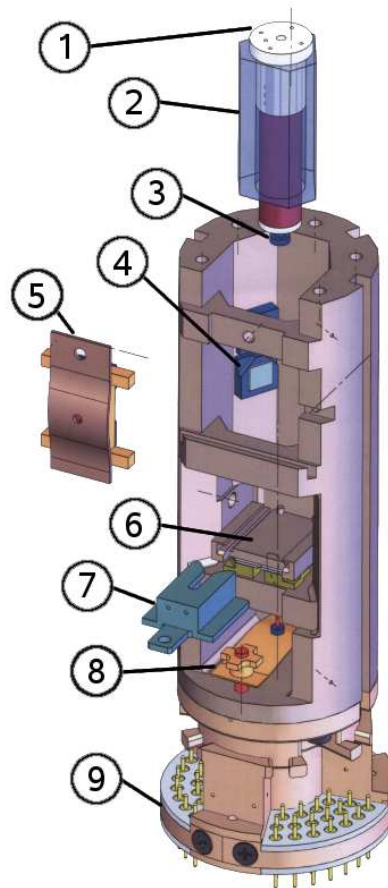


Abbildung 4: Aufbau des Rastertunnelmikroskop

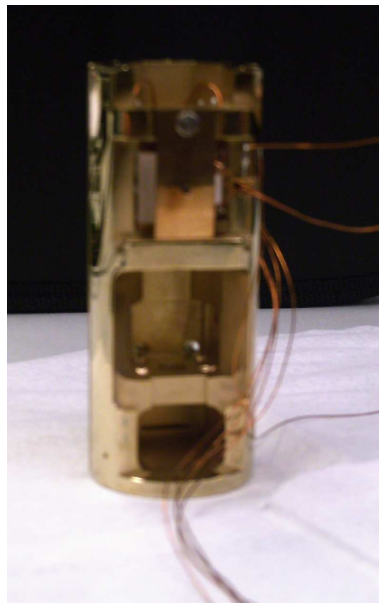


Abbildung 5: Fotografie des Rastertunnelmikroskop

die Tunnelspitze eingelagert ist. Durch Anlegen einer Spannung an das z-Piezo kann die Höhe der Spitze unmittelbar reguliert werden. Um eine Abrasterung der Probe zu ermöglichen, werden an die gegenüberliegenden Segmente des Piezohohlzylinders unterschiedliche Spannungen angelegt. Diese Verscherung führt zu einer seitlichen Auslenkung der Spitze in

der x-y Ebene. Die Spitze kann also mittels des Röhrenscanners in alle drei Raumrichtungen ausgelenkt werden. Der z-Piezo erreicht eine vertikale Auslenkung von $1\mu\text{m}$ und ist für die Feineinstellung der Tunnelspitze zuständig. Zum groben Annähern der Spitze an die Probe wird ein Walker benutzt. Der Piezokristall ist in einen Saphirkristall (2) gebettet. An der Innenseite des Gehäuses sind Scherpiezokristalle (4) aufgeklebt. Dabei muss ein Kleber verwendet werden, der nur wenig ausgast, da das Mikroskop im Vakuum benutzt werden soll. Auf den Scherpiezos sind Aluminiumoxidplättchen, welche wegen ihrer guten Gleiteigenschaften in Kombination mit Saphir verwendet werden, aufgebracht. Durch eine Federplatte (5) wird der Saphir gegen diese Scherpiezos gedrückt. Die Federplatte besitzt dazu an ihrer Rückseite ein weiteres Scherpiezoelement mit Aluminiumoxidplättchen. Nacheinander wird nun an jedes Scherpiezo eine Spannung im Bereich von 200-250 V angelegt. Dabei scheren die Piezokristalle nacheinander aus und gleiten dabei über das Prisma. Sind alle Stapel ausgelenkt wird die Spannung bei allen gleichzeitig zurückgeregelt. Die Kristalle entspannen sich und der Saphirkristall wird dabei mitgeführt. Technisch wird hierzu eine Sägezahnspannung verwendet. Durch Polung der Sägezahnspannung kann der Kristall nach oben oder unten bewegt werden.

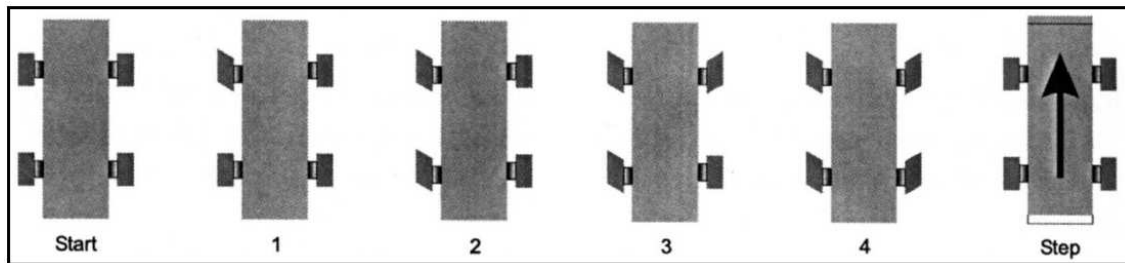


Abbildung 6: Abeitsschritte des Piezos

Zum Austauschen der Spitze dient das Probenschiffchen (7). In den Probentisch (6) kann die zu untersuchende Probe eingeführt werden. Dabei liegt der Tisch auf weiteren Scherpiezos auf und ist somit in der x-y Ebene beweglich. Der Probentisch ist über einen Kupferberylliumdraht an eine Feder gleichen Materials verbunden. Durch Spannen dieser Feder mittels eines Rädchens (8) wird der Probentisch auf die Scherpiezos aufgedrückt. Durch Erhöhung der Haftreibung werden die gewünschten Auslenkungen besser vom Piezo auf den Probentisch übertragen.

4.3 Einbau in Spektroskopieanlage

Mittels des Steckers (9) kann das Mikroskop in die Versuchsanlage eingebaut werden. Die Versuchsanlage wird vor Beginn des Messvorgangs evakuiert. Dazu sind an der Spektroskopieanlage unterschiedliche Vakumpumpen, die den Druck vom Luftdruck zum Hochvakuum runterregeln. Dazu werden Drehschieberpumpen (Wirkungsbereich von $(1 - 10^{-3})\text{bar}$) und Turbomolekularpumpen (Wirkungsbereich von $(10^{-1}\text{bar} - 10^{-10}\text{bar})$) verwendet. Weiterhin ermöglichen Greifsticks den Wechsel von Probe und Spitze. In einem Präparationsraum können die Proben besputtert werden. Meist ist der Teil, der das Mikroskop enthält, räumlich von diesem Präparationsraum getrennt, sodass Verunreinigungen des Mikroskops vermieden werden. Durch Transferstangen können die Proben in diesen beiden Räumen positioniert werden. Um das Vakuum nicht zu beeinträchtigen muss für eventuelle Lötarbeiten bleifreies Lötzinn verwendet werden, da Blei einen hohen Dampfdruck besitzt.

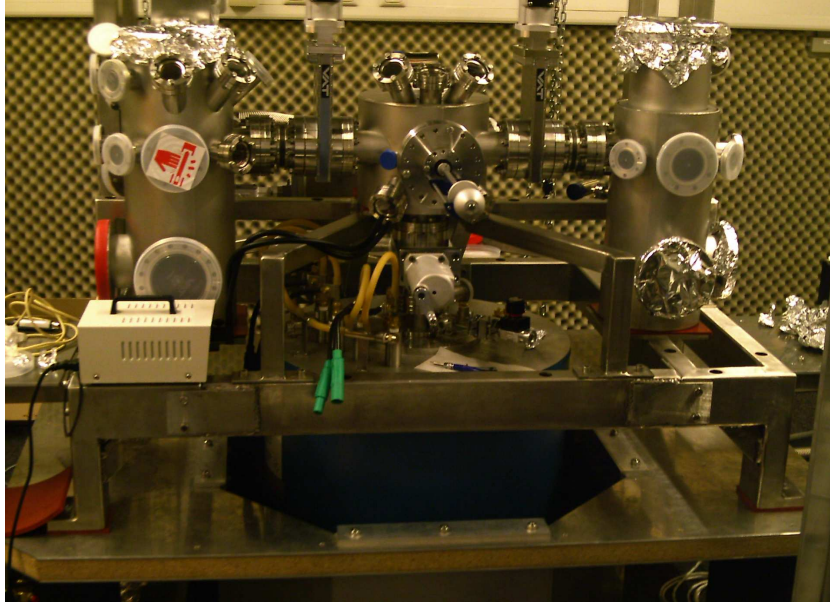


Abbildung 7: Beispiel einer Spektroskopieanlage

5 Messungen durch Rastertunnelspektroskopie

Es sind zwei Aufnahmen des selben Probenabschnitts gezeigt. Auf dem Bild sind zwei Inseln zu erkennen. Dabei ist das erste Bild mittels Rastertunnelmikroskopie und das zweite mittels Rastertunnelspektroskopie aufgenommen worden. Deutlich ist die bessere Auflösung der Spektroskopie z. B. am Untergrund zu erkennen. Während im ersten Bild der Untergrund als homogen erscheint, sieht man in der Spektroskopie deutlich, dass die Oberfläche deutliche Treppenstufen aufweist. Durch den im ersten Bild gekennzeichneten Schnitt sieht man die Höhe z der Probenoberfläche gegenüber der Rasterschrittweite x . Diese Höhe wird topografisch durch Kontraste wiedergegeben. Die auf dem Bild gewachsene Insel ist deutlich durch den Kurvenverlauf gekennzeichnet.

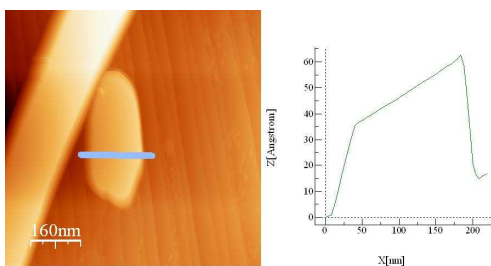


Abbildung 8: Topografischer Modus

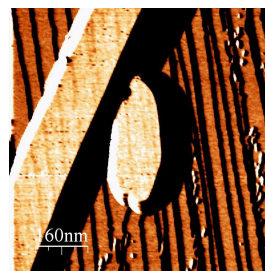


Abbildung 9: Spektroskopischer Modus