

Atome sehen mit dem Raster-Tunnel Mikroskop

Anleitung zum Arbeiten mit dem *easyScan*

A1.1	Beschreibung der Apparatur	A1.3
A1.2	Das RTM betriebsklar machen	A1.9
A1.3	Messen mit dem RTM <i>easyScan</i>	A1.12
A1.4	Überlegungen zum Bild der Graphitoberfläche	A1.15
A1.5	Goldoberfläche mit dem RTM beobachten	

Beenden der Messung
Lösung der Aufgaben
Literatur

Lernziele von Additum 1

- Nach dem Studium dieser Anleitung können Sie eine Aufnahme der atomaren Struktur von Graphit mit dem Raster-Tunnel-Mikroskop (RTM) *easyScan* selbständig durchführen
- Sie verstehen die Funktionsweise und den Aufbau des RTMs.
- Sie können die Aufnahme der Graphitoberfläche richtig interpretieren.

A1.1 Beschreibung der Apparatur

Bevor sie die Aufnahmen machen lernen Sie hier die Apparatur kennen. Die Funktionsweise der einzelnen Teile des RTMs werden erklärt.



Figur A1.1: Das RTM besteht aus dem Messkopf (1), der Elektronik (2) und dem Computer. Unter dem Messkopf ist die Gummimatte (schwarz) zu sehen. Die Steinplatte ist auf vier Gummifüsse (3) gestellt.

Das RTM kann grob in 3 Teile gegliedert werden (Figur 1):

1. Der Messkopf
2. Die Messelektronik
3. Der Computer (PC bzw. MAC)

Der Messkopf

Der Messkopf (Figur 2) ist das Herzstück des RTMs: hier wird die Oberfläche der Probe mit der Messspitze abgetastet. Zwischen der Spitze und der Probe fließt der Tunnelstrom. Dieser sehr kleine Strom wird im Messkopf mit einem höchst empfindlichen Vorverstärker (Operationsverstärker) in eine Spannung umgewandelt. Die Spannung wird der Messelektronik weitergegeben und stellt das Messsignal dar.



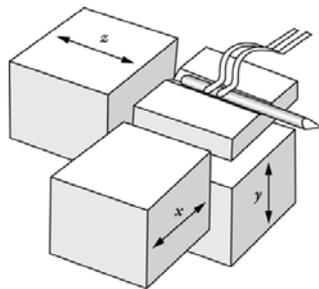
Figur A1.2 Der Messkopf: In der Mitte (bei der Spitze der Pinzette) befindet sich die Messspitze. Rechts davon sind die zwei Führungsschienen zu sehen. Im rechten Teil des Messkopfs befinden sich die zwei beweglichen weissen Keramikplättchen des Reibungsmotors.

Um Atome sichtbar zu machen, muss die Spitze genauer als ein Atomdurchmesser (rund 10^{-10} m) positioniert werden. Schwingungen des Untergrundes würden die Messung verunmöglichen, deshalb ist der Messkopf schwingungsfrei auf einer Steinplatte gelagert.

Schwingungsdämpfung:

Die Erdoberfläche ist bekanntlich nicht ruhig: neben den eher seltenen Erdbeben, gibt es kleinere durch die Natur (Wind, Meeresbrandung, Erdschwingungen (Mikroseismik), etc.) und durch die Menschen (Verkehr, gehen im Schulzimmer etc.) verursachte Schwingungen. Wäre der Messkopf direkt d.h. ohne Dämpfung mit dem Boden verbunden, könnte man keine Messung mit atomarer Auflösung machen. Die Messspitze würde die Oberfläche so unruhig und unpräzise abtasten, wie wenn ein Rodeo-Reiter versuchen würde, einen Brief auf dem Rücken einer wilden Kuh zu schreiben.

Die Steinplatte ist mit vier Füßen aus Weichgummi mit dem Tisch verbunden und hat eine grosse Masse (Figur 1 (4)). Die Gummifüsse wirken wie eine Feder mit kleiner Federkonstanten. Wegen der grossen Masse und der kleinen Federkonstanten findet die Eigenschwingung des Systems Steinplatte-Gummifüsse bei einer tiefen Frequenz statt. Die Gummifüsse haben weiter die Eigenschaft, dass eventuelle Schwingungen durch Reibung effizient gedämpft werden. Die durch die Lagerung sehr ruhige Steinplatte trägt den runden Messkopf, auch hier ist eine Gummimatte dazwischen geschoben. Die Übertragung der Schwingungen von der Steinplatte auf den Messkopf ist ebenfalls sehr klein. Diese zwei Dämpfungssysteme sind so aufeinander abgestimmt, dass Schwingungen des Tisches praktisch keine Störung auf die Messung verursachen.



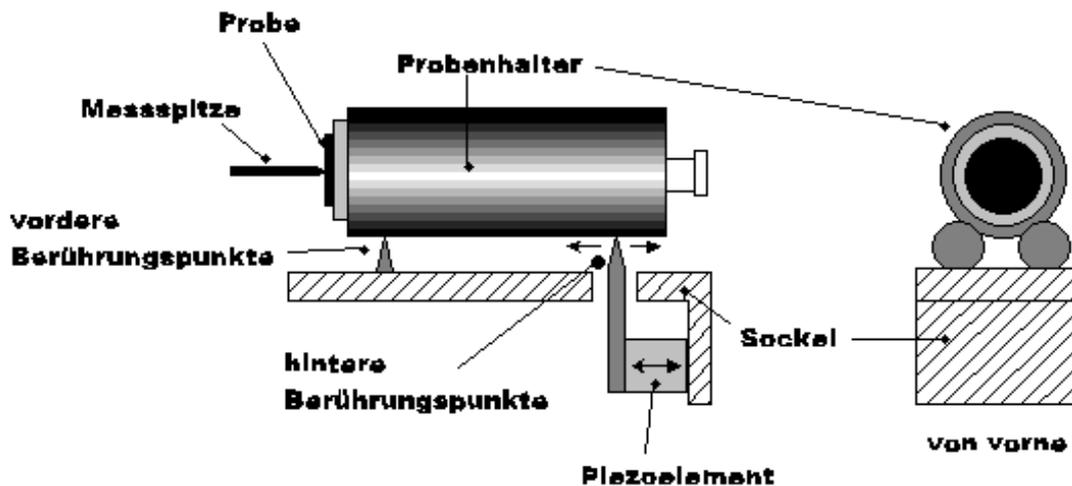
Figur A1.3 Die drei Piezoelemente sind so miteinander befestigt, dass die Spitze in x-, y- und z-Richtung bewegt werden kann. Die Blattfeder hält die Messspitze in der Kerbe einer Keramikplatte.

Messspitze:

Die Messspitze ist ein Stück eines Pt-Ir Drahtes, Länge 5 bis 10 mm, Durchmesser 0.1 mm. Die Spitze wird mit einer kleinen vergoldeten Blattfeder in die Kerbe einer Keramikplatte gedrückt (siehe Figur A1.3). Die Keramikplatte (Aluminum-Oxid) ist direkt auf einem der drei Piezoelemente für die 3-dimensionale Positionierung der Spitze geklebt. Die Blattfeder hat zwei Funktionen: sie hält die Spitze und macht mit ihr elektrischen Kontakt.

Probenhalter:

Der Probenhalter ist ein poliertes Stück Eisen mit Zylinderform. Eisen ist bekanntlich ferromagnetisch. Diese Eigenschaft ist für die Funktionsweise des Reibungsmotors entscheidend. Der Reibungsmotor verschiebt auf eine elegante Weise den Probenhalter mit höchster Präzision (nm Genauigkeit).



Figur A1.4. Schematische Sicht des Probenhalters und des Reibungsmotors. Der Probenhalter liegt vorne auf zwei Punkten auf den Führungsschienen. Hinten wird er von zwei in längsrichtung beweglichen Punkten gehalten. Diese können mit einem Piezoelement hin und her bewegt werden.

Der Probenhalter wird durch 4 Punkte in Position gehalten, (siehe Figur A1.4):

1. Der Zylinder berührt vorne zwei Führungsschienen. In Figur A1.4 sind sie schematisch als vordere Berührungspunkte bezeichnet.
2. Hinten wird der Zylinder an zwei Berührungspunkten (weisse, runde Keramikplättchen) gehalten. In Figur A1.4 sind sie als hintere Berührungspunkte bezeichnet. Die Keramikplättchen sind direkt mit dem Piezoelement verbunden, das die Bewegung des Probenhalters ermöglicht.

Die Gewichtskraft (Normalkraft), mit welcher der Probenhalter auf die 4 Berührungspunkte drückt, wird mit einem Magneten im Messkopf (in der Nähe der zwei hinteren Berührungspunkte) verstärkt. Durch die Platzierung des Magneten wird die Normalkraft dieser zwei Berührungspunkte mehr verstärkt als die der anderen zwei. Die vergrößerte Normalkraft verstärkt die Reibung: Der Reibungsmotor kann dadurch mit höherer Frequenz betrieben werden, was für die Positionierung eine grössere Geschwindigkeit (in nm/sec!) des Probenhalters zur Folge hat.



Aufgabe A1.1:

Der Probenhalter mit der Masse m wird symmetrisch vorne und hinten unterstützt. Die Normalkraft ist also vorne und hinten gleich. Nehmen Sie als Vereinfachung, dass die Haftreibungskoeffizienten vorne und hinten gleich sind.

Wie gross ist die Reibungskraft der vorderen Berührungspunkte? Mit welcher Kraft können die hinteren Berührungspunkte den Probenhalter verschieben? Was schliessen Sie daraus für die Beschleunigung und damit für die Bewegung des Probenhalters?

**Aufgabe A1.2:**

Die Berührungskraft (Normalkraft) wird hinten mit einem Magneten verstärkt. Die Normalkraft sei dadurch hinten doppelt so gross wie vorne. Wie gross ist die maximale Beschleunigung des Probenhalters in dieser Anordnung?

Im Probenhalter ist vorne ein zweiter kleiner Magnet montiert; dieser hat mit dem Reibungsmotor nichts zu tun. Er hält die Probe, welche auf einer Eisen-Platte geklebt ist, fest.

Proben:

Mit dem RTM können wegen des Tunnelstromes nur elektrisch leitende Proben untersucht werden. Die Proben müssen mit dem Probenhalter und dem Messkopf elektrisch leitend montiert sein. Da unser RTM an Luft und nicht in Vakuum betrieben wird, ist die Auswahl der möglichen Proben beschränkt. Für uns sind Graphit- und Goldproben geeignet.

Die Proben sind auf einer kleinen Eisen-Platte befestigt. Eisen ist elektrisch leitend (Tunnelstrom) und ferromagnetisch (Probenhalter). Die Proben sind mit Leitsilber (elektrisch leitender Klebstoff) auf der Eisenplatte fixiert.

Graphit: Das kristalline Graphit ist parallel zur Halterungsplatte geschichtet. Die Messspitze tastet die Oberfläche von Graphit entlang dieser Schicht ab.

Gold: Die Goldschicht ist nur wenige 100 nm dick, sie wurde unter Vakuum auf eine Glasplatte aufgedampft. Die Goldschicht ist polykristallin: die Goldatome sind in sehr kleinen Kristallen angeordnet, welche untereinander alle Ausrichtungen annehmen. Die elektrisch leitende Goldschicht ist, wie Graphit, mit Leitsilber mit der Eisenplatte verbunden.

Die Messelektronik

Die Elektronik regelt den Tunnelstrom und stellt die Spannung der einzelnen Piezoelemente für die Positionierung (x,y,z) der Messspitze ein. Die Regelung wird durch einen 8-bit Mikroprozessor digital überwacht. Das zuständige Programm ist auf dem Computer gespeichert und wird bei beim Einschalten der Messelektronik dem Mikroprozessor übermittelt.

Das Computer-Messprogramm *easyScan* versucht mit der Messelektronik via RS-232-Schnittstelle (serielle Schnittstelle) Kontakt aufzunehmen. Stellt *easyScan* fest, dass die Messelektronik nicht reagiert, schickt *easyScan* automatisch das Programm zum Mikroprozessor.

Der Computer

Der Computer überwacht mit Hilfe des Programms *easyScan* die Funktionen, welche vom Mikroprozessor ausgeführt werden. Der Computer dient auch als Schnittstelle zwischen Mensch und RTM. Weitere Details zu den einzelnen Funktionen des Programms entnehmen Sie der Programmanleitung zu *easyScan*.

**Aufgabe A1.3:**

Wie ist der RTM *easyScan* aufgebaut?

**Aufgabe A1.4:**

Wie schützt sich der RTM gegen Schwingungen?

**Aufgabe A1.5:**

Erklären Sie mit einer Skizze wie der Reibungsmotor funktioniert.

Sie kennen nun die einzelnen Teile der Apparatur und ihre Funktionsweise. Sie haben eine kleine Verschnaufpause verdient. Es geht im folgenden um das praktische Zusammenbauen des RTMs.

A1.2. Das RTM betriebsklar machen:

In diesem Arbeitsschritt geht es um das Aufstellen und Verkabeln des RTMs sowie um die Präparierung der Probe und der Messspitze. Die Justierung und die eigentliche Messung wird im nächsten Kapitel beschrieben.

Aufstellen des RTMs

Bevor Sie mit der Verkabelung beginnen, müssen Sie drei Faktoren für das Aufstellen der Apparatur berücksichtigen:

1. Der Tisch auf dem Sie das RTM aufstellen, muss stabil sein! Sie dürfen nicht gleichzeitig darauf arbeiten oder daran stossen.
2. Der RTM darf nicht in der Sonne oder in unmittelbarer Nähe eines Heizkörpers stehen (thermische Effekte).
3. Luftzug muss vermieden werden. Am besten schliessen Sie Türen und Fenster (thermische Effekte, ev. Schwingungen durch Turbulenzen).

Haben Sie diese Punkte berücksichtigt, können Sie das RTM übersichtlich aufstellen. Der Messkopf soll zuerst ohne Probenhalter sein. Falls der Probenhalter noch im Messkopf ist, entfernen Sie diesen sorgfältig. Achtung: Gehen Sie vorsichtig mit der Probe um!

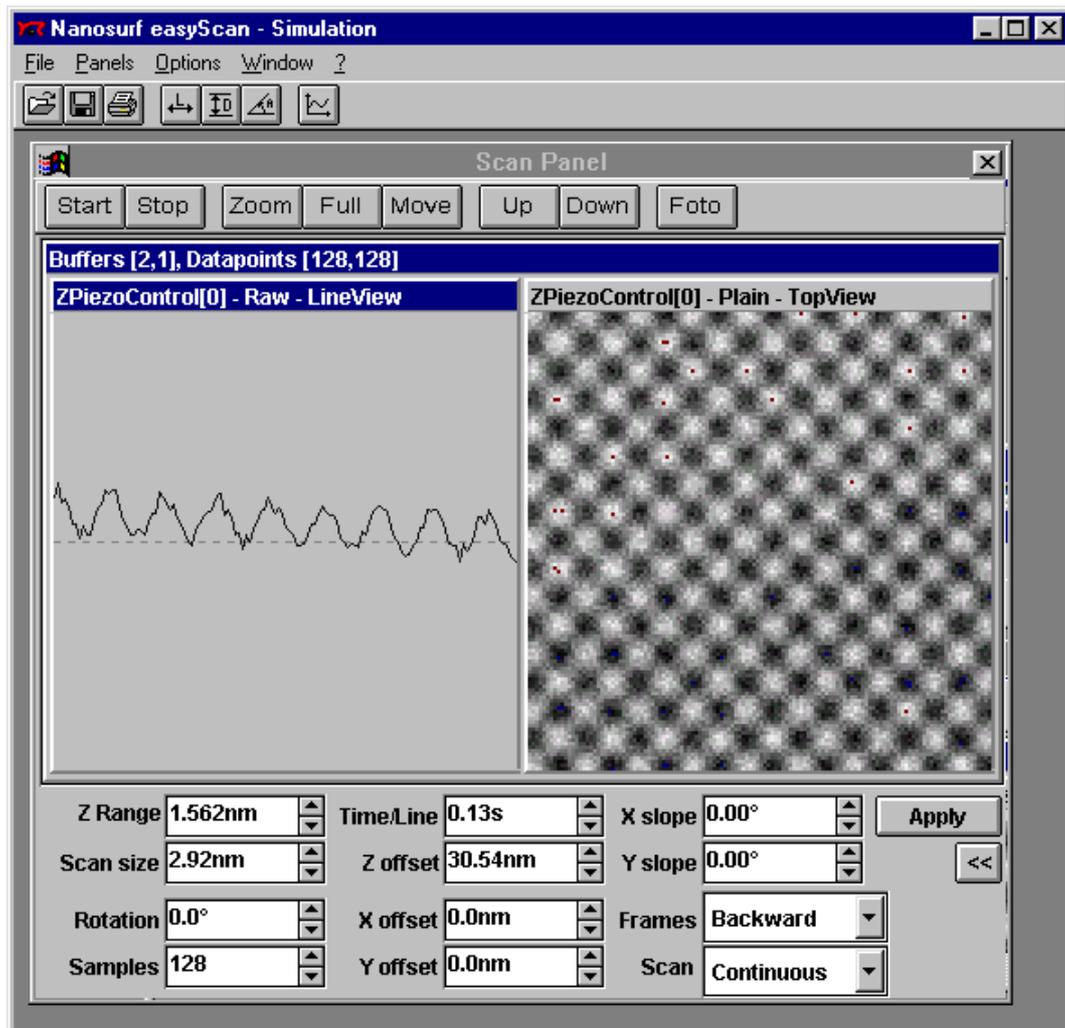
Stellen Sie zuerst den Computer auf. Testen Sie ihn, indem Sie ihn einschalten. Ist alles in Ordnung, können sie den Computer wieder abstellen. Die Verkabelung des RTMs sollte keine Schwierigkeiten bereiten, die Stecker sind alle eindeutig. Beachten Sie jedoch die Reihenfolge der Verbindungen, damit vermeiden Sie Schäden an der Elektronik:

1. Die Messelektronik wird mit dem Computer durch das serielle Kabel verbunden ev. Übergangsstück 9-25 Pins verwenden.
2. Die Messelektronik wird mit dem Messkopf verbunden.
3. Der Netzteil wird mit der Messelektronik verbunden.

Wenn alle Verbindungen hergestellt sind, können Sie Computer und Messelektronik einschalten.

Einschalten des Programms *easyScan*

Auf dem Computer starten Sie das Messprogramm *EasyScan*. Das Programm startet mit eingestellten Parametern im Simulationsmodus (Figur 5). Für eine detaillierte Beschreibung der Funktionsweise des Programms ist auf die Programmanleitung verwiesen.



Figur A1.5 Programm *easyScan* im Simulationsmodus. Links ist die Darstellung der aktuellen Linie, welche soeben gemessen worden ist. Rechts 2-dim. Bild der Oberfläche. Mit Hilfe der Parameter im unteren Teil kann die Messung optimiert werden.

Drücken Sie auf die Taste *Start*, eine simulierte Messung wird gestartet. Verändern Sie die Steigung *X slope* bis das Messsignal im linken Fenster horizontal ist. Drehen Sie die Messrichtung um 90^0 , indem Sie den Wert *Rotation* auf 90^0 stellen. Verändern sie die Steigung *Y slope* bis das Messsignal im linken Fenster horizontal ist.

Die Höhenempfindlichkeit wird mit *Z Range* verändert. Die Grösse des Bildes wird mit *Scan size* beeinflusst. Verändern Sie beide Grössen, um zu sehen, welchen Effekt sie auf die Messung haben.

Damit Sie eine echte und nicht nur simulierte Messung machen können, müssen Sie zuerst im Menü *Options* die Schaltfläche beim Menüpunkt *Simulate microscope* ausschalten. Der Computer sendet dann automatisch via serieller Schnittstelle das Programm zum Mikroprozessor der Messelektronik; dieser Vorgang wird in einem Fenster kurz angezeigt.

Vorbereitung der Graphit-Probe

Für eine Messung mit atomarer Auflösung muss die Graphitoberfläche absolut sauber sein. Graphit lässt sich wegen seiner kristallinen Struktur sehr leicht reinigen. Der Kristall wird entlang einer Ebene gespalten. Nach längerer Zeit (Wochen) lagern sich Fremdatome aus der

Luft auf der Graphitoberfläche ab. Um wieder eine saubere Oberfläche zu erhalten, brauchen Sie:

1. den Probenhalter,
2. die Probe,
3. ein Stück Klebstreifen sowie
4. eine kleine Pinzette.

Für die Reinigungsprozedur beachten Sie folgende Punkte:

1. Nehmen Sie die Graphit-Probe sorgfältig aus der Plastikdose mit der Pinzette und stellen Sie sie auf die Stirnfläche des Probenhalters. Achtung: nur den Probenhalter und nicht die Probe berühren!
2. Kleben Sie den Klebstreifen gleichmässig auf die Graphitoberfläche. Durch den Klebstreifen sehen Sie, an welchen Stellen die Oberfläche mit dem Klebstreifen Kontakt macht (dunkel). Mit der Pinzette können Sie den Klebstreifen homogen aufkleben (nicht zu viel Druck!).
3. Sie entfernen den Streifen sorgfältig und beobachten dabei, dass die oberste Schicht des Graphits auf dem Klebstreifen haften bleibt.

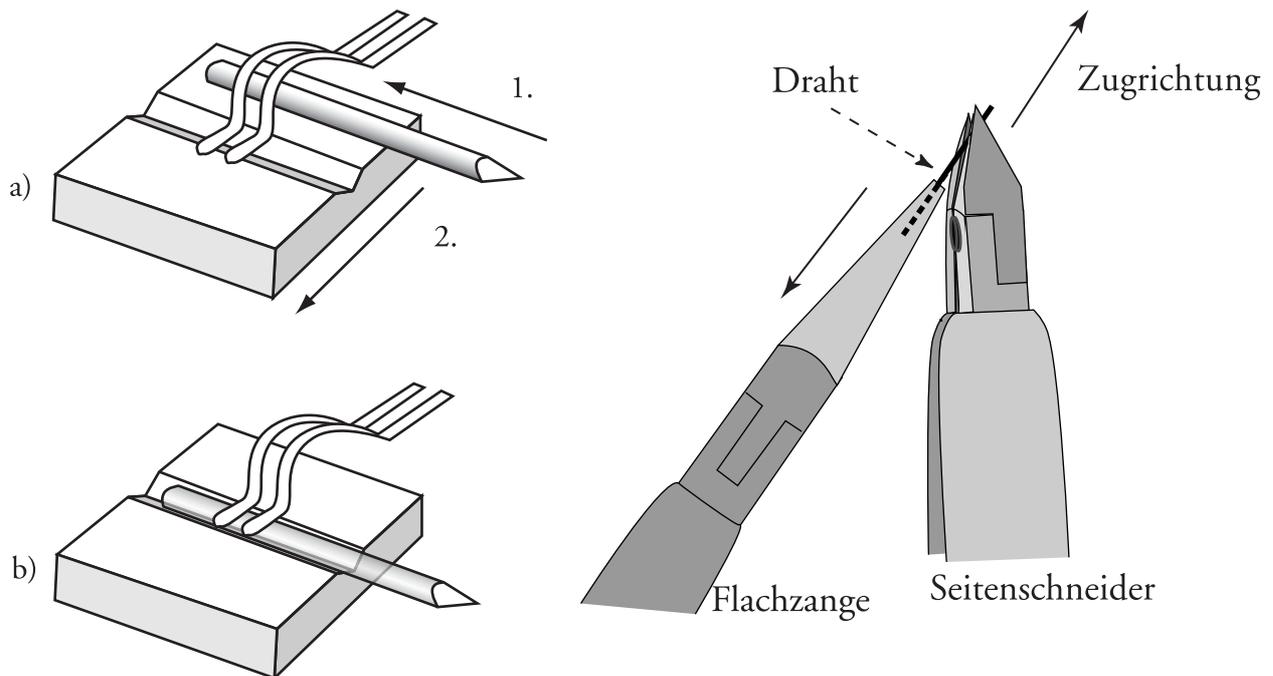
Die Graphitoberfläche ist nun atomar sauber. Achten Sie darauf, dass sie auch sauber bleibt!

Die Goldprobe kann nicht gereinigt werden. Sie können sie direkt messen.

Vorbereitung der Messspitze

Wie auf der Probe lagern sich auch auf der Messspitze Fremdatome an, welche die Messung stören. Die Messspitze kann mehrmals nachgespitzt werden. Sie ist erst dann zu kurz, wenn sie nicht mehr stabil in der Halterung des Messkopfes montiert werden kann (Länge < 5 mm). Für das Spitzen brauchen Sie:

1. Pt-Ir Draht oder eine alte Messspitze (aus dem Messkopf entnehmen),
2. einen kleinen scharfen, sauberen Seitenschneider,
3. zwei kleine Pinzetten, eine Flachzange
4. sauberen Aethylalkohol,
5. Wattestäbchen für die Reinigung.



Figur A1.6. Links: Abschneiden der Messspitze mit einem Seitenschneider.
Rechts: Vorgehen beim Montieren der Messspitze.

Bevor Sie anfangen, müssen alle Werkzeuge mit Aethylalkohol vom Fett gereinigt werden. Das Spitzen des Pt-Ir-Drahtes erfordert eine gute Beleuchtung und sehr ruhige Hände. Die Spitze wird folgendermassen hergestellt (Figur A1.6):

1. Halten Sie mit einer Pinzette oder Flachzange die alte Spitze oder das Ende des neuen Drahtes.
2. Mit dem Seitenschneider schneiden Sie die Spitze in einem stumpfen Winkel (20° - 45°). Gleichzeitig ziehen Sie mit einer kleinen Kraft den Seitenschneider und die Messspitze leicht voneinander.

Die auf das Drahtstück ausgeübte Kraft zieht beim Schneiden die Schnittstelle auseinander. Die scharfe Messsonde mit einem Atom an deren Spitze kann so einfacher entstehen. Als Vergleich können Sie sich Glas vorstellen: Eine Glasstange können Sie auseinander brechen, wobei die Schnittstelle stumpf wird. Wenn Sie aber das Glas durch Erhitzen weich machen und gleichzeitig die Schnittstelle auseinanderziehen, entsteht eine scharfe Spitze. Diese Methode ist unbedingt zu befolgen (siehe Punkt 2), sonst entsteht keine saubere Spitze, was eine Messung verunmöglicht.

Das Resultat eines Pt-Ir Drahtes geschnitten mit der oben beschriebenen Methode zeigt die Figur A1.7. Sie erkennen deutlich im unteren Bereich die Quetschspuren des Seitenschneiders als verschmierte Flächen. An der Spitze ist die Reissstelle zu sehen, welche entsteht, wenn Sie beim Schneiden noch gleichzeitig die Schnittstelle auseinanderziehen. Da der Tunnelstrom exponentiell mit dem Abstand abnimmt (siehe Theorieteil), fließt er nur über das vorderste Atom der Spitze.

Nach dem Schärfen der Messspitze wird diese sorgfältig zwischen Keramik und Blattfeder im Messkopf mit Hilfe der zwei Pinzetten eingespannt (Figur A1.6 rechts). Achten Sie darauf, dass die Messspitze richtig eingesetzt wird: neue Spitze gegen die Probe. Der kleine Draht ist nicht leicht in die Halterung einzuführen, eine kleine falsche Bewegung genügt, damit die Messspitze wegspickt und verloren geht!



Figur A1.7. Messspitze aus Pt-Ir ca. 200-fach vergrößert.



Aufgabe A1.6:

Haben Sie die Anleitung gut befolgt? Ihr Erfolg im nächsten Kapitel hängt direkt davon ab

Der Weg zu den Atomen ist lang und muss verdient werden! Jetzt haben Sie alles vorbereitet: die eigentliche Messung kann bald beginnen!

A1.3. Messen mit dem RTM *easyScan*

Die Messung mit dem RTM verlangt, dass die Messspitze und die Probe nur durch einen sehr kleinen Abstand voneinander getrennt sind (Abstand rund ein Atomdurchmesser!) Erst wenn dieser Abstand erreicht wird, kann die Messung beginnen.

Proben-Platzierung und Annäherung zur Messspitze

Zuerst müssen Sie den Probenhalter samt Probe im Messkopf platzieren. Mit Hilfe einer Lupe und einer guten Lampe verschieben Sie zuerst von Hand und dann mit dem Reibungsmotor die Probe gegen die Spitze (Figur A1.8).



Figur A1.8. Sorgfältige Platzierung und Verschiebung des Probenhalters.

Achten Sie darauf, dass die Probe die Messspitze nicht berührt. Eine Berührung könnte zur Folge haben, dass die Spitze neu zu formen wäre, und dass die Oberfläche beschädigt wäre. Für die Kontrolle der Bewegung schauen Sie am besten auf das Spiegelbild der Spitze auf der Graphitoberfläche. Von Hand schieben Sie bis auf rund einen Millimeter Abstand.

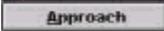
Um Luftturbulenzen bei der Messspitze zu vermeiden, stülpen Sie die zylindrische Glasschale über den Messkopf.

Mit dem Schnellgang des Reibungsmotors (Mit der linken Maustaste auf  im Fenster *Approach Panel* drücken), können Sie die Probe noch näher zur Spitze bewegen. Verfolgen Sie die Bewegung unbedingt mit der Lupe und einer guten Lichtquelle. Der LED auf dem Messkopf gibt folgende Informationen:

- orange: der Strom ist Null, d.h. kein Kontakt,
- grün: Tunnelstrom ist OK,
- rot: zu hoher Strom (=Kurzschluss) bzw. mechanischer Kontakt (=Zusammenstoss).

Die Probe darf die Spitze nicht berühren. Die grobe Annäherung haben sie erreicht, wenn der Abstand 0.2 bis 1 mm beträgt. Nach der Handjustierung stellen Sie das Licht aus, damit keine thermische Störeffekte entstehen.

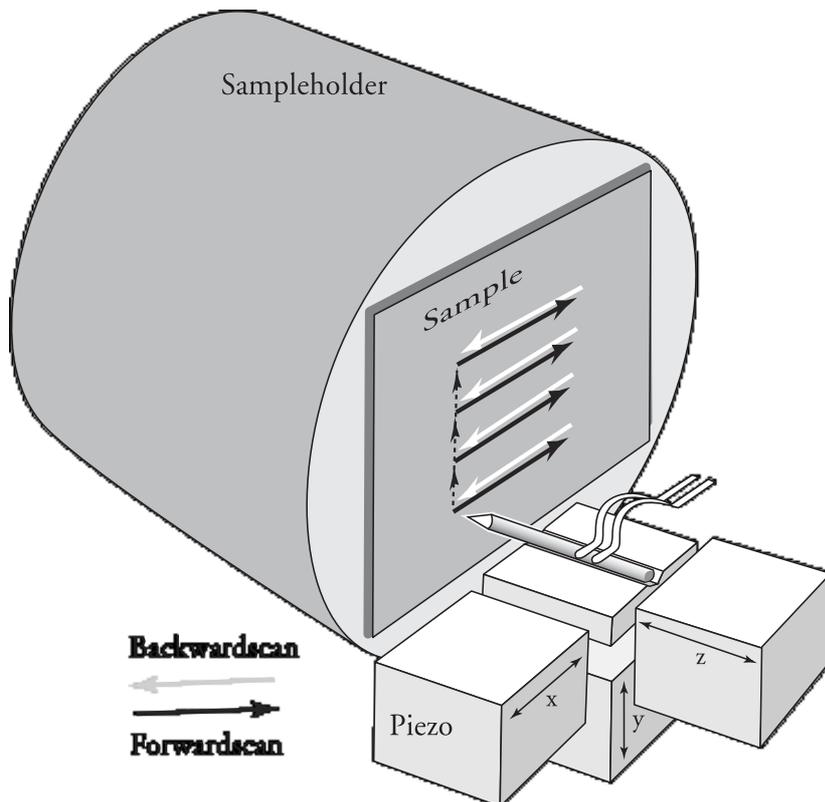
Die Messspitze ist jetzt in der Nähe der Oberfläche. Die Messspitze ist noch zu weit von der Probenoberfläche um einen Tunnelstrom entstehen zu lassen (LED=orange).

Die endgültige Annäherung (Tunnelstrom fließt) erfolgt mit Hilfe des Mikroprozessors: Drücken Sie auf die Taste  im Fenster *Approach Panel*. Der Reibungsmotor bewegt die Probe sehr langsam gegen die Spitze und misst ständig, ob ein Strom zwischen der

Messspitze und der Probe fließt. Sobald ein kleiner Strom (Tunnelstrom) beobachtet wird, stoppt der Mikroprozessor die Bewegung.

Justierung der Bewegung der Messspitze gegenüber der Proben-Oberfläche

Die Messung kann beginnen! Drücken Sie die Schaltfläche *Start* im Fenster *View Panel*. Die Proben-Oberfläche (x, y) und das Koordinatensystem der Messspitze (x, y, z) sind im Allgemeinen nicht parallel und müssen vorher justiert werden (Figur 9).



Figur A1.9. Die Probenoberfläche muss mit der Bewegungsrichtung (x, y) der Messspitze parallel sein.

Die Justierung soll die Bewegung der Messspitze in x - und y - bzw. z -Richtung parallel bzw. senkrecht zur reellen Oberfläche ausrichten. Die Justierung erfolgt nach folgendem Vorgehen, die Bedienungsfelder sind alle im Fenster *Scan Panel* (Figur A1.5):

1. Sichtfeld (x und y Dimensionen) einstellen: *Scan size* = 400 nm.
2. Höhenbereich (z -Messbereich) einstellen: *Z Range* = 200 nm.
3. Erscheint die Linie im linken Sichtfeld (*LineView*) nicht horizontal, verändern Sie den Winkel *X slope* so weit bis die Linie horizontal ist.
4. Stellen Sie die *Rotation* auf 90° ein, um auch die y -Richtung parallel zur Oberfläche auszurichten.
5. Erscheint die Linie im linken Sichtfeld (*LineView*) nicht horizontal, verändern Sie den Winkel *Y slope* so weit bis die Linie horizontal ist.
6. Die Linie im Sichtfeld *Line View* sollte immer in der Mitte sein. Wandert diese Linie nach oben oder nach unten (thermische Effekte), so ist diese mit Hilfe der Einstellung *Z offset* zu korrigieren.

Nach dieser Prozedur ist die Bewegung der Spitze parallel zur Oberfläche. Die x- und y-Richtung stellen die Koordinaten der Oberfläche dar, die z-Richtung ist die Höhe (Oberflächenstruktur).

Um Atome zu sehen, müssen Sie die Empfindlichkeit verbessern respektive die Vergrößerung erhöhen:

Verkleinern Sie das Sichtfeld (*Scan size*) und den z-Messbereich (*Z Range*) in kleinen Stufen, z.B. um je einen Faktor 2.

Sie beobachten eventuell Stufen auf der Oberfläche, diese sind Übergänge zwischen verschiedenen Schichten des Graphitkristalls. Falls Sie eine regelmässige Musterung entdecken, sehen Sie erstmals die atomare Struktur der Oberfläche. Vergrössern Sie die Empfindlichkeit bis Sie die hexagonale Struktur von Graphit eindeutig erkennen können.

Atomare Auflösung erreichen Sie erst bei einem Bildausschnitt von rund 5 nm x 5 nm und einer z-Höhe von rund 0.5 nm. Bei der Messung ist immer auf eine Anpassung des Wertes von *Z offset* zu achten. Verlieren Sie die Übersicht, so vergrössern Sie das Sichtfeld ('Scan size') und erhöhen den z-Messbereich ('Z Range'), danach gehen Sie zu Nummer 6. zurück und versuchen erneut Atome zu sehen.

Falls Sie jetzt die Oberflächenstruktur von Graphit erkennen können, haben Sie ausgezeichnet gearbeitet.

Falls sie noch nicht so weit sind, müssen Sie sich überlegen, welche Punkte dieser Anleitung Sie vielleicht nicht ganz richtig befolgt haben. Finden Sie keinen Fehler, so fragen Sie Ihren Physiklehrer oder ihre Physiklehrerin, was Sie eventuell verbessern könnten, um Atome zu sehen.

A1.4. Überlegung zum Bild der Graphitoberfläche

Sie sind in der Lage, Bilder der atomaren Struktur der Graphitoberfläche auf dem Computer darzustellen. Es geht darum, zu lernen, was Sie auf dem Bild sehen.

Das RTM misst ununterbrochen und stellt das Bild kontinuierlich auf dem Bildschirm dar. Wenn das Bild besonders ruhig ist, speichern Sie das aktuelle Bild der Graphitoberfläche ab, und drucken Sie es auf einem Printer aus.

Auf dem Bild sehen Sie weiss bzw. schwarz hohe bzw. kleine Werte von z (Höhe). Weiss bedeutet eine Erhöhung schwarz eine Vertiefung.

Interpretation des Bildes

Um das Bild richtig zu deuten, repetieren Sie die Erkenntnisse aus dem Kapitel 1. Dazu müssen Sie folgende Fragen richtig beantworten können:

**Aufgabe A1.7:**

Auf welche Grösse ist der Tunnelstrom empfindlich?

**Aufgabe A1.8:**

Welche kristalline Struktur hat Graphit?

**Aufgabe A1.9:**

Welche Struktur hat die Oberfläche von Graphit?

Kontrollieren Sie selber die Antworten auf die gestellten Fragen mit Hilfe des Kapitel 1. Erst wenn Sie sicher sind, die Theorie verstanden zu haben, beantworten Sie folgende Fragen zum RTM-Bild von Graphit:

**Aufgabe A1.10:**

Welche Struktur hat das RTM-Bild der Graphitoberfläche? Welcher Unterschied besteht zur kristallinen Oberfläche?

**Aufgabe A1.11:**

Erklären Sie den Unterschied, indem Sie den Tunneleffekt und die Kristallstruktur von Graphit berücksichtigen.

Die Antworten finden Sie im Kapitel 1. Wenn Sie die obigen Fragen beantwortet haben, können Sie das gemachte Bild vervollständigen:

**Aufgabe A1.12:**

Zeichnen Sie auf Ihrem RTM-Bild der Graphitoberfläche die kristalline Graphitstruktur ein.

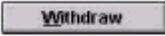
**Aufgabe A1.13:**

Geben Sie eine Längenangabe auf das Bild. Bestimmen Sie daraus die Vergrösserung.

A1.5. Messung der Goldprobe

Falls Sie die Graphit-Probe sauber aufgenommen haben und verstanden haben, was Sie mit dem RTM auf dem Bild sehen und noch Zeit haben, dann können Sie die Goldprobe mit dem RTM untersuchen.

Probenwechsel

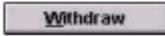
Mit der Taste  im *ApproachPanel* fahren Sie die Spitze zurück. Dabei beobachten Sie, dass die LED von grün auf orange wechselt: der Tunnelstrom wird unterbrochen. Mit der Taste  fahren Sie den Probenhalter noch weiter zurück in einen sicheren Abstand zur Messspitze. Sie wechseln die Probe aus, dabei achten Sie darauf, die Oberflächen nicht zu berühren! Sie dürfen die Goldprobe nicht reinigen, Sie würden die Goldschicht beschädigen. Die Positionierung der Probe geht gleich wie beim Graphit.

Messung der Goldprobe

Gold hat im Gegensatz zu Graphit eine homogenere Elektronenverteilung an der Oberfläche. Deshalb ist es mit unserer Apparatur nicht möglich, die Kristallstruktur von Gold zu erkennen. Sie messen Gold am besten über eine grössere Fläche als Graphit. Die Empfindlichkeit der Höhe *Z range* ist je nach Stelle unterschiedlich.

Sichtbar sind Stufen auf der Oberfläche. Sie kommen von Unregelmässigkeiten beim Aufdampfen der Goldschicht im Vakuum her. Eine Stufe kann bedeuten, dass dort die Goldschicht um eine oder mehrere Monolagen (= atomare Schicht) dicker ist. Falls das Bild flach erscheint, d.h. Sie sehen keine Stufen, ist der Wert von *Z range* zu gross oder Sie haben eventuell eine Stelle mit homogener Schichtdicke erwischt. Um Stufen zu finden, genügt es, die Spitze zurückzufahren, den Probenhalter wenig zu verdrehen und wieder heranzufahren.

A1.6. Beenden der Messung

Um eine Messung zu beenden, wird zuerst der Scan mittels der Schaltfläche *stop* im Fenster *View Panel* angehalten. Danach wird mit  und dann mit  im Fenster *Approach Panel* der Probenhalter zurückgefahren. Die Messspitze befindet sich jetzt in einem sicheren Abstand zur Probenoberfläche. Sie können die Probe vom Probenkopf abnehmen und wieder versorgen.

Sie beenden das Programm und stellen den Computer sowie die Messelektronik ab. Sie versorgen sorgfältig das RTM samt Proben, sowie das benötigte Werkzeug.

Lösungen der Aufgaben

Aufgabe A1.1

Reibungskraft vorne: $F_{RV} = \mu F_{NV}$, Reibungskraft hinten: $F_{RH} = \mu F_{NH} = F_{RV} \cdot F_{NV}$ bzw. F_{NH} ist die Normalkraft vorne bzw. hinten, μ ist der Haftreibungskoeffizient an den Berührungspunkten. Die Bewegung der hinteren Berührungspunkte kann höchstens eine Kraft auf den Probenhalter einkoppeln, welche die Reibung der vorderen zwei kompensiert. Der Probenhalter wird nicht beschleunigt, er bleibt in Ruhe.

Aufgabe A1.2

Bewegungsgleichung: $m \cdot a + F_{RV} = F_{RH}$.

Mit $F_{RV} = \mu F_{NV} = 0.5 \cdot \mu \cdot m \cdot g$ und $F_{RH} = \mu F_{NH} = \mu \cdot m \cdot g$ wird die Bewegungsgleichung $m \cdot a + 0.5 \cdot \mu \cdot m \cdot g = \mu \cdot m \cdot g$ oder wenn Sie nach a auflösen: $a = 0.5 \cdot \mu \cdot g$.

Aufgabe A1.3

Vergleichen Sie Ihre Antwort mit der Beschreibung der Apparatur in diesem Kapitel.

Aufgabe A1.4

Der Messkopf ist mit einer Gummimatte von der massiven Steinplatte getrennt. Die Steinplatte steht auf sehr weiche Gummifüsse. Diese Anordnung entspricht einer Kette: Tisch — weiche Feder (Gummifüsse) — grosse Masse (Steinplatte) — härtere Feder (Gummimatte) — kleine Masse (Messkopf). Dieses mechanische System überträgt sehr schlecht Schwingungen vom Tisch zum Messkopf.

Aufgabe A1.5

Vergleichen Sie Ihre Skizze mit der Figur 4.

Aufgabe A1.6

Die Antwort bekommen Sie im Kapitel 3. Falls die Messung nicht gelingen möchte, kann es daran liegen, dass eine Vorbereitung, welche in diesem Kapitel beschrieben wurde nicht ganz korrekt befolgt wurde.

Aufgabe A1.7

Der Tunnelstrom misst die Elektronendichte auf der Oberfläche der Probe.

Aufgabe A1.8

Hexagonal

Aufgabe A1.9

Sechseckstruktur ohne Zentrum.

Aufgabe A1.10

Sechseckstruktur mit Zentrum

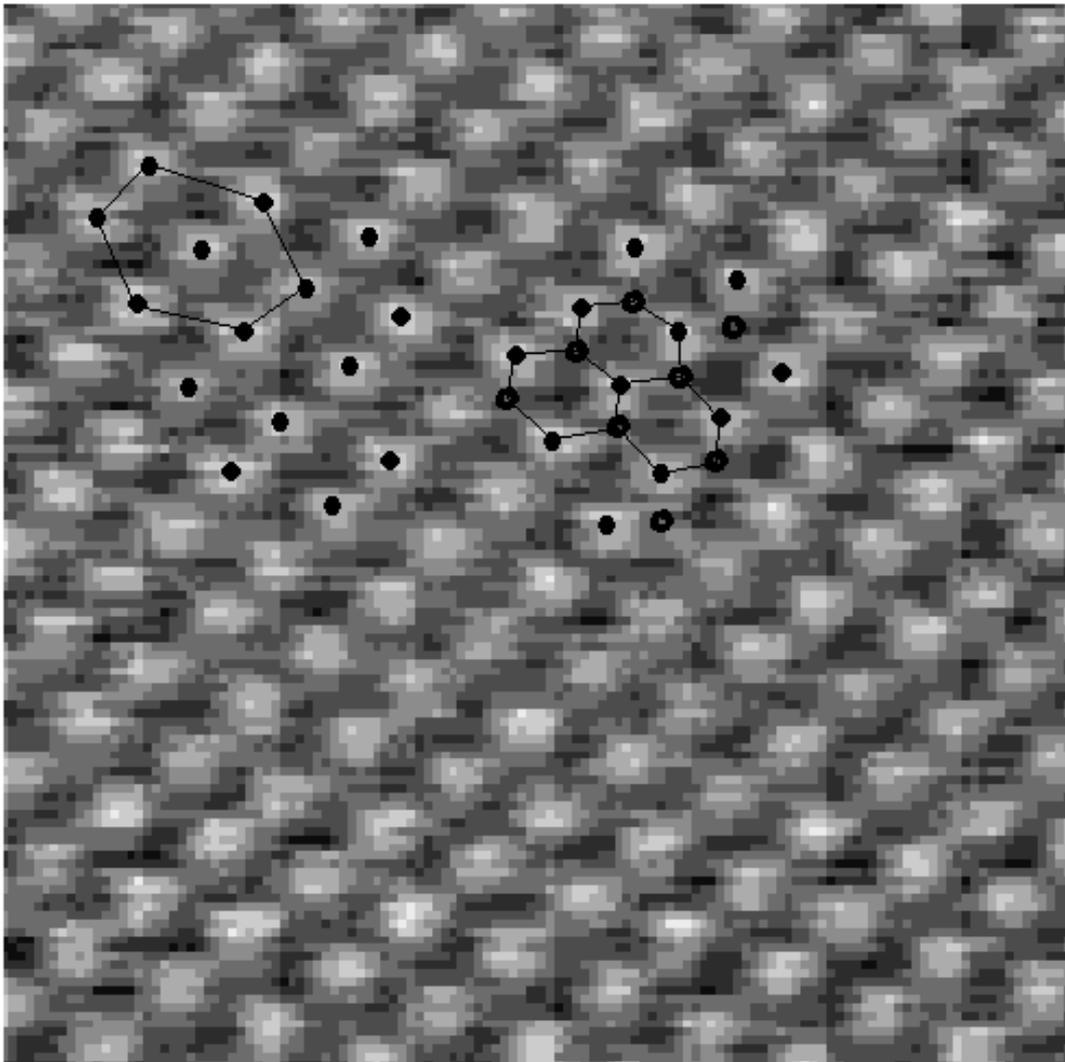
Aufgabe A1.11

Jeder zweite Kohlenstoffatom auf der Oberfläche von Graphit besitzt eine elektronische Bindung mit seinem nächsten Nachbarn auf der darunterliegenden Schicht. Die Elektronendichte an der Oberfläche ist an diesen Stellen bedeutend kleiner als bei einem Kohlenstoffatom ohne direkten Nachbarn in der darunterliegenden Schicht. Weitere Details entnehmen Sie dem Theorieteil.

Da der Tunnelstrom mit zunehmender Elektronendichte zunimmt, *sehen* Sie nur jeden zweiten Kohlenstoffatom der Graphitoberfläche.

Die Oberfläche von Graphit wird nicht als Sechseck ohne Zentrum, sondern als Sechseck mit Zentrum abgebildet.

Aufgabe A1.12



Figur A1.10 Graphitoberfläche aufgenommen mit dem RTM *easyScan*

Die Figur A1.10 zeigt eine Graphitoberfläche aufgenommen mit dem *easyScan*. Links oben sind die sichtbaren Kohlenstoffatome (volle Punkte) dargestellt. Die Struktur ist hexagonal mit Zentrum. Rechts sind neben den sichtbaren auch noch die Kohlenstoffatome mit verkleinerter Elektronendichte an der Oberfläche mit offenen Punkten dargestellt. Die Struktur ist hexagonal ohne Zentrum, wie auch die Oberfläche von Graphit. Falls Sie kein Bild selber machen konnten, können Sie im unteren Teil des obigen Bildes die Atome suchen!

Aufgabe A1.13

Die Gitterkonstante von Graphit ist 0.246 nm (Kantenlänge des Sechsecks auf der Oberfläche). Die Vergrößerung dieses Bildes ist rund 28-Mio-fach.

Die Sechsecke sind nicht ganz symmetrisch; der Grund kann eine kleine Temperaturveränderung während der Messung sein.

Literatur

Anleitung zum Programm *easyScan*, sowie Updates zum Messprogramm sind via Internet bei folgender URL erhältlich: www.nanosurf.ch