

# P422 Rastertunnelmikroskopie

## P422.1 Versuchsziel

Zweck dieses Versuchs ist es zunächst, die Funktionsweise eines Rastertunnelmikroskops zu verstehen. Das beinhaltet neben dem physikalischen Hintergrund auch die technologischen Erfordernisse für den erfolgreichen Aufbau eines Rastertunnelmikroskops. Des Weiteren sollen unterschiedliche Proben untersucht werden. Ziel im Praktikumsversuch soll die Abbildung der Oberfläche von hochgeordnetem pyrolytischem Graphit (HOPG) mit atomarer Auflösung sein.

## P422.2 Notwendige Vorkenntnisse

- Grundlagen zu Tunneleffekt, Tunnelstrom, Austrittsarbeit, Fermi-Niveau
- Technische Realisierung eines Rastertunnelmikroskops
  - Strom-Spannungswandler
  - Regelkreis (PID-Regler)
  - Piezoelektrische Stillelemente (Piezoeffekt)
  - Stick-Slip Annäherung (Piezoelektrischer Trägheitsantrieb)
  - Schwingungsdämpfung
- Betriebsmodi: *constant height* – und *constant current mode*
- Kristallstruktur von hochgeordnetem pyrolytischem Graphit (HOPG *Highly Oriented Pyrolytic Graphite*)

## P422.3 Literatur

- Ein Buch zur Quantenmechanik  
→ Tunneleffekt
- Ein Buch zur Festkörperphysik  
→ Austrittsarbeit, Fermi-Niveau, Piezoeffekt, Rastertunnelmikroskop
- G. Binnig, H. Rohrer, Ch. Gerber, and E. Weibel, Phys. Rev. Lett. 49, 57 (1982):  
“Surface Studies by Scanning Tunneling Microscopy”

Sollten Sie Fragen zur Vorbereitung haben, wenden Sie sich an Ihren Tutor!

## P422.4 Physikalisch historischer Hintergrund

Als Begründer der optischen Mikroskopie gilt A. van Leeuwenhoek, der Mitte des 17. Jhd. ein kleines Glaskügelchen nutzte, damit eine 270-fache Vergrößerung erreichte und als Erster z.B. rote Blutkörperchen direkt beobachtete und ihre Größe von wenigen  $\mu\text{m}$  bestimmte. Den nächsten Meilenstein setzte E. Abbe, der ca. 1870 erkannte, dass die Auflösungsgrenze von optischen Mikroskopen durch das inzwischen nach ihm benannte (und Ihnen spätestens aus dem Optik-Praktikum bekannte) Abbe-Limit gegeben ist ( $d = \lambda / (2n \sin \alpha)$ ). Als Faustregel gilt, dass die maximal mögliche Auflösung bei ca. der halben Wellenlänge liegt, bei der Verwendung von sichtbarem Licht ( $\lambda_{\text{grün}} \approx 500 \text{ nm}$ ) also bei ca. 250 nm. Eine Verbesserung der Auflösung ist bei optischen Mikroskopieverfahren zunächst nur durch Verwendung kürzerer Wellenlängen, also ultraviolettem Licht, möglich.

Basierend auf der Entdeckung des Welle-Teilchen-Dualismus im Jahre 1924 durch L. de Broglie (Nobelpreis 1929) baute E. Ruska (Physiknobelpreis 1986) in den 1930er Jahren ein Elektronenmikroskop und konnte erstmals die Auflösungsgrenze optischer Mikroskope substanziell unterschreiten. Die weit verbreiteten Rasterelektronenmikroskope (REM) erreichen heute eine Auflösung von wenigen Nanometern. Die Auflösungsgrenze von Transmissionselektronenmikroskopen (TEM) liegt derzeit bei 0,045 nm.

Einen grundsätzlich anderen Ansatz nutzt das Rastertunnelmikroskop: Hier wird mit einer scharfen Spitze die Oberfläche abgetastet, wobei die detektierte Messgröße der (quantenmechanische) Tunnelstrom zwischen der Spitze und der (leitfähigen) Oberfläche ist. Bei hinreichend scharfer Spitze ist so die atomare Auflösung der Oberfläche möglich. Das Rastertunnelmikroskop (RTM bzw. gebräuchlicher STM: *Scanning Tunneling Microscope*) wurde Anfang der 1980er Jahre von G. Binnig und H. Rohrer entwickelt, die beide dafür, zusammen mit E. Ruska, den Physiknobelpreis 1986 erhielten.

**Das Rastertunnelmikroskop** wurde ursprünglich nicht (!) für die höchstauflösende Abbildung von Oberflächen entwickelt. Vielmehr war das Ziel, die Austrittsarbeiten von Metallen und Halbleitern zu messen. Um mit der Spitze an eine geeignete, saubere Stelle an der Oberfläche zu gelangen, musste diese über die Oberfläche bewegt werden können. Bei der Beobachtung des Tunnelstromes mit dem Oszilloskop während der Bewegung fiel den Forschern eine regelmäßige Wellenform des Signals auf ( $\rightarrow$  *constant height modus* später in dieser Anleitung). Die Interpretation dieser, zunächst überraschenden Beobachtung führte dann zur Entwicklung des STM als oberflächen-abbildendes Instrument mit atomarer Auflösung.

Das Grundprinzip eines STM ist wie folgt: Zwischen einer elektrisch leitfähigen Spitze und einer ebensolchen Probe wird eine Spannung angelegt und der Tunnelstrom zwischen Spitze und Probe gemessen. Letzterer hängt vom Abstand zwischen Spitze und Probe, der angelegten Spannung, sowie den jeweiligen Austrittsarbeiten ab. Scannt man mit der Spitze über eine Probe, die aus nur einer Atomsorte besteht, erhält man z.B. über den Tunnelstrom ein direktes Abbild der Oberflächentopographie. Besteht die Probe aus unterschiedlichen Atomensorten mit lokal unterschiedlichen Austrittsarbeiten, so besagt eine Änderung im Tunnelstrom nicht notwendigerweise eine topographische Korrugation der Oberfläche. Aus dem Tunnelstrom kann folglich nicht eindeutig auf die Oberflächentopographie der Probe geschlossen werden.

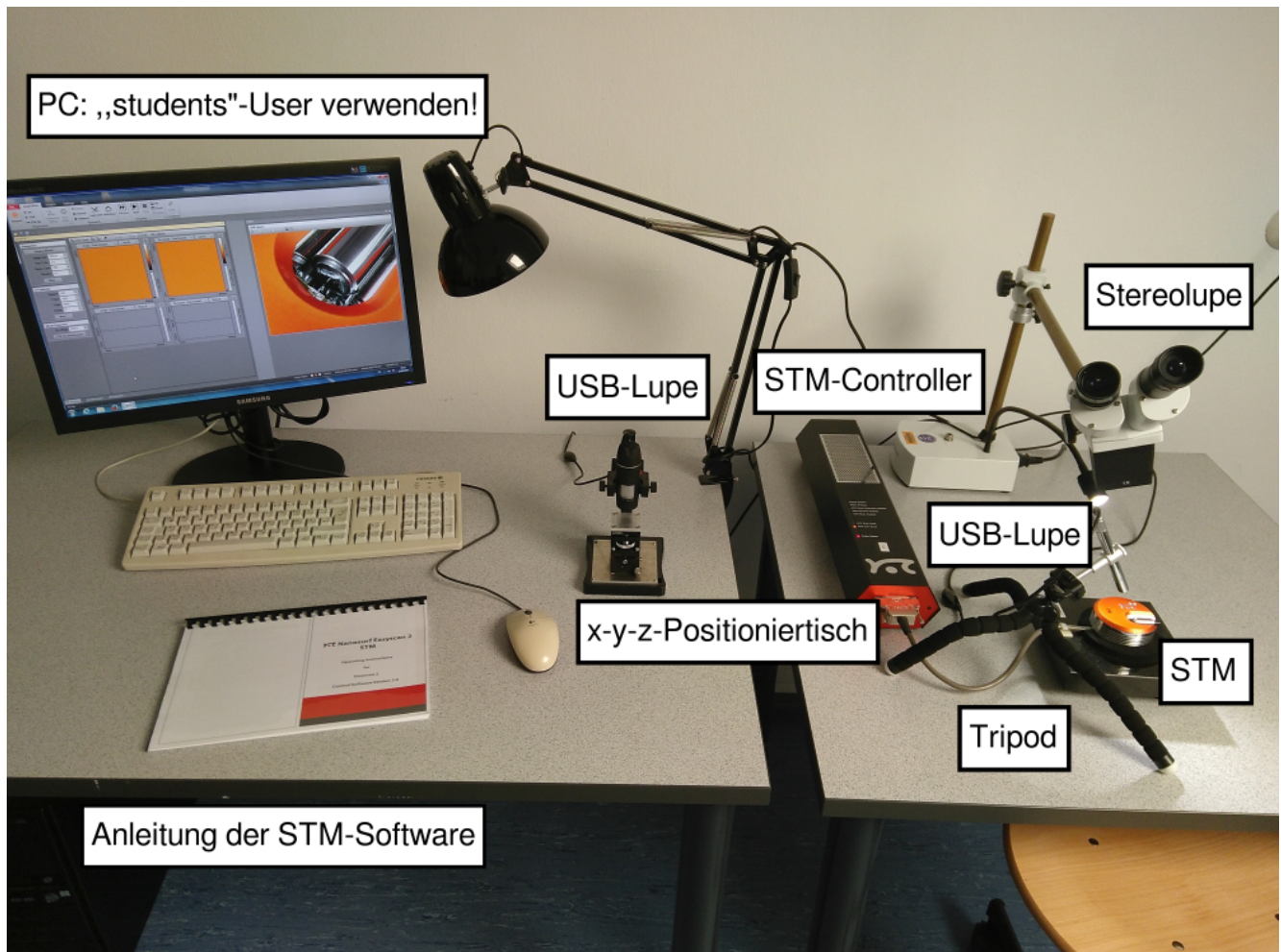
Ein weiterer wichtiger Punkt bei der Abbildung einer Oberfläche mit dem STM betrifft die Tatsache, dass nicht nur die Oberfläche eine ggf. atomare Struktur aufweist, sondern auch die abbildende Spitze. Folglich misst man mit einem STM grundsätzlich eine Faltung der Topographien von Spitze und Probe. Mit einer „zweiatomigen Spitze“ (d.h. zwei tunnelnde Atome an der Spitze) erhält man somit eine Verdopplung des Bildes.

Die Größenordnungen, die in der Rastertunnelmikroskopie eine Rolle spielen, seien hier kurz umrissen. Typische Atomdurchmesser liegen bei 0,1 nm und die Gitterkonstanten von Kristallen im Bereich von wenigen Atomdurchmessern. Atomar-aufgelöste STM-Aufnahmen zeigen daher nur Bereiche von wenigen nm<sup>2</sup> der Oberfläche. Der Abstand zwischen Spitze und Probe ist im sub-nm Bereich und muss auf 0,01 nm konstant gehalten werden. Für die technische Realisierung des STM sind offensichtlich Stallelemente erforderlich, die kontrollierte Bewegungen im sub-Nanometer-Bereich ermöglichen (Piezokeramiken).

Zu guter Letzt noch ein Ausblick auf eine andere Spielart der Rastersondenmikroskopie. Das STM hat nämlich als historisch erstes Instrument einen entscheidenden Nachteil: Da es den Tunnelstrom als Regelgröße nutzt, ist die elektrische Leitfähigkeit der Probe für STM-Messungen unabdingbar. Das limitiert erheblich die Auswahl der untersuchbaren Proben. Weit vielfältiger ist das Rasterkraftmikroskop (RKM) einsetzbar. Hier nutzt man als Regelgröße, je nach gewünschtem Abstand zwischen Spitze und Probe, die abstoßende Kraft aufgrund des Pauli-Verbotes oder die langreichweitige, anziehende van-der-Waals-Kraft. Beide Kräfte sind zwischen Spitze und Probe immer vorhanden und somit können alle Proben mit dem RKM untersucht werden. Allerdings ist es mit einem RKM schwieriger, die Probenoberfläche mit atomarer Auflösung abzubilden.

## P422.5 Experimentierplatz

Im Versuchsraum finden sich zwei Experimentierplätze. Diese unterscheiden sich lediglich in der Generation des verwendeten STMs und der zugehörigen Software. Einer dieser Experimentierplätze sieht wie folgt aus:

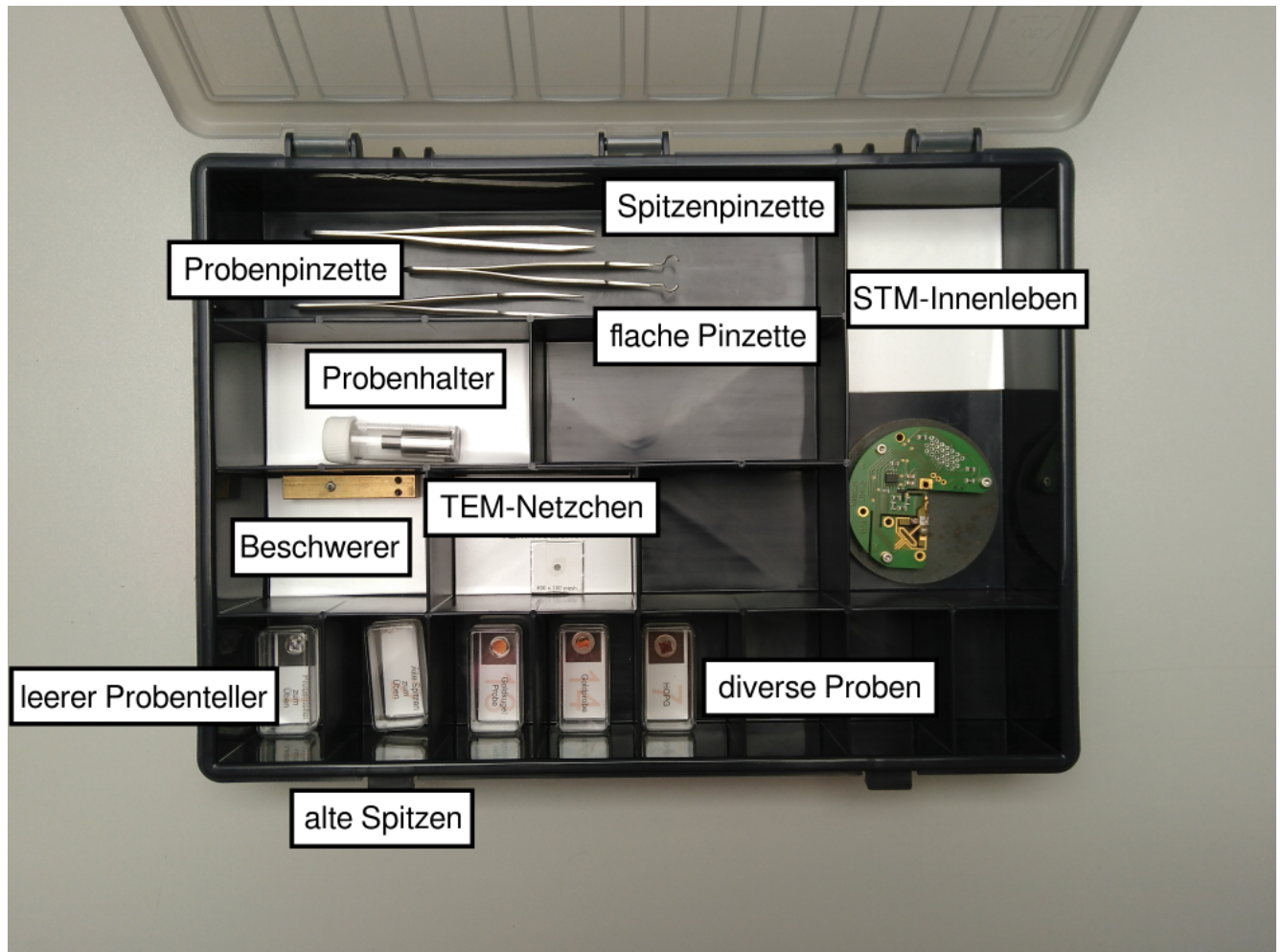


Das hier gezeigte STM benötigt einen externen Controller und arbeitet mit der Software „Easyscan 2“. Das STM am anderen Experimentierplatz hat einen intern verbauten Controller und arbeitet mit der Software „NaioSTM“. Details zu den STM und der Software sind auf [www.nanosurf.com](http://www.nanosurf.com) zu finden.

Die USB-Lupe über dem Positioniertisch dient zur Aufnahme der verwendeten Probe vor und der verwendeten Spitze nach der Messung mit dem STM. Um das beobachtete Objekt zu fixieren, ist im *x-y-z*-Positioniertisch ein Magnet verbaut. Die Aufnahmen können mit dem Programm **amcap** getätigt werden.

Die USB-Lupe über dem STM dient der Beobachtung des Anfahrvorgangs und kann direkt im STM-Programm verwendet werden. Sie ist dazu auf einem Tripod montiert (Achtung: Den Tripod stabil hinstellen, er kann sonst umkippen.) Die Stereolupe ist fest am Tisch montiert und sollte bereits passend über dem STM justiert sein. Falls dies nicht der Fall ist, wenden Sie sich an Ihren Tutor.

Zusätzlich gehört zu jedem Experimentierplatz eine Box mit folgendem Inhalt:



Zur Handhabung der HOPG-Probe sollte die flache Pinzette, für die anderen Proben die Probenpinzette verwendet werden. Z.T. stehen mehr Proben als hier dargestellt zur Verfügung (Spezifikation siehe Anhang). Zudem ist für jede Gruppe eine Halterung vorhanden, die der Reinigung der Probesteller von unten und der Handhabung der HOPG-Probe beim Abziehen dient. Gemeinsam zu benutzen ist der Spitzenreissplatz (Schraubstock mit Pt-Ir Draht) sowie die zugehörigen Feinmechanikzangen. Mit dem TEM-Netzchen kann zu jeder Aufnahme der USB-Lupe der zugehörige Maßstab bestimmt werden.

## P422.6 Durchführung und Analyse

### Betriebsmodi:

Ein STM kann generell in zwei Betriebsmodi arbeiten: *constant height* oder *constant current*.

***constant current mode:*** Der Regelkreis sorgt dafür, dass der Tunnelstrom immer den selben Wert hat. Dies wird durch eine geeignete Spannung am  $z$ -Piezo realisiert. Da der  $z$ -Piezo kalibriert ist, erhält man über die Spannung direkt die Höhe der Spitze über der Probe und dadurch (bei monoatomaren Proben) die Oberflächentopographie. Die Integrationszeit des Regelkreises ist kurz zu wählen  $\rightarrow$  großer Wert für  $I$ .

Die Spitze muss in diesem Betriebsmodus aktiv bewegt werden, was die Scangeschwindigkeit limitiert. Proben sollten allerdings zunächst immer (!) in diesem Betriebsmodus abgebildet werden (um die Spitze zu schonen).

Startparameter:  $P = 1000$ ,  $I = 2000$ ,  $D = 0$

***constant height mode:*** Der Abstand zwischen Spitze und Probe wird nicht (!) nachgefahren, und man erhält die Information über die Oberfläche durch das Strombild. Dieser Betriebsmodus benötigt eigentlich keinen Regelkreis (bzw. die Integrationszeit des PID-Reglers wird sehr lang eingestellt  $\rightarrow$  kleiner Wert für  $I$ ).

Da der Regelkreis quasi inaktiv ist, kann in diesem Betriebsmodus sehr schnell gescannt werden. Nutzen Sie diesen Betriebsmodus aber bitte ausschließlich für kleine Bilder ( $< 10 \times 10 \text{ nm}^2$ ) und erst, wenn Sie sicher sind, dass keine großen Oberflächenkorugationen in Ihrem Bildausschnitt sind. Andernfalls zerstören Sie mit großer Wahrscheinlichkeit Ihre Spitze.

Startparameter:  $P = 0$ ,  $I = 4$ ,  $D = 0$

**Zusätzliche Hinweise:**

- Das STM-Programm zeigt immer zwei Bilder: Das Strombild (in [A]) und die Höhe der Spitze (in [m]). Je nach Betriebsmodus (bzw je nach Integrationswert) wird die Oberflächeninformation in einem dieser Bilder dargestellt.
- "Spielen" Sie mit den Parametern, große Ströme, schnelle Rastergeschwindigkeit, Änderung der Polarität der Spannung zwischen Spitze und Probe, mehr Pixel, ....
- Abhängig von der Größe des Bildes muss die *Time per Line* angepasst werden (weil in der Software unsinnigerweise die Rastergeschwindigkeit nicht in m/s sondern in Time per Line angegeben werden muss und letztere sich aber mit jedem Ändern der Bildgröße ändert).
- Zur Auswertung der Bilder kann die frei verfügbare Software **gwyddion** genutzt werden.
- Zu jedem (!) STM Bild notieren Sie sämtliche Abbildungsparameter in der Bildunterschrift (SetPoint  $I$ , TipVoltage  $\pm U$ , Rastergeschwindigkeit in [nm/s] (nicht die unsinnige Angabe Time per Line), die PID Regelparameter sowie die verwendete Spitze). Die verwendete Spitze müssen Sie sich aufschreiben, die anderen Parameter werden zusammen mit dem Bild abgespeichert. Sie erhalten die Parameter, indem Sie die RTM-Bilddatei (Endung .nid) mit einem Texteditor öffnen.



## P422.7 Aufgaben

Machen Sie sich zunächst mit der Handhabung der vorhandenen Gerätschaften bekannt.

Achtung: An diversen Stellen sind (starke) Magnete verbaut. Die Probenhalter sind magnetisch.

- **Proben:** Dokumentieren Sie den Zustand der Proben mit dem USB-Mikroskop. Machen Sie dazu Bilder mit unterschiedlicher Vergrößerung. Kalibrieren Sie das USB-Mikroskop jeweils mit Hilfe des TEM-Netzchens. Ihr Versuchsbericht muss von jeder Probe Bilder mit (!) Maßstab aufweisen.
- **Spitzen:** Üben Sie den Spitzeneinbau mit alten Spitzen und dem „Innenleben“. Der Durchmesser des Platin-Iridium Drahtes beträgt 0,3 mm. Diese Information können Sie zur Kalibrierung nutzen. Ihr Versuchsbericht sollte von den Spitzen, die Sie für die STM-Bilder genutzt haben, Bilder beinhalten. (Selbstverständlich kann mit dem USB-Mikroskop keine Aussage über die Qualität der Spitze getroffen werden.)
- **Annäherung der Probe:** Putzen Sie einen Probenhalter mit Isopropanol und achten Sie im Folgenden darauf, denselben nur am Plastikstiel zu berühren. Nehmen Sie einen (leeren) Probenhalter, bauen Sie diesen (mit dem Probenhalter) in das STM ein, und üben Sie die Annäherung. Beobachten Sie dafür die Annäherung (*Advance*) mit der Stereolupe oder einer mit einem Tripod über dem STM aufgestellten USB-Lupe. Wenn Sie keine Bewegung beobachten, legen Sie den Beschwerer auf den Probenhalter (zur verbesserten Kopplung an den Stick-Slip Piezo). Geht es immer noch nicht, putzen Sie nochmals den Probenhalter. Wenn es dann immer noch nicht geht, rufen Sie Ihren Tutor.
- **Beginn / Ende einer Messung:** Die automatische Annäherung bis hin zum Tunnelkontakt geschieht mit *Approach*. Aufgrund der sehr feinen Annäherung von *Approach* ist es essentiell die Probe so nah wie möglich an die Spitze mit *Advance* anzunähern, bis man in der Stereolupe quasi keinen Abstand mehr erkennen kann. Dies kann einige Zeit dauern (10 Minuten) – je nachdem wie nah Sie zuvor mit *Advance* angenähert hatten. Wählen Sie  $U = 1 \text{ V}$  und  $I = 1 \text{ nA}$  als Parameter bei der Annäherung.

Wenn Sie eine Messung abbrechen wollen, z.B. um die Spitze oder die Probe zu tauschen, sollte die Spitze zuerst mit *Withdraw* von der Probe entfernt werden, bevor die Probe mit *Retract* zurück gefahren wird. *Withdraw* ist wesentlich vorsichtiger als *Retract*.

Sie sollten sich jetzt mit dem Equipment soweit vertraut fühlen, dass Sie mit den Messungen beginnen können.

- Reißen Sie eine neue Spitze und bauen STM ein. Denken Sie daran, nach Abschluss aller Messungen mit einer Spitze im STM, die Spitze in das Innenleben zu transferieren und mit der USB-Lupe zu dokumentieren.



- Bauen Sie eine der **Goldkugel-Proben** ein und nehmen Sie Bilder unterschiedlicher Größe auf. Hier sollten Sie, unabhängig von der Qualität der gerissenen Spitze, "schöne" STM-Bilder bekommen. Überlegen Sie, welche Bildgrößen sinnvoll sind. Die Probe ist sehr rau, nutzen Sie daher den *constant current mode*. Wichtig(!): In den Bericht gehört auch die Angabe welche Goldprobe untersucht worden ist.

Ziel: Schöne (!) Bilder machen, als garantiertes Erfolgserlebnis.

- Präparieren Sie die **Graphit (HOPG) Probe** mit dem zugehörigen Halter. Dazu bauen Sie die Probe zunächst „kopfüber“ ein und putzen die Rückseite des Probenhalters mit Isopropanol, dann setzen Sie die Probe anders herum ein und ziehen die Graphit-Oberfläche mit Tesafilm ab. Beobachten Sie unter der USB-Lupe wie die Oberfläche vor bzw. nach dem Abziehen aussieht und achten Sie darauf, dass nach dem Abziehen eine glatte Fläche vorhanden ist. Bauen Sie die Probe dann ins STM ein und nehmen Sie Bilder unterschiedlicher Größe auf. Nehmen Sie Bilder sowohl im *constant height*- als auch im *constant current mode* auf. Versuchen Sie, atomar aufgelöste Bilder zu erhalten.

HOPG wird als Eichprobe für die Kalibrierung der  $x$ - und  $y$ -Piezos verwendet. Vermessen Sie die Atomabstände und Winkel und vergleichen Sie Ihre Ergebnisse mit den Werten aus der Literatur. Mitteln Sie ggf. über mehrere Abstände. Weiterhin sollten Winkel an verschiedenen Stellen in der Struktur ermittelt werden. Versuchen Sie herauszufinden, ob die Piezos am STM richtig geeicht sind.

- Im Versuch stehen **weitere Proben** (Bestand ständig wechselnd) zur Verfügung. Suchen Sie sich eine aus und nehmen Sie Bilder verschiedener Größe auf. Identifizieren Sie Besonderheiten der von Ihnen gewählten Probe. Variieren Sie die STM-Parameter so, dass Sie möglichst schöne Bilder erhalten.
- **Dokumentation der verwendeten Spitzen:** Wann immer Sie die Spitze tauschen, dokumentieren Sie die Spitze, mit der Sie zuvor STM-Aufnahmen gemacht haben. Dazu bauen Sie die Spitze in das STM-Innenleben ein und legen dieses auf den  $x$ - $y$ - $z$ -Positioniertisch.

**Tipps zur Aufnahme von HOPG-Bildern:** Um auf HOPG atomare Auflösung zu erreichen, muss die Spitze einatomig und die zu untersuchende Graphitoberfläche innerhalb der letzten Stunden abgezogen sein. Zudem sollte die Probe im abgerasterten Bereich keine Stufen aufweisen. Schließlich müssen geeignete Parameter für den Betrieb des STMs genutzt werden: typische Werte liegen bei  $50 \text{ mV} < U < 500 \text{ mV}$  und  $5 \text{ nA} > I > 0,5 \text{ nA}$ . Da es im Vorfeld nicht möglich ist, zu überprüfen, ob Spitze und Probe die o.g. Kriterien erfüllen, ist es ratsam, zunächst STM-Bilder mit Standard-Betriebsparametern aufzunehmen. Gehen Sie dazu folgendermaßen vor:

- Nehmen Sie ein  $200 \text{ nm} \times 200 \text{ nm}$  Bild auf.  
Evtl. muss man die Verkipfung der Probe ausgleichen (*Adjust Slope*).

- Wenn Sie ein brauchbares STM-Bild erhalten haben, identifizieren Sie aus obigem Bild einen flachen Bereich, zoomen Sie dort hinein und nehmen Sie ein  $10\text{ nm} \times 10\text{ nm}$  Bild auf (Anpassung von *Time per Line* nicht vergessen).
- Wenn auch das kleinere Bild gut gelungen ist, versuchen Sie, ein  $4\text{ nm} \times 4\text{ nm}$  Bild aufzunehmen (Anpassung von *Time per Line* nicht vergessen). Hier sollten Sie die HOPG-Struktur atomar-aufgelöst sehen.

### Atomare Auflösung von HOPG nicht gelungen - was tun?

- Ändern Sie die Parameter von  $I$  und  $U$ . Nutzen Sie in den *constant height* Betriebsmodus. Scannen Sie ggf. möglichst schnell!
- Geben Sie einen "Tip Cleaning Pulse" auf die Spitze. Da die Spitze extrem scharf ist (oder zumindest sein sollte) haben Sie dort eine sehr hohe Feldstärke und mit einem Spannungspuls kann es gelingen, (aufgesammelten) Dreck von der Spitze zu entfernen.
- Wenn Sie mit obigen Maßnahmen keinen Erfolg hatten, bleibt nur noch ein letzter brutaler Versuch, mit der eingebauten Spitze doch noch atomar aufgelöste Bilder zu erhalten: Klopfen Sie  $1\times$  (kräftig) auf den Tisch. Manches Mal hilft das.
- Wenn sämtliche obige Schritte keinen Erfolg gebracht haben, dann müssen Sie eine neue Spitze reißen. Vergessen Sie nicht, die neue Spitze wieder mit dem USB-Mikroskop zu dokumentieren. Auch die Probe sollte neu abgezogen werden und die Oberfläche erneut mit dem USB-Mikroskop dokumentiert werden.  
Nach maximal 5 neuen Spitzen hören Sie auf damit!

## P422.8 Allgemeine Hinweise

- USB-Speichermedium mitbringen
- Merke: Ein Bild ohne Maßstab ist wertlos!  
Ganz gleich ob es ein klassisches Auflichtmikroskop-Bild ist, ein REM-Bild, ein Bild aufgenommen mit dem USB-Mikroskop oder ein STM-Bild.
- Der Versuchsbericht:
  - Fassen Sie sich kurz! Es gibt schon ausführliche Bücher zum Thema STM.
  - Nicht sämtliche Bilder, die Sie mit dem USB-Mikroskop bzw. dem STM aufgenommen haben, gehören in den Versuchsbericht. Ggf. verbannen Sie Bilder auch in den Anhang.
  - Nicht nur Erfolge, auch Misserfolge können wertvoll sein und daher berechtigterweise einen Platz im Versuchsbericht finden.



Anhang: bitte beachten

## Anhang

Haben Sie sich gut auf den Versuch vorbereitet?

Dann sollten Sie mit diesen Fragen etwas anfangen können ...

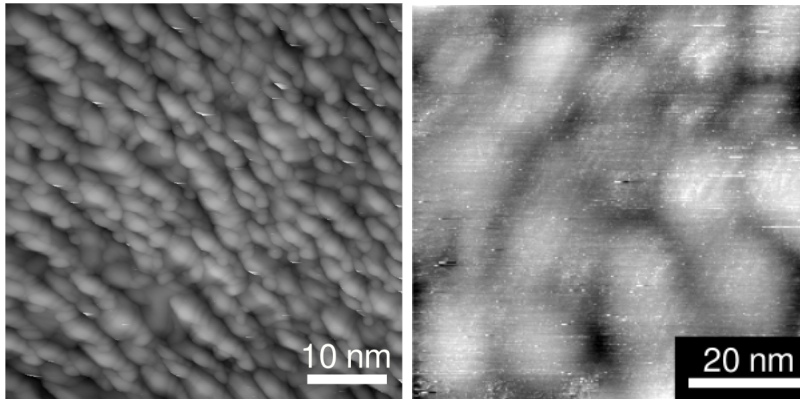
- Für welche Proben ist Tunnelmikroskopie möglich und wie sieht es mit Alternativen aus?
- Welche Größen bestimmen den Transmissionskoeffizienten des Tunnelprozesses?
- Wie hängt der Tunnelstrom vom Spitze–Probe-Abstand ab?
- Warum lassen sich mit sehr einfach präparierten Spitzen atomare Auflösungen erzielen?
- Worin besteht in einem realen Experiment die Tunnelbarriere?
- Wie ist ein STM aufgebaut und wie funktioniert es?
- Warum darf für die Bildaufnahme niemals eine Tunnelspannung von 0 V eingestellt werden?
- Was ist ein Piezo?
- Welche Messmodi sind mit dem STM möglich?
- Welche Information über die Probenoberfläche erhält man mit dem jeweiligen Messmodus?
- Welcher der beiden Messmodi erfordert mehr Zeit zum Messen?
- Welcher der beiden Messmodi ist für sehr ebene Proben besser geeignet?
- Wieso sind beide Messmodi idealisierte Grenzfälle?
- Warum kann man nur durch Veränderung der Integrationszeit des Reglers vom *constant current*– zum *constant height modus* übergehen?
- Wie verändert sich die Abbildung einer Kante bei Erhöhung der Rastergeschwindigkeit?
- Welche Besonderheit findet sich bei den Goldproben ?

## Die Proben

Die hier gezeigten STM-Bilder wurden mit dem im Versuch verwendeten Equipment aufgenommen.

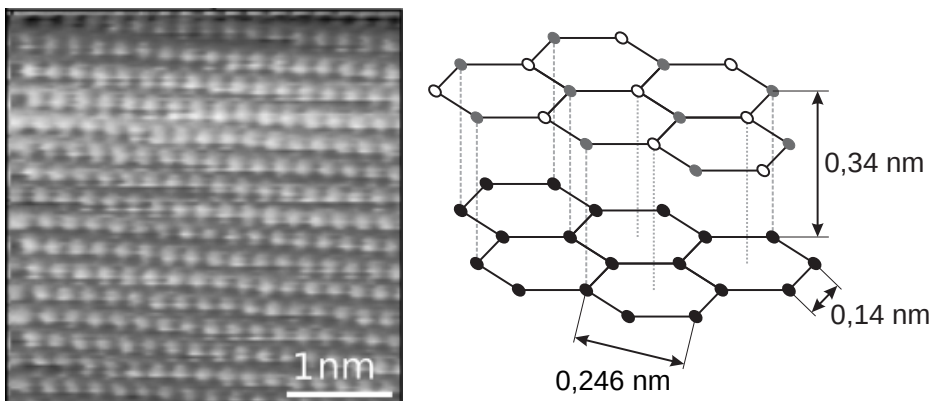
### Goldkugel-Proben

Es handelt sich hierbei um Silizium bzw. Saphir, auf das Gold aufgedampft wurde. Im Anschluss wurden die Proben erhitzt. links: Gold auf Silizium, rechts: Gold auf Saphir



### HOPG-Probe

Große Bilder zeigen eine gestufte Oberfläche, bei kleinen Bildern ( $\ll 10 \times 10 \text{ nm}^2$ ) sollten Sie atomare Auflösung erzielen.



### Weitere Proben

Im Versuchsraum steht ein ständig wechselnder Bestand an anderen, zusätzlichen Proben zur Verfügung. Sie müssen sich auf diese nicht vorbereiten. Ihr Tutor hilft Ihnen dabei, eine Probe auszuwählen und deren Besonderheiten zu identifizieren.