

# FRIEDRICH-SCHILLER-UNIVERSITÄT JENA

Physikalisch-Astronomische Fakultät

Fortgeschrittenenpraktikum

---

## Versuch:

---

---

durchgeführt von:

---

Ausarbeitung erstellt von:

---

---

erster Versuchstag:

letzter Versuchstag:

---

Gesamtversuchstage:

abgegeben am:

---

**Aufgabenstellung:** gemäß Versuchsanleitung: ja / nein  
Änderungen:

---

---

## Betreuer:

---

- wird vom Betreuer ausgefüllt -

**Bewertung der Ausarbeitung:**

**Note:** \_\_\_\_\_

Protokollführung und Form:

Ergebnisse, Auswertung und Interpretation:

Bemerkungen/Hinweise des Betreuers:

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Aufgabenstellung</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Grundlagen</b>	<b>2</b>
2.1	Festkörper . . . . .	2
2.2	Piezoelemente . . . . .	3
2.3	Rastertunnelmikroskopie . . . . .	5
2.4	Hard- & Software . . . . .	8
2.4.1	Nanosurf® easyScan 2 . . . . .	8
2.4.2	Gwyddion . . . . .	9
2.4.3	Beschichtung . . . . .	9
<b>3</b>	<b>Versuchsaufbau und -durchführung</b>	<b>10</b>
<b>4</b>	<b>Messergebnisse</b>	<b>10</b>
<b>5</b>	<b>Diskussion</b>	<b>11</b>
5.1	Der Einfluss der Scan-Parameter und typische Abbildungsfehler . . . . .	11
5.2	Die Gold-Proben . . . . .	13
5.3	Die Platin-Probe . . . . .	13
5.4	Die Graphen-Probe . . . . .	13
5.5	Die HOPG-Probe . . . . .	15
5.6	Die selbst bedampfte Probe . . . . .	15
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>16</b>
<b>7</b>	<b>Literatur</b>	<b>17</b>
<b>8</b>	<b>Anhang</b>	<b>17</b>

# 1 Aufgabenstellung

## 0. Allgemein:

Machen Sie sich mit der *Nanosurf easyScan* Steuersoftware vertraut (Handbücher).

### Präparation von Tunnelspitzen aus PtIr-Draht (falls erforderlich):

- Spitzenherstellung laut Anleitung am Versuchsplatz (*easyscan* STM Handbuch bzw. „*Spitzenpräparation am Burleigh-STM*“).
- Betrachtung und Bildaufnahme der Spitzen im *Lichtmikroskop Zeiss Stereo-mikroskop SV 11*.
- (Ggf. Betrachtung im Raster-Elektronen-Mikroskop.)

**Stabilisieren und Optimieren jeder neuen Spitze durch Messung einer sauberen, homogenen Platin- oder Gold-Schicht-Oberfläche (*sehr gute Testproben!*) im STM.**

## 1. Untersuchung einer Gold-Schicht-Oberfläche (oder Pt, Pd) als Testprobe:

- a. Aufnahme reproduzierbarer Bilder (in mehreren Vergrößerungsstufen bis zur maximal förderlichen Vergrößerung).
- b. Optimierung der mikroskopischen Auflösung und der Abbildungsqualität insbesondere durch **Variation der Tunnelparameter (Spannung, Strom), der Regelkreisparameter (Gain) und der Abtastgeschwindigkeit. Diskutieren und zeigen Sie die Abhängigkeiten anhand von Beispielen in Ihrer Versuchsausarbeitung!!**
- c. Geeignete Darstellung der mikroskopischen Aufnahmen vor und nach Bildbearbeitung (siehe Aufgabe 4): z.B. 2D, 3D, Linienscan, 2D-FFT.
- d. Qualitative und quantitative Charakterisierung der Probenoberfläche (Rauheit (RMS~, mittlere R., ...), Kristallitgrößen/durchmesser/höhen, ...).

## 2. Untersuchung verschiedener Proben (erhalten Sie vom Betreuer):

- analog Aufgaben 1, 3, 4.
- Optimierung der Bildaufnahme.
- Bildbearbeitung, optimierte Bild-Darstellung.
- Charakterisierung quantitativer und qualitativer Probenparameter.

### Probenauswahl:

#### a. Einkristallines Graphit (HOPG und/oder Graphen auf Siliziumkarbid):

Erreichen atomarer Auflösung (Diskussion auftretender Probleme, Untersuchung und Diskussion des Einflusses der Tunnelspannung); Bestimmen der Atomabstände/Gitterkonstanten und der Stufenhöhen, Auswertung im Real- und reziproken Raum (FFT).

#### b. Kohlenstoffnanoröhren auf graphitisiertem Siliziumkarbid: Durchmesser, Höhe; Probleme bei der Abbildung.

#### c. Metallschichten, die Sie gegebenenfalls selbst mittels Vakuumbedampfung hergestellt haben (siehe spezielle Anleitung).

## 3. Erkennen, Beschreiben und Erklären von typischen Abbildungsfehlern

(durch Spitze, Piezoscanner, Elektronik, Regelkreis, Störungen, Software, ...)

- möglichst anhand von Beispielen Ihrer eigenen Messungen an den verschiedenen Proben der Aufgaben 1 und 2.
- Achtung: Immer die quantitative Skalierung (xyz) der STM-Bilder auf mögliche Abbildungs- oder Berechnungsfehler überprüfen. Im Zweifel nach Kalibriermöglichkeiten suchen!

## 4. Bildbearbeitung mittels „Gwyddion“ Software (freeware):

(Die Freeware Gwyddion können Sie sich im Internet herunterladen oder vom Auswerte-PC kopieren.)

- Kontrastierung, Untergrundkorrekturen.
- **Bildbearbeitung mit zweidimensionaler FFT!!!**

- Filter, Glättung, Darstellungsformen (3D, Line Scan, Histogramm, ...).
- Bestimmung quantitativer Probenparameter (Gitterkonstanten, Stufenhöhen, Rauheit etc.).

## 2 Grundlagen

### 2.1 Festkörper

Materie besteht nach heutiger Auffassung aus Fermionen [Quarks und Leptonen]; diese bilden Protonen und Neutronen, welche wiederum die Bausteine für Atomkerne darstellen. Zusammen mit den Elektronen gibt es dann Atome, welche sich zu Stoffen zusammensetzen. Abhängig von der Bindungsenergie zwischen den einzelnen Atomen und den vorhandenen Atomsorten bilden sich verschiedene Moleküle/Kristalle, die schließlich für die makroskopische Eigenschaften der Stoffe verantwortlich sind.

Quantenmechanisch ergeben sich für Elektronen um ein Atom diskrete Orte und Energien; betrachtet man nun eine große Menge von Atomen [ca.  $10^{23}$  pro  $\text{cm}^3$ ], so verschieben sich die einzelnen Energien für die Elektronen [da diese Fermionen sind, können keine zwei im quantenmechanisch gleichen Zustand sein] und es bilden sich Bänder [kontinuierliche Bereiche für mögliche Energien] aus.

Das höchste besetzte Band eines Festkörpers heißt Valenzband, das niedrigste unbesetzte Leitungsband.

Als Fermi-Energie  $E_F$  bezeichnet man jene, „[...] bis zu der bei der Temperatur  $T = 0\text{K}$  alle tieferen Energieniveaus  $E < E_F$  voll besetzt sind, und alle höheren Niveaus  $E > E_F$  leer sind“[10]; wobei sich der der Körper im Grundzustand befindet.

Um Elektronen aus einem Festkörper auszulösen, ist eine stoffspezifische Energie nötig, die Auslöseenergie  $\Phi$ . Diese ist gerade die Differenz zwischen Vakuum- und Fermi-Energie.

Bringt man nun zwei leitende Festkörper nahegenug zueinander, so lässt sich dieses Problem prinzipiell wie der quantenmechanische Potentialwall behandeln.

Genau diese Situation hat man in einem Rastertunnelmikroskop [STM, siehe Seite 5], wobei die Spitze den einen Stoff darstellt und nach Tersoff und Hamann[6] als metallisches s-Orbital genähert wird, und die Probe den anderen, welcher als unendlich ausgedehnte Halbebene beschrieben wird.

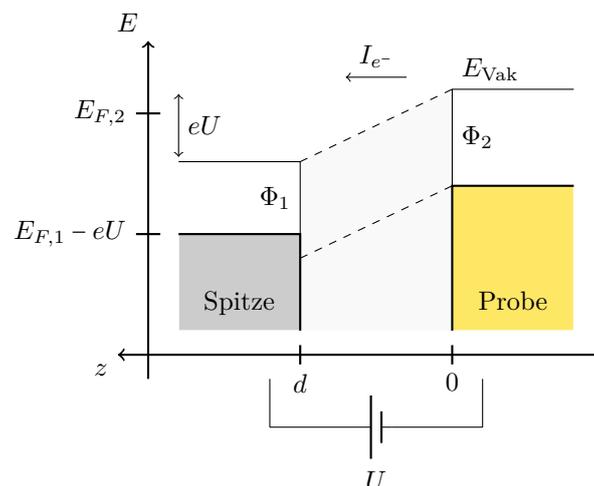


Abbildung 1: Der Potentialverlauf für den Tunneleffekt.

Mit Hilfe eines Transferhamilton-Operators und einer Störungsrechnung ergibt sich für kleine Spannungen  $U$  in guter Näherung [vgl. [9]]:

$$I_{e^-} \propto e^{-2\sqrt{\frac{m_e}{\hbar^2}[\Phi_1 + \Phi_2 - |eU|] + |\vec{k}_{\parallel}|^2}d}, \quad (1)$$

wobei  $m_e$  die Elektronenmasse,  $\hbar$  das reduzierte plancksche Wirkungsquantum und  $\vec{k}_{\parallel}$  der parallele Wellenvektor der einfallenden Elektronen ist.

Aufgrund der exponentiellen Abstandsabhängigkeit ist eine empfindliche Messung der Elektronenzustandsdichten normal zur Oberfläche möglich; [elektrische] Oberflächeneigenschaften können so atomar oder annähernd atomar abgebildet werden, was für technische Anwendungen sehr nützlich ist.

Subatomar jedoch geht es im Festkörper noch mehrere Größendordnungen kleiner!

Festkörper bestehen in der Regel aus kristallin angeordneten Gittern von Atomen/Molekülen. Für diesen Versuch von Interesse waren:

- Metalle, wie Gold, Silber oder Platin, bilden bei thermischer Bedampfung im Hochvakuum polykristalline Strukturen; dies sind Zusammenschlüsse aus einkristallinen Körnern, welche im Durchschnitt  $10^5$  bis  $10^6$  Atome enthalten. Ihre Größe bewegt sich somit im Bereich einiger Nanometer.
- Kohlenstoff in Form von Graphen oder HOPG [Highly Ordered Pyrolytic Graphit] ordnet sich in Ebenen mit hexagonalem Muster an [siehe Abbildung 2]. HOPG zeichnet sich dadurch aus, dass dessen Ebenen weniger als  $1^\circ$  gegeneinander gedreht sind. Wie man in der Skizze sieht, gibt es in der obersten Lage Atome, welche in der zweiten

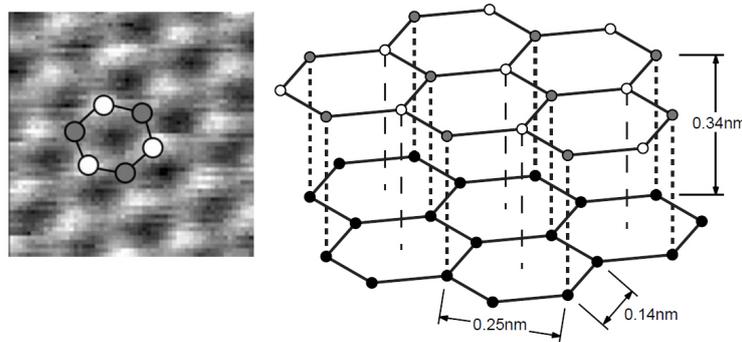


Abbildung 2: Hexagonale Struktur des Graphen als STM-Aufnahme und im Modell [aus [7]].

ein direktes Nachbaratom besitzen [die grauen], sowie andere, die dies nicht tun [die weißen]. Dadurch werden die Leitfähigkeit der Elektronen der äußersten Atome beeinflusst, wodurch das STM die einen Atome der obersten Ebene „heller“ als die anderen darstellt. Dies ist bei der Interpretation der mit einem STM gewonnenen Bilder unbedingt zu beachten.

Weist nun die oberste Lage des Graphen eine Drehung gegenüber dem darunter liegenden, regelmäßigen Kristall auf, entstehen abhängig vom Drehwinkel scheinbar überlagerte Gitter. Dies lässt sich mit Hilfe des Moiré-Effekts erklären [vgl. [4, 5]].

## 2.2 Piezoelemente

### Der piezoelektrische Effekt

Der piezoelektrische Effekt beschreibt das Verhalten von Materialien, bei einer äußeren mechanischen Spannung eine Polarisation aufzubauen. Auf eine detaillierte festkörperphysikalische Beschreibung wollen wir an dieser Stelle verzichten und dafür diesen Effekt beispielhaft an einer Einheitszelle eines Kristalls plausibel machen. Ohne äußere Kräfte kommen die Ladungsschwerpunkte  $\delta^+$  und  $\delta^-$  zur Deckungen [andernfalls würden sich die Atome solange umordnen, bis dies erreicht ist].

Wirkt nun eine äußere Kraft auf diese Zelle, so verschieben sich die Ladungsschwerpunkte zueinander und es entsteht ein elektrisches Feld. Dabei ist die resultierende Feldrichtung abhängig von der Kristallstruktur und der Richtung der angreifenden Kraft. Für das Beispiel in der Abbildung liegt die Linie, auf der die Ladungsschwerpunkte verschoben

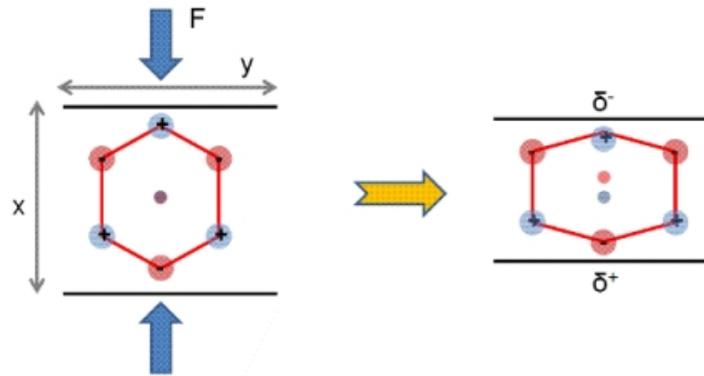


Abbildung 3: Die Deformation eines piezoelektrischen Kristalls durch das Anlegen einer Spannung[2].

werden, in Richtung der Kraft. Würde man jedoch die Zelle derart deformieren, dass die Kraft dabei senkrecht auf einer der roten Verbindungslinien stünde, so verschöben sich die Ladungsschwerpunkte hingegen auf einer Linie quer zur Krafrichtung. Zudem würde bei kubischen Kristallen keine Verschiebung der Ladungsschwerpunkte auftreten. Analog definiert man den inversen piezoelektrischen Effekt als das Verhalten eines Materials auf Anlegen einer äußeren elektrischen Spannung mit einer mechanischen Deformation zu reagieren. Dieses Prinzip machen sich Piezoaktuatoren zu Nutze, welche für diesen Versuch eine zentrale Rolle bei der technischen Realisierung spielen.

### Bauformen und Materialien

Für die Anwendung in Rastertunnelmikroskopen kommen hauptsächlich zwei Bauformen zum Einsatz. Die einfachste Methode ist ein Dreibein aus senkrecht zueinander angeordneten piezoelektrischen Stäben mit quaderförmiger Grundfläche [Tripod]. Auf jeweils gegenüberliegenden Seitenflächen befinden sich zueinandergehörende Metallelektroden. Bei dieser einfachen Geometrie berücksichtigt man den Längs- [Längenänderung in Feldrichtung] und den Quereffekt [Längenänderung senkrecht zur Feldrichtung]. Vorteile dieser Bauform sind die einfach herzustellende Geometrie und die daraus resultierende lineare Abhängigkeit der Deformation zur Feldstärke. Dies erleichtert die Regelung der Piezoaktuatoren. Eine materialsparendere Methode stellt die Röhrenform [Tube] dar. Dabei besteht der Aktuator aus einem Hohlzylinder mit einer z-Elektrode auf der Innenfläche und jeweils fächerförmig gegenüberliegenden x- und y-Elektroden auf der Außenfläche. Der Aktuator besteht somit nur aus einem Bauteil, dessen Geometrie jedoch eine nichtlineare Abhängigkeit der Verformung zur angelegten Spannung aufweist.

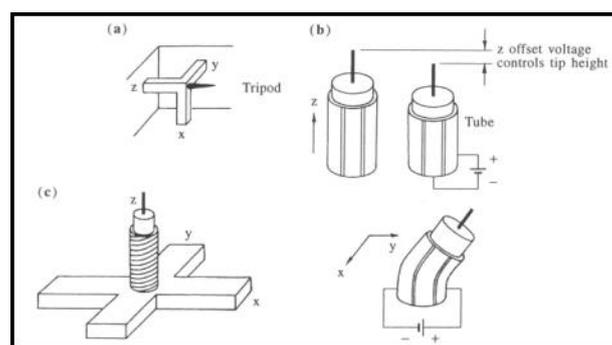


Abbildung 4: Schematische Bewegungsmöglichkeiten eines Röhrenpiezos[1].

Allen Methoden gemein ist, dass die absolute Längenänderung von der angelegten Spannung, dem verwendeten Material und der Ausdehnung des Aktuators abhängen. Möchte man die Spannweite der möglichen Einstellungen vergrößern, ist es für die Anwendung im Rastertunnelmikroskop ratsam, piezoelektrisch aktivere Materialien zu verwenden. Zum einen gilt die Konstanz der Ausdehnungskoeffizienten nur für elektrische Kleinsignale und zum anderen erreicht man mit größeren Bauteilen zwar eine größere absolute Deformation, aber handelt sich automatisch auch eine größere Schwingungsanfälligkeit des Systems ein, welche es für gute Messungen stets zu minimieren gilt [vgl. Kapitel 2.3.1].

Typische Vertreter piezoelektrischer Materialien sind Einkristalle wie Quarz,  $\text{BaTiO}_3$  bzw.  $\text{LiNbO}_3$ . Daneben gibt es eine Reihe entwickelter Spezialkeramiken, wie  $\text{PbTiO}_3$  oder  $\text{PbZrO}_3$ , die dazu dienen den Anforderungen der vielfältigen Anwendungsmöglichkeiten in der modernen Forschung und Industrie gerecht zu werden.

### Genauigkeit und Driften

Typischerweise liegen die Koeffizienten der piezoelektrischen Deformation im Bereich zwischen  $\pm 10^{-9}$  m/V. Damit lassen sich Längenänderungen bis in den Femtometerbereich realisieren. Neben der endlichen Genauigkeit, mit der elektrische Kleinsignale an die Aktuatoren gelegt werden können, muss man Kriech- oder Drifteffekte berücksichtigen. Die Materialien haben zwar eine sehr geringe Verzögerungszeit, sodass durchaus im kHz-Bereich gearbeitet werden kann, aber nach der ersten sprunghaften Antwort dehnt sich das piezoelektrische Material weiterhin gemäß dem Spannungssignal aus. Dieses Relaxationsverhalten, kann nach 30 Minuten durchaus eine relative Änderung des erwünschten Effekts von bis zu 30% bewirken.

In diesem Versuch werden alle Arbeiten in Standardbedingungen, also bei Zimmertemperatur durchgeführt werden. Daher ist auch die Temperaturabhängigkeit der Materialien zu berücksichtigen. Der andauernde Betrieb über Spannungssignale führt zu einer Erwärmung der Aktuatoren, sodass sich erst nach einer gewissen Zeit ein thermisches Gleichgewicht einstellen wird. Dies führt zu zusätzlichen Driftbewegungen der Messsonde.

## 2.3 Rastertunnelmikroskopie

Die Rastersondenmikroskopie [*Scanning Probe Microscopy* – SPM] ist ein in der modernen Forschung weit verbreitetes Darstellungsverfahren. Unzählige Varianten dieser Methode bieten eine Vielzahl von Anwendungsmöglichkeiten, wobei das Grundprinzip immer gleich bleibt. Eine Messsonde wird mit Hilfe einer Stelleinheit rasterförmig über die Probenoberfläche bewegt und erstellt somit ein zweidimensionales Profil der Messgröße  $u = u(x, y)$ . Das Verfahren bildet daher im Gegensatz zu üblichen Untersuchungsmethoden [Beugungsverfahren, Spektroskopie] in den Realraum ab, sodass topographische Darstellungen möglich sind. Dabei bestimmt die eigentliche Messgröße, welche Anforderungen an die Sonde, die Probe und die Rastereinheit gestellt werden müssen.

Dennoch ist einer der wichtigsten Aspekte bei der SPM die Interpretation der erzeugten Bilder. Je nach Verfahren muss sich der Experimentator im Klaren sein, was die Sonde eigentlich misst.

Eine Variante der SPM ist die Rastertunnelmikroskopie [*Scanning Tunneling Microscopy* – STM], mit der wir uns in diesem Versuch hauptsächlich befassen. Das Verfahren nutzt den quantenmechanischen Effekt, dass Teilchen trotz geringerer Energie eine Potentialbarriere überwinden können [sog. Tunneleffekt, vgl. Kapitel 2.1]. Genauer sind es hierbei Elektronen, welche zwischen der Messsonde und der Probenoberfläche tunneln, ohne dass sich diese berühren. Die tunnelnden Elektronen entsprechen einem Strom, der als Messgröße aufgenommen wird für die verschiedenen Rasterpunkte über der Probe.

### Aufbau

Als Messsonde dient eine feine metallische Spitze [sog. Tunnelspitze] mit einem idealerweise einatomigen Ende. Diese wird beispielsweise getragen von einer dreibeinigen Piezokonstruktion als Rastereinheit. Die Spitze wird auf  $\sim 1\text{nm}$  an die Probenoberfläche herangefahren, bis schließlich bei angelegter Spannung  $U$  zwischen Probe und Spitze ein Tunnelstrom  $I$  im nA-Bereich einsetzt.

Aufgrund der exponentiell abfallenden Tunnelwahrscheinlichkeit der Elektronen mit der räumlichen Ausdehnung der Potentialbarriere ist eine derart starke Annäherung nötig. Dies setzt eine hinreichend glatte Oberfläche voraus, damit es aufgrund des geringen Abstands bei topografischen Variationen während des Messprozesses nicht zu einem ungewollten Kontakt der Spitze mit der Probe kommt, welcher die Qualität der Spitze meist bis zur Untauglichkeit mindert. Desweiteren bedarf es ausreichend schwach gebundener Zustände in der Probe, welche zum einen eine kleinere Energiedifferenz zur Potentialbarriere und zum anderen räumlich ausgedehntere Wahrscheinlichkeitsdichten aufweisen, sodass die Tunnelwahrscheinlichkeit weiter erhöht wird. Für die STM eignen sich daher Metalle, Halb- und Supraleiter als Probenmaterialien.

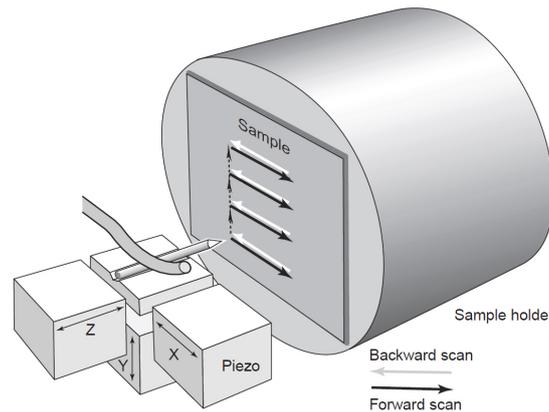


Abbildung 5: Prinzipskizze einer Rastereinheit mit Piezostellern [aus [7]].

**Betriebsmodi**

Bisher haben wir nichts darüber gesagt, wie die Sonde neben der Rasterbewegung lateral zur Probenoberfläche die Steuerung in z-Richtung [vertikal zur Probenoberfläche] organisieren soll. Die einfachste Methode wäre, die Höhe der Sonde nach Einstellung eines gut messbaren Tunnelstroms nicht mehr zu verändern. Dies nennt man den **Modus konstanter Höhe**. Man misst somit den Tunnelstrom  $I = I(x, y)$  als Funktion des Ortes über der Probe und erhält das sogenannte Strombild der Oberfläche. Zu beachten ist hierbei, dass ein Abstand der Spitze zur Probe gewählt werden muss, bei welchem der Tunnelstrom ausreichend groß ist, aber gleichzeitig nicht die Gefahr besteht, dass die Spitze an einer Stelle in die Probe fährt. Damit eignet sich dieser Modus nicht für alle Proben.

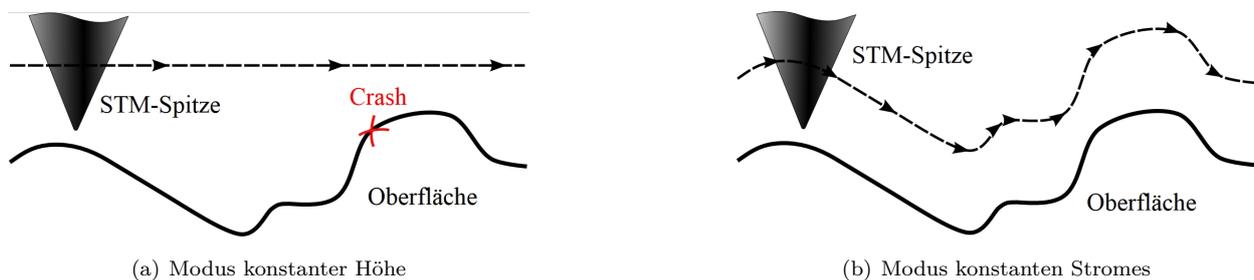


Abbildung 6: Vergleich der verschiedenen Scan-Modi [schematisch, von [11]].

Häufiger verwendet man daher den **Modus konstanten Stromes**, wobei mit Hilfe eines Regelkreises der Tunnelstrom über Variation des senkrechten Abstandes der Spitze zur Probe konstant gehalten wird. Man misst nun die Höhe der Spitze  $h = h(x, y)$  als Funktion des Ortes über der Probe. Das entstandene Bild nennt man auch Konstantstrombild.

**Theorie und Interpretation**

Mit den oben besprochenen Bildern kann man zunächst nichts anfangen, wenn man nicht weiß, welche Eigenschaft der Oberfläche überhaupt abgebildet wird. Der Tunnelstrom an einem Ort über der Probe hängt für feste Parameter des Experiments von den elektronischen und damit energetischen Zuständen der Probenoberfläche zusammen. Das STM bildet demnach Oberflächenzustände ab.

Bereits einige Jahre vor dem Entwurf des ersten STM 1981 beschrieb Bardeen den Tunneleffekt zwischen zwei durch eine Oxidschicht getrennte Metallschichten über einen Transferhamiltonoperator, welcher geeignet ist, das Phänomen als Vielteilchenproblem aufzufassen. Tersoff und Hamann übertrugen die Idee auf das STM. Dazu nahmen sie modellhaft eine einatomige Spitze am Ort  $\vec{r}_0$  in einem s-Zustand [rotationssymmetrisch] an. Nun betrachtet man die Überlappung der Zustände der Probenoberfläche mit dem s-Zustand des Spitzenatoms. In einer Näherung für kleine Spannungen ergibt sich:

$$I \sim U \cdot \rho_{\text{Spitze}}(E_F) \cdot \rho_{\text{Probe}}(\vec{r}_0, E_F). \tag{2}$$

Dabei ist  $\rho(E_F)$  die Zustandsdichte bei der Fermienergie. Der Tunnelstrom ist somit proportional zur Dichte der Zustände der Elektronen der Oberflächenatome der Probe am Ort der Tunnelspitze und der Zustandsdichte der Spitze selbst jeweils bei der Fermienergie. Dieser Zusammenhang ist sehr plausibel, denn es bedeutet, dass Elektronen nur dann tunneln, wenn es auch Zustände gibt von denen aus sie in einen anderen wechseln können.

Es bedarf nun jedoch einer erweiterten Theorie bezüglich der Näherung für kleine Spannungen. Dies kann beispielsweise bei Halbleitern nicht immer erfüllt werden. Liegt die Fermienergie nämlich in einer Bandlücke, muss diese erst durch Anlegen eines ausreichend großen äußeren Potentials in einen Bereich nicht verschwindender Zustandsdichte verschoben werden. Man erhält ohne Näherung:

$$I \sim \int_{\mathbb{R}} \rho_{\text{Spitze}}(E) \cdot \rho_{\text{Probe}}(\vec{r}_0, E + eU) \cdot T(U, E) dE. \quad (3)$$

Für ein ausgedehntes Energieintervall  $eU$  geht der Term in ein Integral über, wobei man eine spannungs- und energieabhängige Transferfunktion  $T(U, E)$  berücksichtigen muss.

Die Richtung des Tunnelstromes und damit die Tatsache, welche Zustände eigentlich abgebildet werden, hängt von der Polarität der angelegten Spannung ab. Liegt an der Probe das niedrigere Potential, so tragen besetzte Zustände der Probe im Intervall  $E_F \dots E_F + eU$  zum Tunnelstrom in die Spitze bei. Liegt jedoch an der Probe das höhere Potential, so sind die unbesetzten Zustände der Probe, in welche Elektronen aus der Spitze tunneln können, für den Tunnelstrom relevant.

### Technischer Anspruch und experimentelle Realisierung

Mit einem STM aufgenommene Abbildungen unterliegen aufgrund des Verfahrens keiner beugungsbedingten Auflösungsgrenze. Es ist daher theoretisch möglich, selbst [sub-] atomare Strukturen darzustellen. Solch ambitionierte Ziele stellen jedoch einen großen Anspruch an die technische Realisierung des STM und dessen Isolation gegenüber äußeren Störeinflüssen.

Für reproduzierbare Bilder in solch kleinen Dimensionen bedarf es einer äußerst präzisen Stellvorrichtung, welche die Spitze positioniert. Dies ist nur mit Piezoaktuatoren zu realisieren. Hinzu kommt die exponentielle Abhängigkeit des Tunnelstromes vom geometrischen Abstand der Spitze zur Probe. Ungenauigkeiten bei der Positionierung wirken sich in der Fehlerfortpflanzung etwa mit einem Faktor 10 auf die Genauigkeit des gemessenen Tunnelstromes aus. Für die gewünschte laterale Auflösung muss die Spitze daher auf  $\approx 10\text{pm}$  und für den Modus konstanten Stromes in vertikaler Richtung sogar auf  $\approx 1\text{pm}$  genau positioniert werden können. Bevor man jedoch überhaupt messen kann, muss man eine Probe in das STM einlegen können. Dazu ist es erforderlich die Spitze auf einige  $\mu\text{m}$  von der Probe zu entfernen. Der Höhentrieb der Stelleinheit muss also über 7 bis 8 Größenordnungen hinweg arbeiten, was sich lediglich über ein mehrstufiges System erreichen lässt [hoher technischer Anspruch, da Temperatur- und Hysteresedriften des Grobtriebes nicht den Feintrieb beeinflussen dürfen].

Beim Messvorgang befindet sich die Spitze nur Bruchteile eines Nanometers über der Probenoberfläche. Damit es zu keinem unerwünschten Kontakt kommt, muss das Gesamtsystem des STM gegen Schwingungsstörungen gedämpft sein. Äußere Einflüsse können dabei Gebäudeerschütterungen verursacht durch Personen, Fahrstühle, Pumpen und Generatoren sein oder aber Luftdruckschwankungen in Form von Schall. Letzterem kann man entgehen, indem die Messung in einer Vakuumkammer durchgeführt wird. Dies erhöht jedoch auch den Messaufwand erheblich. Wesentlich schwieriger zu behandeln sind allerdings innere Schwingungen, welche hauptsächlich durch Relativbewegungen der Spitze zur Probe angeregt werden. Experimentell kann man daher die niederfrequente Eigenmode der Normalbewegung der Spitze zur Probe bestimmen. Es gilt darauf zu achten, dass die laterale Rasterfrequenz hinreichend weit von dieser Eigenfrequenz entfernt liegt.

Eigentlich ein Thema für sich ist die Herstellung geeigneter Tunnelspitzen, welche zu reproduzierbaren Ergebnissen führen. In diesem Versuch werden die Spitzen von einem Draht aus einer besonders harten Platin-Iridium-Legierung geschnitten, sodass geeignete Messbilder aufgenommen werden können. Die Spitzen sind dabei natürlich alles andere als atomar fein. Ein weiteres Verfahren ist das Elektrochemische Ätzen von Metalldrähten. Diese werden dabei an der Ätzstelle ausgedünnt bis sie schließlich auseinanderreißen, wobei das Verfahren erstaunlicherweise oft keine besseren Ergebnisse liefert als das zuerst Besprochene. Eine Methode, die sehr hohe Auflösungen bietet, ist das Brechen einkristalliner Stäbe. Dazu werden Stäbe aus einkristallinen Hartmetallen [z.B. Titancarbid] gefertigt und an einer Stelle nach dem Ätzverfahren auf wenige  $\mu\text{m}$  ausgedünnt. Unmittelbar vor Gebrauch wird der Stab frisch an der Ausdünnung gebrochen in der Hoffnung, dass die Bruchkante entlang einer Kristallrichtung auf ein atomar feines Ende zuläuft.

Ein Vorteil der STM gegenüber vielen Beugungsmethoden ist, dass die Anwesenheit von Luft das Prinzip der Messung nicht stört. Eine andere Frage ist, wie sich hingegen die Probe selbst unter normalen Raumbedingungen verhält. Metallische Proben können an Luft oxidieren und die gewonnenen Abbildungen haben nichts mehr mit der eigentlichen

Oberfläche der Probe gemein. Daher ist es auch aus Sicht der zu untersuchenden Probe oft wichtig, die Messungen im Ultrahochvakuum [UHV] durchzuführen und für hochpräzise Untersuchungen der modernen Forschung unerlässlich.

## 2.4 Hard- & Software

### 2.4.1 Nanosurf® easyScan 2

Dieses STM funktioniert nach obigen Prinzipien und stellt ein leicht bedienbares Tischinstrument dar. Die Grobannäherung erfolgte [siehe Abbildung 7 (b)] zuerst per Hand und das letzte Stück mit Hilfe eines Schrittmotors in Form eines Piezos, der den Zylinder mit Probe über den „Stick-Slip-Effekt“ noch weiter an die Probe heranfährt; dabei wird durch schnelles ziehen des Piezos die kleine Gleitreibung relativ zum Trägheitsmoment des Zylinders ausgenutzt, als dass dieser sich in diesem Schritt nicht bewegt. Das Rückführen des Piezos aber erfolgt dann langsamer, so dass die Haftreibung zur Mitnahme des gesamten Zylinders führt. Durch Anlegen einer sägezahnähnlichen Spannung an den Piezo bewegt man den Zylinder somit bis an die Probe.

Die Software ist ebenfalls leicht zu bedienen und auf die wesentlichen Elemente reduziert [siehe Abbildung 7 (c)]. Links kann man  $I$ ,  $U$ , sowie  $P$ - und  $I$ -Gain einstellen; im innenliegenden Fenster sieht man das gescannte Höhenprofil und kann die Parameter für die Bildgröße, Scangeschwindigkeit, Auflösung und horizontale Rotation einstellen.

Die *Imaging Options* darunter verändern jedoch nur die Anzeige der Messergebnisse.

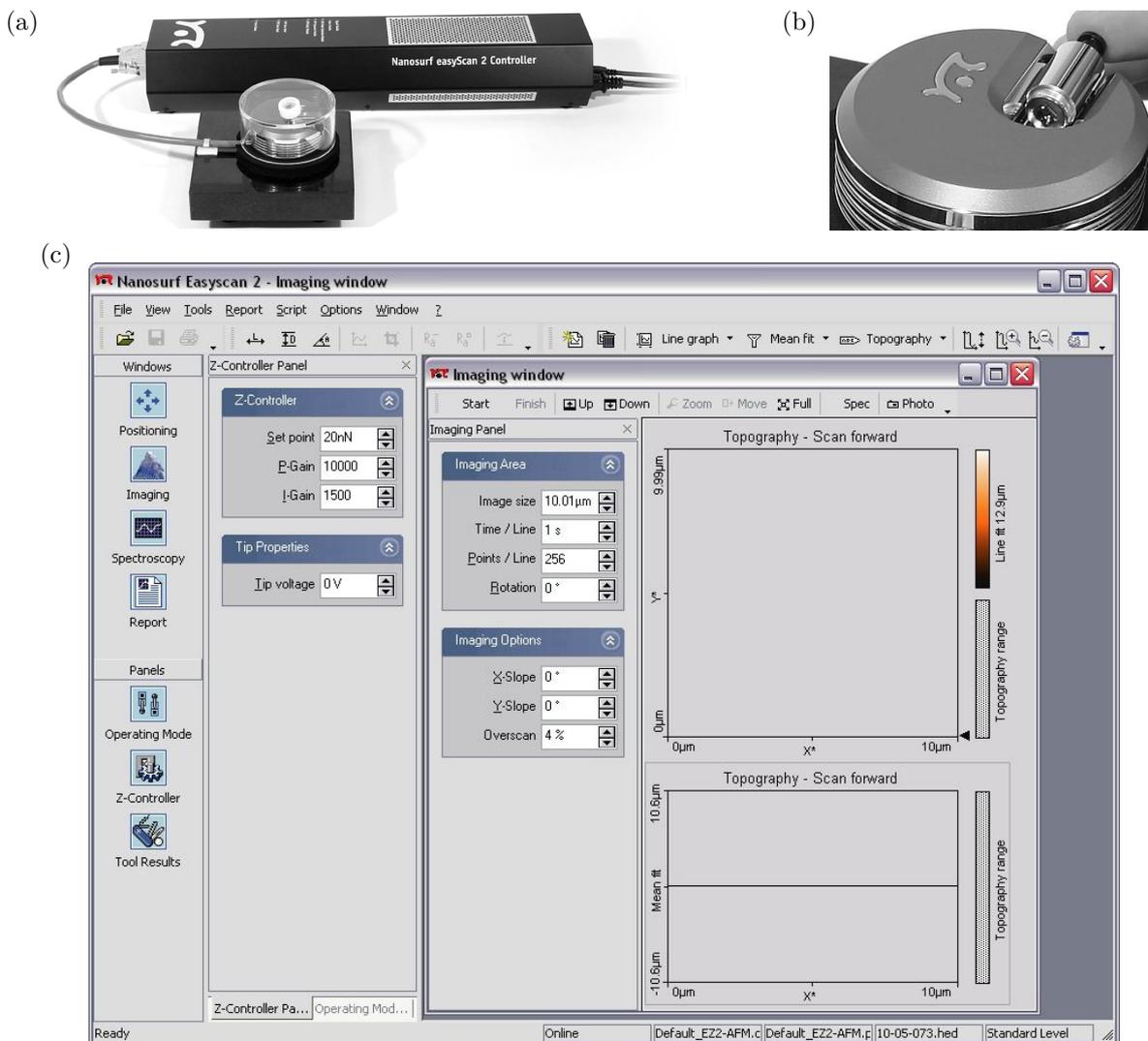


Abbildung 7: (a) Der Nanosurf® easyScan 2-Controller mit Scan-Kopf und Abdeckung mit Lupe. (b) Eine vergrößerte Darstellung des Scan-Kopfes. (c) Eine typische Ausgabe der Software. [alle aus [7]]

### 2.4.2 Gwyddion

*Gwyddion* ist ein OpenSource-Projekt hauptsächlich zur Bearbeitung, Darstellung und Analyse von mit Rastermikroskopen gewonnenen Höhenprofilen.

So kann man zur Darstellung verschiedene Farb-Darstellungen auswählen, das Höhenprofil dreidimensional plotten und die jeweilige Darstellung als .jpg exportieren.

Zur Bildbearbeitung und Analyse stellt es sehr viele Funktionen zur Verfügung, gebraucht wurden hauptsächlich folgende:

- **Subtract Polynomial Background** fittet die Daten an ein Polynom gewünschter Ordnung in  $x$ -, sowie  $y$ -Richtung und subtrahiert das Resultat vom ursprünglichen Bild. Dabei können der Probe intrinsische Eigenschaften ebenfalls gefiltert werden; dies wird durch die Wahl von Polynomen dritter Ordnung sowohl in  $x$ -, als auch  $y$ -Richtung ausgeschlossen, da die Eigenschaften in einer anderen Größenordnung lagen.
- **Distance Tool** zeigt nach dem Ziehen einer Linie im Bild die Abstände parallel zur  $(x, y, 0)$ -Ebene  $[\Delta x, \Delta y, R]$ , den Abstand der Endpunkte senkrecht zu voriger Ebene  $[\Delta z]$  und den Azimuth-Winkel  $[\varphi]$  an.
- **Statistical Quantities Tool** liefert für einen ausgewählten Bereich des Bildes unter anderem Aussagen über die Rauheit des Bereichs. Für die Berechnung gilt [3, 8]:

$$R_q = \sqrt{\frac{1}{NM} \sum_{i,j} |z_{i,j} - \bar{z}|^2}, \quad R_a = \frac{1}{NM} \sum_{i,j} |z_{i,j} - \bar{z}|, \quad (4)$$

wobei  $N, M$  die Anzahl der Pixel in  $x$ -, beziehungsweise  $y$ -Richtung sind,  $\bar{z}$  den Mittelwert darstellt und  $z_{i,j}$  der Höhe des  $(i, j)$ -ten Pixels entspricht.

- **2D Autocorrelation** liefert mindestens eine Spitze mit einer für die Strukturen des Bildes charakteristischen Breite [3]. Die Realisierung ist wie folgt [8]:

$$G(m, n) = \frac{1}{[N-n][M-m]} \sum_{l=1}^{N-n} \sum_{k=1}^{M-m} z_{k+m, l+n} z_{k, l}, \quad (5)$$

mit  $M, N, z_{k,l}$  wie oben.

- **2D FFT** schließlich liefert die Transformation in den reziproken Bildraum und ermöglicht so das Erkennen auch schwach ausgeprägter periodischer Strukturen. Numerisch wird sie prinzipiell so berechnet [3]:

$$F_{p,q} = \frac{1}{MN} \sum_i \sum_j f_{i,j} \exp(2\pi i [i \frac{p}{N} + j \frac{q}{M}]), \quad (6)$$

die inverse Fouriertransformation genauso, nur ohne skalierenden Vorfaktor und mit negierter Phase.

Intern wird dabei die FFTW mit einem Hann-Fenster als Filter [damit die nicht-periodischen Bildgrenzen keine zu großen Störungen verursachen] verwendet.

Um Konsistenz in den gewonnenen Aussagen zu bewahren, sollten alle auf eine Messung angewandten Methoden in ähnlicher Weise auf die anderen angewendet werden[3].

### 2.4.3 Beschichtung

Die Bedampfung mit Gold über physikalische Gasphasenabscheidung aus einem Schiffchen aus Wolfram auf ein Stück  $[\sim 0,25 \text{ cm}^2]$  sehr flaches Silizium im Hochvakuum  $[\sim 10^{-6} \text{ mbar}]$  erfolgt innerhalb einer Stunde. Dazu werden lediglich die zu beschichtenden  $Si$ -Stücke jeweils auf einen Halter aufgeklebt, in einen Halter für die Halter eingeklemmt und in eine Vakuumkammer eingelegt. Etwa 7 cm darunter wird das zu verdampfende Gold in ein Wolframschiffchen gelegt. Die zu verwendende Länge eines Drahtes mit  $d = 0,127 \text{ mm}$  Durchmesser ergibt sich dabei für eine Schichtdicke von ca. 20 nm auf der Probe zu 2,43 cm [das Schiffchen verhält sich näherungsweise wie ein Lambertstrahler  $[\propto \cos(\vartheta)]$ ]. Allgemeiner gilt für eine Probe bei  $\vartheta = 0$ , mit gewünschter Schichtdicke  $h$  und Abstand der Probe vom Schiffchen  $R$ :

$$l = \frac{V_{Gold}}{A_{Draht}} = \frac{h \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{\frac{\pi}{2}} d\vartheta R^2 \sin(\vartheta) \cos(\vartheta)}{\pi \left[\frac{d}{2}\right]^2} = \frac{4hR^2}{d^2} \quad (7)$$

Anschließend wird das System verschlossen, Hochvakuum gepumpt und das Wolfram für etwas weniger als 30s mit 15 A erhitzt und zum Abschluss kurz mit 20 A vollständig vom Gold befreit. Daraufhin wartet man auf das Abkühlen der Probe, schaltet die Vakuumpumpen ab und belüftet.

Generell für die Arbeit mit Vakuum und am STM gilt dabei, möglichst nichts mit den Fingern zu berühren, da zurückbleibende Kohlenwasserstoffe die gewünschte Physik verhindern. - Sauberkeit ist sehr wichtig.

### 3 Versuchsaufbau und -durchführung

Der Versuchsaufbau bestand aus einem PC und dem *Nanosurf<sup>®</sup> easyScan 2*. Letzteres befand sich auf einem separaten Tisch direkt neben dem Computer-Platz, in einer mit Schaumstoff isolierten, verschließbaren, ca. 0,5 m<sup>3</sup> großen Holzkiste. Aufgrund des Kabels des STMs war es aber nicht möglich, die Tür ganz zu schließen.

Im selben Raum befanden sich zwei kleine Vakuumanlagen und eine Klimaanlage direkt über dem Versuchsplatz, deren Einfluss auf das Experiment aber vernachlässigt wurde.

Zur Durchführung wurde zuerst die Spitze mit einer Gold-Probe [38] getestet. Waren die Abbildungsfehler trotz vernünftiger *PID*- und *I*-, sowie *U*-Parameter zu groß, so wurde zuerst versucht, die Spitze durch Stressen [Spannung von -2V bis 2V durchfahren] zu stabilisieren; half dies nicht, so wurde die Spitze kurz in die Probe hineingefahren, anschließend noch einmal gestresst und schließlich neuerdings auf Abbildungsfehler untersucht.

Waren alle diese Versuche ohne Erfolg, so musste eine neue Spitze geschnitten und eingesetzt werden und ebenfalls auf Tauglichkeit überprüft werden.

War die Spitze gut genug, so wurden die verschiedenen Proben [2mal Gold, 1mal Platin, 1mal HOPG, 1mal Graphit und eine selbstbedampfte Probe] manuell in das *Nanosurf<sup>®</sup> easyScan 2* eingelegt und entsprechend obiger Prozedur [siehe Seite 8] herangefahren.

Anschließend wurden die Parameter [*PID*, *I*, *U*, Scangeschwindigkeit, Neigungswinkel] der Probe angepasst, Bilder aufgenommen und gespeichert.

Die Auswertung via *Gwyddion* wird weiter unten [Seite 11] behandelt.

Die Beschichtung einer eigenen Probe erfolgte gemäß obigem [Seite 9] Aufbau.

Zur Bestimmung der Kristallgrößen wurden die polykristallinen Körner als Ellipsen genähert und aus großer und kleiner Halbachse ein für ein Kreis mit gleicher Fläche effektiver Durchmesser bestimmt.

### 4 Messergebnisse

Es ergaben sich folgende, die Proben charakterisierende Größen:

Tabelle 1: Charakteristische Parameter der Proben

Probennummer	Material	Kristallgröße <sup>1</sup>	Kristallhöhe <sup>2</sup>	Rauheit		reziproker Gittervektor <sup>3</sup>	Stufenhöhe <sup>4</sup>
				$R_a$	$R_q$		
	$X^5$	[7,4 ± 4,9]nm	~ 1,5 nm	0,22 nm	0,28 nm	< 0,125 nm <sup>-1</sup>	–
5	HOPG	–	–	0,30 nm	0,37 nm	–	[0,04 – 0,50]nm
12	Au	[12,3 ± 5,8]nm	~ 3 nm	0,60 nm	0,77 nm	< 0,084 nm <sup>-1</sup>	–
26	Graphen	[0,13 ± 0,02]nm, [1,4 ± 0,3]nm	~ 50 pm	3,67 pm	4,65 pm	5,5 nm <sup>-1</sup> , 0,8 nm <sup>-1</sup>	5 pm, 30 pm
34	Pt	[7,3 ± 4,0]nm	~ 0,5 nm	0,11 nm	0,13 nm	< 0,102 nm <sup>-1</sup>	–
38	Au	[13,5 ± 6,1]nm	~ 3 nm	0,58 nm	0,74 nm	< 0,080 nm <sup>-1</sup>	–

## 5 Diskussion

### 5.1 Der Einfluss der Scan-Parameter und typische Abbildungsfehler

Das STM ist zwar nicht durch Aperturen oder Wellenlängen begrenzt, seine Auflösung ist aber auch nicht unendlich groß. Dies hängt maßgeblich von der Qualität der Spitze und nachrangig von Regelparametern ab.

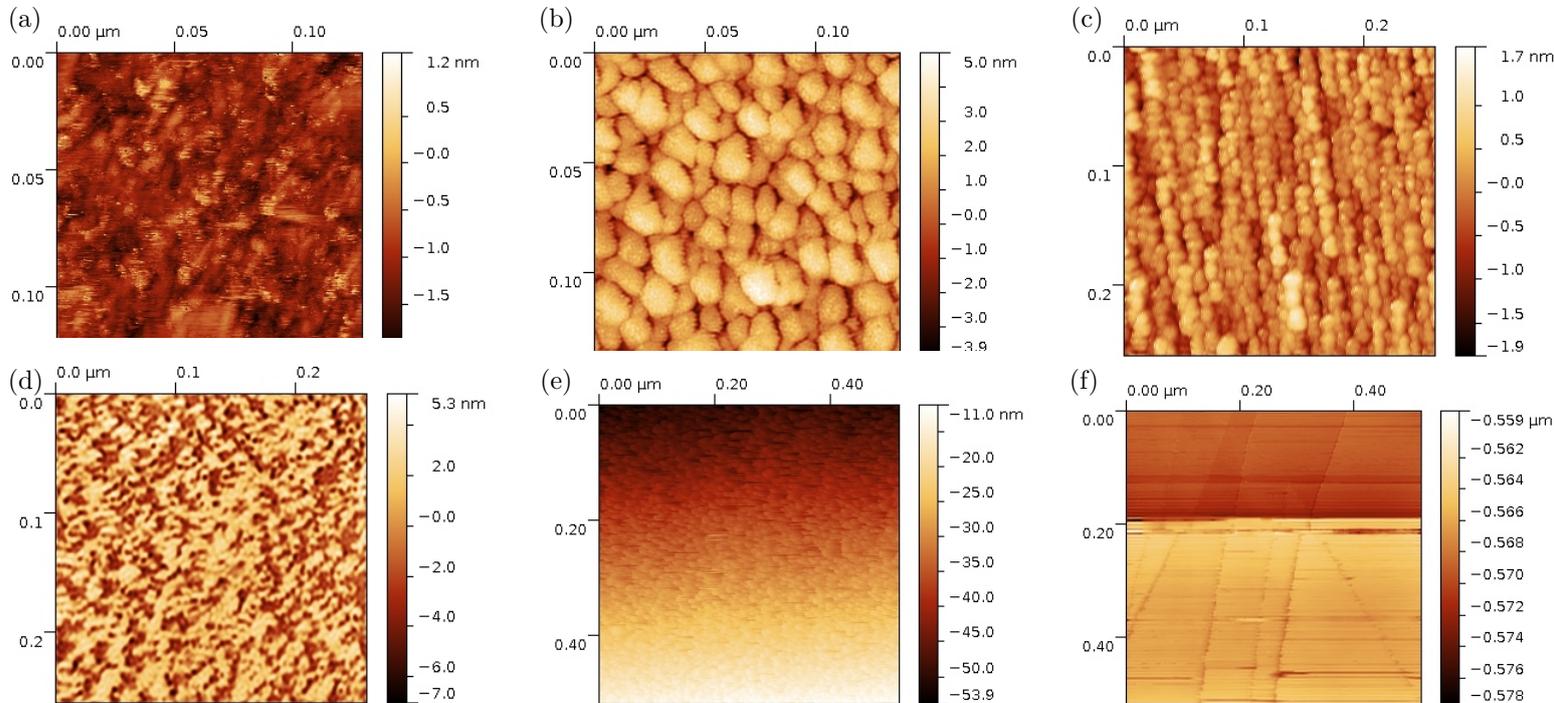


Abbildung 8: Typische Abbildungsfehler eines STMs.

Wie in Abbildung 8 (c) und (d) zu sehen, verfälschen Spitzenfehler das Messergebnis wesentlich. In 8 (c) entstehen dabei nur Geister-Bilder, welche durchaus noch Informationen über Korngrößen liefern; diese stimmen auch mit den vorigen Messungen überein. Dabei ist die Spitze so breit, dass die selbe, hervorragende Struktur der Probe an unterschiedlichen Rasterpunkten abgebildet wird.

In Abbildung 8 (d) ist ebenfalls eine polykristalline Probe gescannt worden. Die Spitze war hier so uneben, dass der Tunnelstrom sich aus mehreren, schwach lokalisierten Teilen zusammensetzte. Vor allem das Ausmessen von kleinen Löchern war hier nicht möglich, weiter außen liegende Spitzenatome verhinderten es [wobei ein relativ hoher  $I$ -Gain diesen Effekt hier noch verstärkte].

Auch wesentlich, mit diesem Versuchsaufbau jedoch erstaunlich gut realisiert, ist die Schwingungsdämpfung. In Abbildung 8 (f) sieht man in  $x$ -Richtung Linien starker Höhenunterschiede. Diese sind auf eine in unmittelbarer Nähe zum Veruchsplatz gehende Person zurückzuführen. Aufgrund der unterschiedlichen Tiefe dieser Linien sieht man die Auftrittsstärke und unter  $y \approx 0,2 \mu\text{m}$  einen zurückbleibenden Versatz der Probe zum ursprünglichen Ort. Dieser Effekt ist bei unseren Messungen jedoch nur bei den Kohlenstoffen mit selbst sehr kleinen Höhenunterschieden bemerkt worden.

In Abbildung 8 (e) sieht man den Drift der Probe während des Scannens. Zu Beginn eines jeden Versuchstages betrug dieser ca. 40 nm in 70 s, wurde mit der Messzeit dann aber weniger. Dies ist auf thermische Effekte in den Piezos zurückzuführen [siehe oben: „Genauigkeit und Driften“, Seite 5].

<sup>1</sup>Für die polykristallinen Stoffe der mittlere Durchmesser der Einkristalle, senkrecht zur Probe betrachtet; für Graphen die Größe des atomaren, bzw. des überlagerten Gitters. Für *HOPG* wurde keine ausreichende Auflösung erzielt.

<sup>2</sup>Dies sind grobe Abschätzungen aufgrund der Welligkeit der Oberflächen; bei Graphen ca. das 1,5-fache der einatomigen Stufe.

<sup>3</sup>Abgelesen aus *FFT*-Bildern; jeweils in guter Übereinstimmung mit den Messungen im Realraum.

<sup>4</sup>Für polykristalline Stoffe hat diese Größe keinen Sinn. Bei den Kohlenstoffen ergaben sich verschieden hohe Übergänge.

<sup>5</sup>Das Material war während des Versuchs unbekannt.

Jedoch auch das Reinigen des Probenzylinders mit Ethanol führten zu einer Verminderung des Drifts.

In Abbildung 8 (a) und (b), sowie Abbildung 10 (a) und (c), sieht man Fehler aufgrund nicht optimal eingestellter Parameter. In Abbildung 8 (a) und Abbildung 10 (c) war der *I*-Gain jeweils zu stark eingestellt, so dass die Spitze dem Probenverlauf nur langsam folgte und bei stark ansteigenden Kanten zu verspäteten und dann zu starken Reaktionen neigt. Dies führt zu starken Überschwingern in Scan-Richtung.

In Abbildung 8 (b) und Abbildung 10 (a) war der *I*-Gain moderater, der *P*-Gain nun aber zu klein eingestellt. Dies führt zum „Überspringen“ scharfer Kanten in Scan-Richtung. Auch neigt die Spitze wiederum dazu, zu nah an herausragende Strukturen heranzufahren und dann zu spät zu stark zu reagieren.

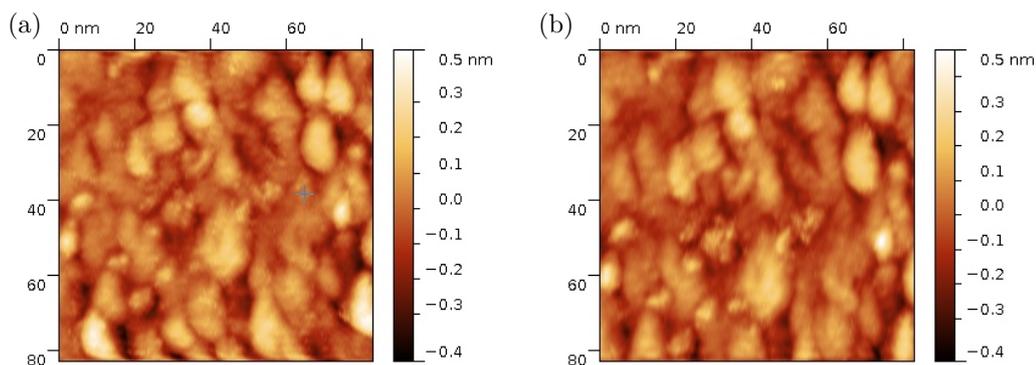


Abbildung 9: Die Änderung der Skalierung ohne Änderung der Parameter.

Abbildung 9 sind beides Aufnahmen der gleichen Probe, an der gleichen Stelle, mit den gleichen Parametern; der Zeitunterschied beträgt ca. 16 min; die Scanzeit eines Bildes waren weniger als anderthalb Minuten. Daher muss sich der *y*-Piezo in der zeit durch hysteretische Effekte verändert haben, so dass sein Ansprechverhalten nicht mehr gleich stark ist. Die Proportionen des Bildes in *x*-Richtung sind derweil noch konstant.

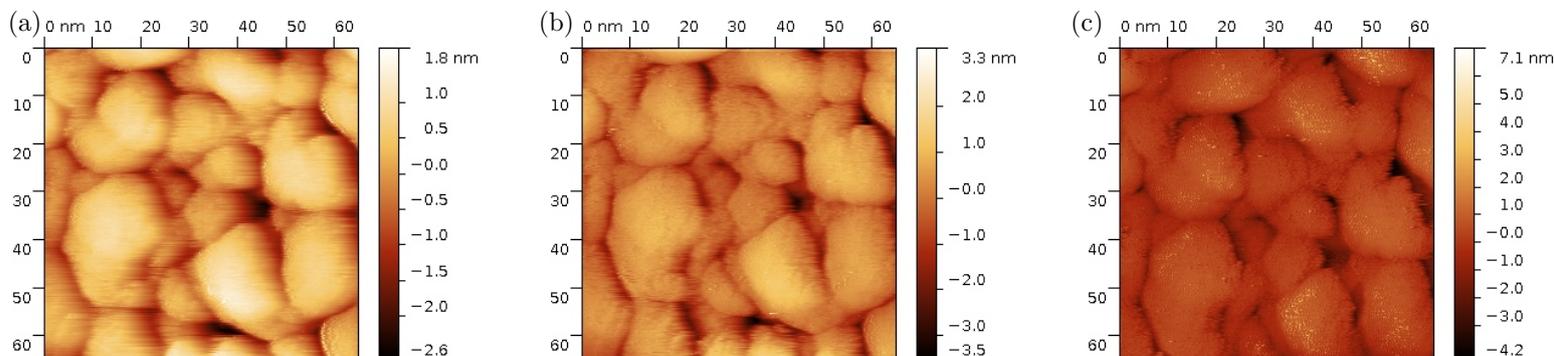


Abbildung 10: Der Einfluss des *I*-Gain-Parameters auf die Messung - unbearbeitete Bilder für 100[(a)], 300[(b)], 1000[(c)].

Die Abhängigkeiten vom *I*-Gain sind, wie schon weiter oben beschrieben, derart, dass für zu große, beziehungsweise zu kleine Werte Bildfehler auftreten [siehe Abbildung 10]. Gleiches gilt für den *P*-Gain, der absolute Wert ist aber ein anderer.

Eingängiger ist es, das Verhältnis von *P*- und *I*-Gain als Parameter für die Reaktionsgeschwindigkeit der Spitze und den absoluten Werte von *P* als Maß für die Reaktionsstärke zu betrachten.

Dabei sind die Parameter für jede Probe bei jeweiligem Tunnelstrom und jeweiliger Tunnelspannung neu einzustellen.

Noch zu bemerken ist: Setzt man den *I*-Gain auf 0, so erhält man Strombilder.

## 5.2 Die Gold-Proben

Beide Goldproben lieferten gute Bilder, atomare Auflösung jedoch wurde nicht erreicht. Beide sind polykristallin mit Korngrößen von 5 nm bis 20 nm. Sowohl  $R_q$  als auch  $R_a$  betragen etwa 0,7 nm.

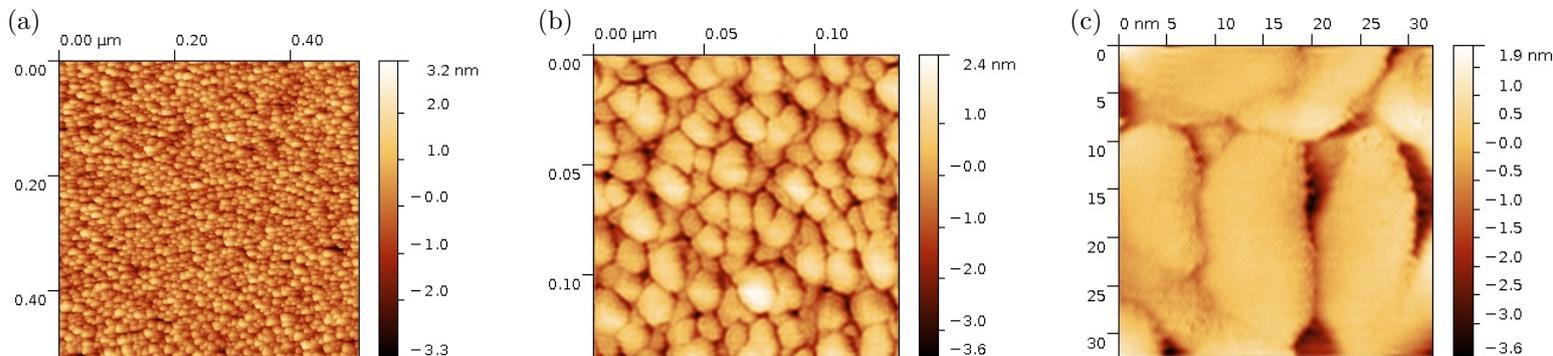


Abbildung 11: STM-Aufnahmen von 38-Au.

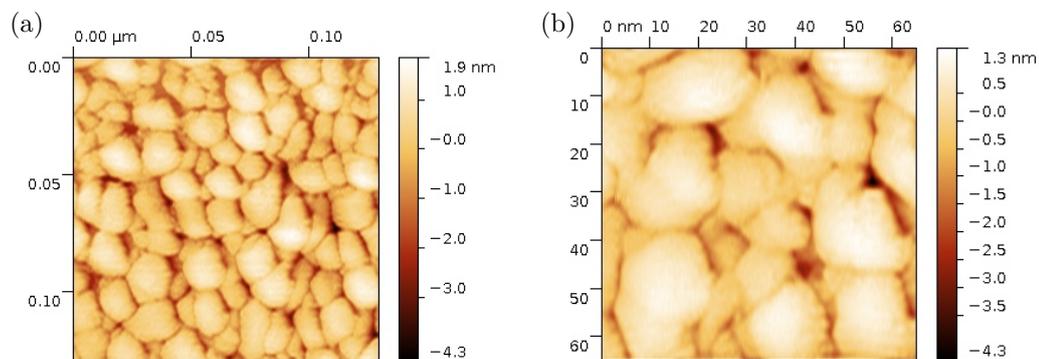


Abbildung 12: STM-Aufnahmen von 12-Au.

## 5.3 Die Platin-Probe

Die Platin-Probe ist ebenfalls polykristallin, jedoch nicht so einfach abzubilden, wie das Gold. In Abbildung 13 sind verstärkt Geisterbilder zu sehen. Analog zum Gold gehen wir davon aus, dass sich auch hier die Kristallgröße trotzdem repräsentativ bestimmen lässt; es ergaben sich für die Kristallgröße ca. 8 nm und für Kristallhöhe 0,5 nm.

Verglichen mit Gold handelt es sich also um etwa gleich breite, jedoch wesentlich flachere Einkristalle.

## 5.4 Die Graphen-Probe

Sie lieferte die höchst-aufgelösten Bilder; die atomare Struktur des Graphen wurde sichtbar. Auch das durch den Moiré-Effekt zwischen oberster und darunterliegendem, gleichmäßigen Kristall hervorgerufenen Übergitter war sehr gut sichtbar [siehe Abbildung 14 (b)]. Die gemessenen Gitterkonstante von 1,4 nm stimmt sehr gut mit [5] überein. Im Umkehrschluss lässt dies auf eine Orientierung der obersten Ebenen von  $\sim 2^\circ$  zueinander schließen.

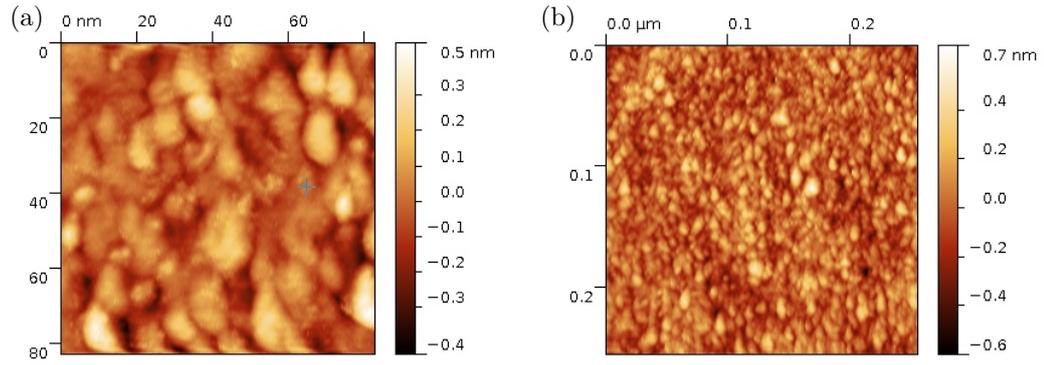


Abbildung 13: STM-Aufnahmen von 34-Pt.

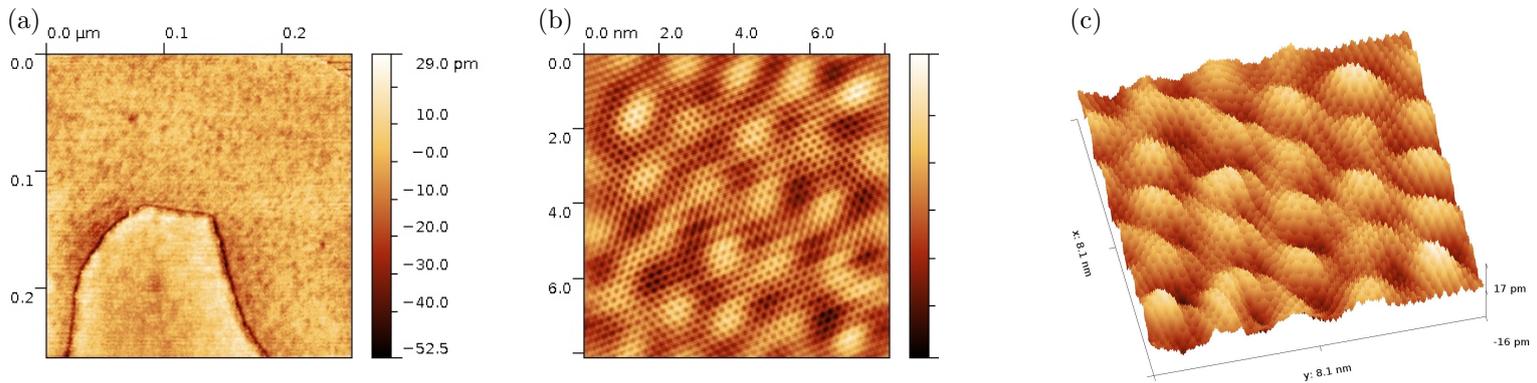


Abbildung 14: STM-Aufnahmen von 26-Graphen.

In der Autokorrelation, sowie der Fouriertransformierten [bearbeitet] sind sowohl das atomare als auch das Über-Gitter sehr gut zu erkennen.

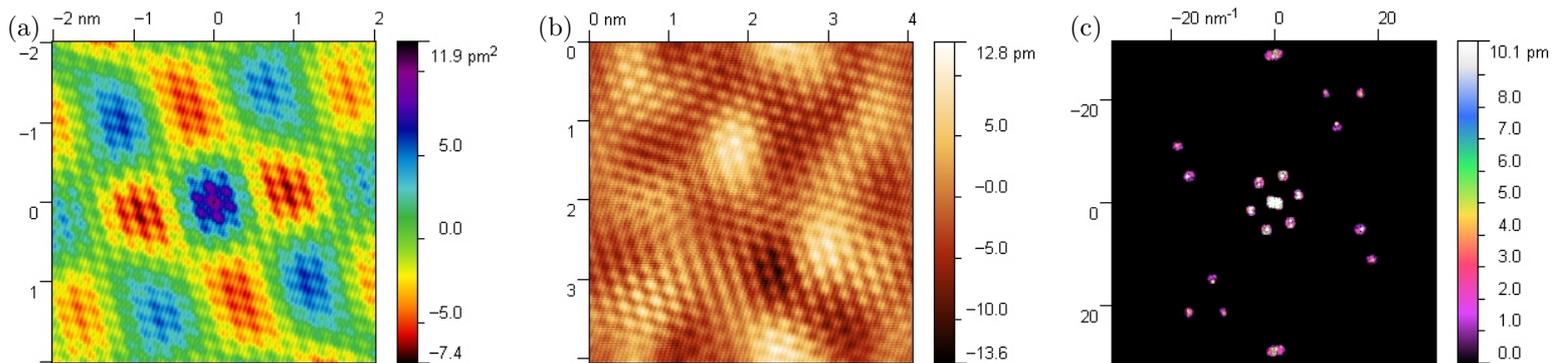


Abbildung 15: Die Betrachtung der gleichen STM-Aufnahmen von 26-Graphen[(b)] in Autokorrelation[(a)] und fourier-transformiert [(c)].

Aufgrund der Glattheit der Probe, liefert hier das Strombild [Abbildung 16 (b)] ebenfalls sehr gute Aussagen. Verglichen mit Abbildung 16 (a) stimmen diese sehr gut überein. Anzumerken ist, dass das Strombild nicht, das z-Piezo-Bild sehrwohl nachbearbeitet wurde.

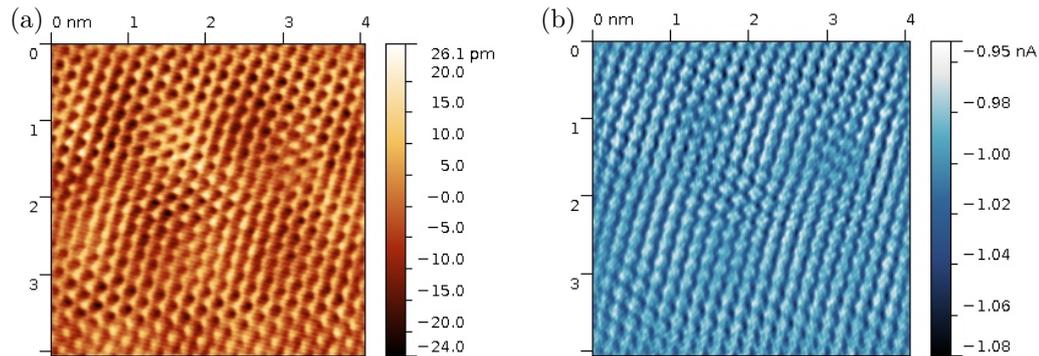


Abbildung 16: Weitere STM-Aufnahmen von 26-Graphen; (a)  $z$ -Piezo-Werte, (b) Ströme.

## 5.5 Die HOPG-Probe

HOPG ist sehr reines Graphit, welches einen Versatz  $< 1^\circ$  zwischen den atomaren Ebenen aufweist. Die in Abbildung 17 (a) sichtbaren Plateaus sind jedoch nicht entlang den Ausrichtungsrichtungen der Ebenen, sondern durch das Cleaven entstanden und entsprechend ausgerichtet.

Atomare Auflösung wurde nicht erreicht; Über-Gitter wären hier jedoch nicht - im Gegensatz zum Graphen - zu erwarten gewesen.

Die Linie in Abbildung 17 stellt keine Stufe, sondern eher einen 0,4 nm hohen Wall dar. Auch der im unteren Bereich des Bildes daran Befindliche Fleck weist die gleiche Höhe auf. Aufgrund der Form schließen wir darauf, dass dies beim Cleaven durch die Form eines Fingerabdrucks oder Unreinheiten auf dem Klebestreifen entstanden sein muss.

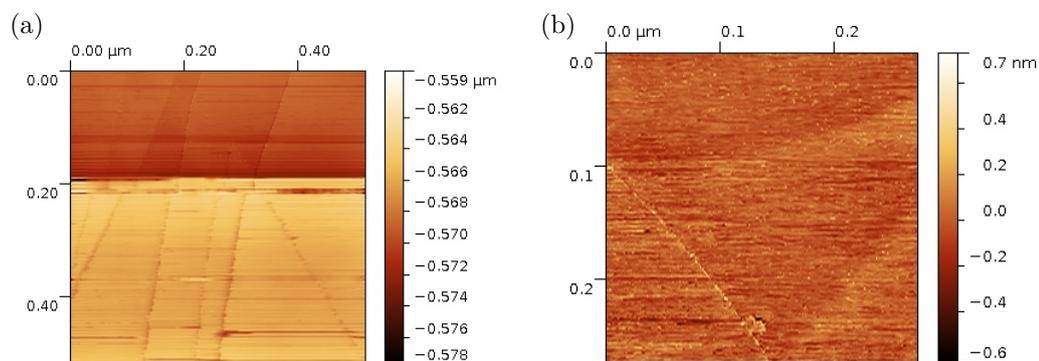


Abbildung 17: STM-Aufnahmen von 5-HOPG.

## 5.6 Die selbst bedampfte Probe

Zur Sicherheit hatten wir zwei Proben bedampft. Diese waren, obwohl wir nur Gold in das Wolfram-Schiffchen gelegt hatten, beide silberfarben. Eine war silbern glänzend, die andere matt.

Unterm STM zeigten sich folgende Strukturen:

Dabei sind in  $y$ -Richtung verstärkt Geisterbilder zu sehen. Dass die Probe polykristallin ist, ist jedoch zweifelsfrei sichtbar.

Verglichen mit den Goldproben ergeben sich etwa halb so große Strukturen [7 nm statt 13 nm effektiver Durchmesser und 1,5 nm statt 3 nm Einkristallhöhe]; was zu etwa halb so großen Rauigkeiten führt.

Dies deutet zusätzlich zum optischen Eindruck darauf hin, dass es sich hierbei nicht um Gold handelt! Die für uns einzig sinnvolle Erklärung ist, dass die Bedampfungsanlage zuvor nicht richtig sauber war. Da aber das eingelegte Gold nach dem Bedampfen nicht mehr da war, offensichtlich aber unter dem nun gemessenen Material liegt, muss dieses eine

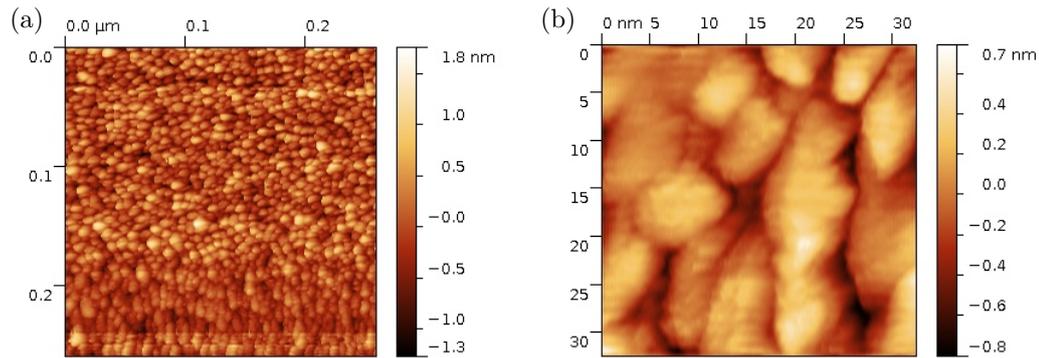


Abbildung 18: STM-Aufnahmen der glänzenden, selbstbedampften Probe.

höheren Schmelz-/Sublimationstemperatur aufweisen.

## 6 Zusammenfassung

Isoliert man Temperatur, Schwingungen und Licht, stellt ein Gleichgewicht von Temperatur und hysteretischem Verhalten im Betrieb sicher, stellt und prüft sorgfältig die verwendete Spitze und achtet auf Sauberkeit der Probe, so kann man mit Hilfe eines STM bei Raumtemperatur und normalem Luftdruck sehr gute Oberflächentopographien leitender Materialien im  $520 \times 520 \text{ nm}^2$ -Bereich darstellen.

Dazu gehören vorhergehende theoretische Überlegungen, um von der Elektronenzustandsdichte auf echte Topographien schließen zu können. Außerdem muss die Art des zu scannenden Materials bekannt sein.

Der Einfluss von  $P$ - und  $I$ -Gain ist in einem mittleren Bereich durch Bildbearbeitung im Nachhinein korrigierbar.

Die Bildbearbeitung generell bildet dabei eine Interpretation und somit Veränderung der Messwerte zur eigenen Meinung hin dar. Für die hier durchgeführten Untersuchungen gibt es aber schon genug Untersuchungen und darauf aufbauend theoretische Überlegungen, die die gefundenen Strukturen ebenfalls darstellen.

Für Oberflächen, die nicht nur maximal Kanten in der Höhe eines Atoms aufweisen und somit im Allgemeinen, ist der Konstantstrommodus auf jeden Fall die bessere Wahl.

Grundlegende Eigenschaften wie Rauheit, Polykristallinität und Ähnliches sind somit leicht bestimmbar. Von den untersuchten Materialien weist Gold die größte, Graphen die kleinste Rauheit auf.

Um der Zielsetzung dieses Praktikums, in dem es um die Methoden und nicht um neue Ergebnisse geht, gerecht zu werden, noch eine abschließende Bemerkung über dieses Protokoll selbst:

Die Grundlagen sind zu lang, zu kleinschrittig und zu sehr in Prosa geschrieben.

Die Menge der Bilder ist der Art des Versuches geschuldet.

## 7 Literatur

- [1] [http://home.degn.net.de/metten\\_gym/physik/Facharbeit-Dateien/image057.jpg](http://home.degn.net.de/metten_gym/physik/Facharbeit-Dateien/image057.jpg).
- [2] BASTIAN VOGTNER: *Der piezoelektrische Effekt*, 2009.
- [3] COLTON ET AL: *Procedures in Scanning Probe Microscopies*. Wiley, 1998.
- [4] H. BEYER, M. MÜLLER UND TH. SCHIMMEL: *Monolayers of graphite rotated by a defined angle: hexagonal superstructures by STM*. Applied Physics A, Seiten 163–166, 1999.
- [5] J. XHIE, K. SATTLER, M. GE UND N. VENKATESWARAN: *Giant und supergiant lattices on graphite*. Physical Review B, 47(23):15835, 1993.
- [6] M. HIETSCHOLD UND C. HAMANN: *Raster-Tunnel-Mikroskopie*. Akademie Verlag GmbH, Chemnitz, 1991.
- [7] NANOSURF AG: *Operating Instructions - easyScan 2 STM*. Manual, 2007.
- [8] P. KLAPETEK, D. NECAS, AND C. ANDERSON: *Gwyddion user guide*. 2013.
- [9] PH. EBERT: *Rastersondenmikroskopie*. Kapitel 2. Jülich.
- [10] W. DEMTRÖDER: *Atome, Moleküle und Festkörper*. Springer, 4. Auflage, 2010.
- [11] WIKIPEDIA: *Rastertunnelmikroskop*, November 2013.

## 8 Anhang

- Handschriftliches Protokoll