

# **Fortgeschrittenenpraktikum - Festkörper - Rastertunnelmikroskopie**

Corinne Steiner (344870)<sup>1</sup> and Katrin Hecker (342038)<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Gruppe 45*

(Dated: 7. März 2018)

## CONTENTS

I. Einleitung	3
II. Theorie	3
A. Physikalische Grundlagen	3
1. Tunneleffekt	3
2. Tunnelkontakt im Bändermodell	3
3. Piezoelektrischer Effekt	4
B. Prinzip des Rastertunnelmikroskops	4
1. Regelung des Tunnelstroms - PID	5
2. Betriebsmodi	6
3. Aufbau des Rastertunnelmikroskops	7
III. Gold	8
A. Durchführung	8
B. Auswertung	9
IV. Hochorientierter pyrolytischer Graphit	12
A. Durchführung	12
B. Auswertung	14
1. Vermessung einer Graphitkante	14
2. Bestimmung der Atomabstände und der Kalibrierung	17
V. Fazit	21

## I. EINLEITUNG

Durch die Rastertunnelmikroskopie ist die Untersuchung von Strukturen kleinster Größenordnungen bis hin zur atomaren Auflösung möglich. Ein entscheidender Vorteil ist, dass die topologische Struktur der Probe erfasst werden kann, ohne, dass die Probe physisch berührt und damit zerstört wird. Der hier durchgeführte Versuch hat das Ziel die Funktionsweise des RTMs und die bestimmenden Parameter der Bildaufnahme zu verstehen.

## II. THEORIE

### A. Physikalische Grundlagen

#### 1. *Tunneleffekt*

Die Funktionsweise eines RTMs basiert auf der Ausnutzung des Tunneleffekts. Der Tunnel-effekt beschreibt die Fähigkeit eines quantenmechanischen Teilchens eine Potentialbarriere zu durchtunneln, welche größer als seine Eigenenergie ist.

Trifft eine ebene Welle mit Energie  $E$  auf eine Potentialbarriere der Größe  $V_0$  wird sie teilweise reflektiert und teilweise transmittiert. Löst man die Schrödingergleichungen für die Teilbereiche vor, in und hinter der Barriere ergeben sich ebene Wellen vor und hinter der Barriere. Innerhalb der Barriere erhält man einen exponentiellen Verlauf.

Im Grenzfall einer hohen und breiten Barriere ist  $T = \frac{16k^2\kappa^2}{(k^2+\kappa^2)^2} \exp(-2\kappa d)$  der Transmissionskoeffizient wobei  $k^2 = \frac{2mE}{\hbar^2}$  und  $\kappa^2 = \frac{2m(V_0-E)}{\hbar^2}$ . Die Barriere wird durch die Austrittsarbeiten der Elektronen bestimmt.

#### 2. *Tunnelkontakt im Bändermodell*

Der Tunnelstrom hängt nicht nur von den Elektronen ab sondern auch von der Anzahl beteiligter Zustände. Die elektronischen Zustände in Spitze und Probe sind bis zur Fermienergie  $E_F$  aufgefüllt, weshalb erst ein Tunnelstrom fließen kann wenn die Fermi-niveaus gegeneinander verschoben sind, so dass ein Elektron jenseits der Barriere freie Zustände vorfindet. Dies wird durch Anlegen einer Tunnelspannung  $U \neq 0$  erreicht, wodurch Elektronen im Energieintervall  $eU$  tunneln können.

Berücksichtigt man nun die Zustandsdichten von Spitze ( $\rho^S$ ) und Probe ( $\rho^P$ ) ergibt sich für den Tunnelstrom:

$$I \propto \int_0^{eU} \rho^S(E_F^S + \epsilon) \rho^P(E_F^P - eU + \epsilon) d\epsilon \quad (\text{II.1})$$

Unter Annahme einer konstanten Zustandsdichte im Energieintervall erhält man den einfachen Zusammenhang

$$I \propto U \exp(-2\kappa d). \quad (\text{II.2})$$

### 3. *Piezoelektrischer Effekt*

Für die Rastertunnelmikroskopie ist es notwendig, dass die Spitze des RTMs die Probe über einen sehr kleinen Bereich (sub-Nanometer) rastern kann. Um dies zu ermöglichen, nutzt man piezoelektrische Kristalle. Diese besitzen die Eigenschaft durch mechanische Deformation eine elektrische Polarisierung zu erzeugen. Umgekehrt lässt sich durch Anlegen einer Spannung eine Längenänderung des Kristalls erreichen, welche im benötigten Bereich  $nm/V$  liegt. Zu beachten sind allerdings thermische sowie Kriecheffekte, welche es zu minimieren gilt.

## B. Prinzip des Rastertunnelmikroskops

Die Oberfläche der zu untersuchenden Probe wird mittels einer sehr feinen Spitze gerastert. Durch Verwendung piezoelektrischer Kristalle kann die Spitze in allen Raumrichtungen hinreichend präzise positioniert werden, so dass eine sehr gute Ortsauflösung erreicht wird. Zwischen Probe und Spitze wird eine Tunnelspannung angelegt und der Tunnelstrom gemessen. Das Stromsignal wird dabei mit einem vorher eingestellten Sollwert verglichen und eine Regelung kontrolliert den Abstand zwischen Probe und Spitze. Durch die starke Abstandsabhängigkeit des Tunnelstroms ist es nun möglich ein Bild der Proben topographie zu erhalten.

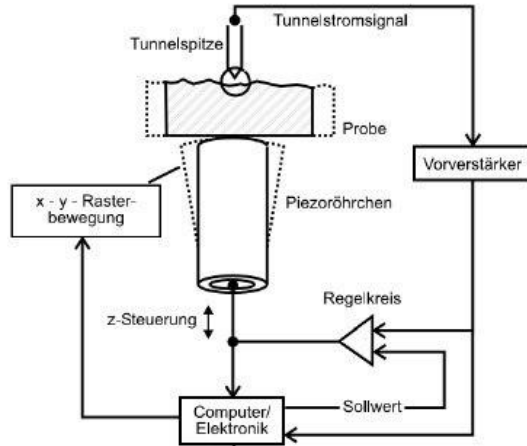


Abbildung 1. Prinzip des Rastertunnelmikroskops

### 1. Regelung des Tunnelstroms - PID

Die PID-Methode wird verwendet, um aus dem gemessenen Stromsignal ( $I(t)$ ) und dem Vergleich mit dem Sollwert  $S$  eine geeignete Stellgröße ( $Y(t)$ ) zur Steuerung des Proben-Spitzen-Abstandes zu erzeugen.

Die Änderung der Stellgröße hängt von verschiedenen Parametern ab.

$$Y(t) = gE(t) + \frac{h}{T_I} \int_{t-T_I}^t E(\tau) d\tau + jT_D \frac{dE(t)}{dt} \quad (\text{II.3})$$

Der erste Faktor ist der Proportionalitätsanteil, welcher proportional zur Abweichung vom Sollwert den Abstand ändert. Dadurch entsteht allerdings ein Regelfehler, der durch den zweiten Faktor, den Integralteil, behoben wird. Hierbei wird die der Integrationszeit zugeordnete Frequenz als Bandbreite bezeichnet. Die Bandbreite ist die höchste Frequenz, die noch nicht durch den Integralteil herausintegriert wird. Der dritte Faktor, der Differentialteil, berücksichtigt schnelle Variationen der Regelgröße, welche durch diesen schnell nachgeregelt werden können. Dadurch werden jedoch auch externe Störungen verstärkt. In diesem Versuch wird nur der Integralteil verwendet.

## 2. Betriebsmodi

Das RTM kann in zwei verschiedenen Betriebsmodi betrieben werden, für die sich der Informationsgehalt des Strom- und z-Bildes unterscheidet.

Im Konstantstrommodus wird durch die Regelung des Probe-Spitze-Abstandes der Tunnelstrom konstant gehalten, so dass auch unebene Oberflächen gerastert werden können. Aus den Abweichungen zu einem konstanten Tunnelsignal lässt sich die Qualität des z-Bildes ableiten, da der Strom ein Abbild des Regelfehlers liefert.

Untenstehende Abbildung zeigt die Auswirkungen unterschiedlicher Regelgeschwindigkeiten.

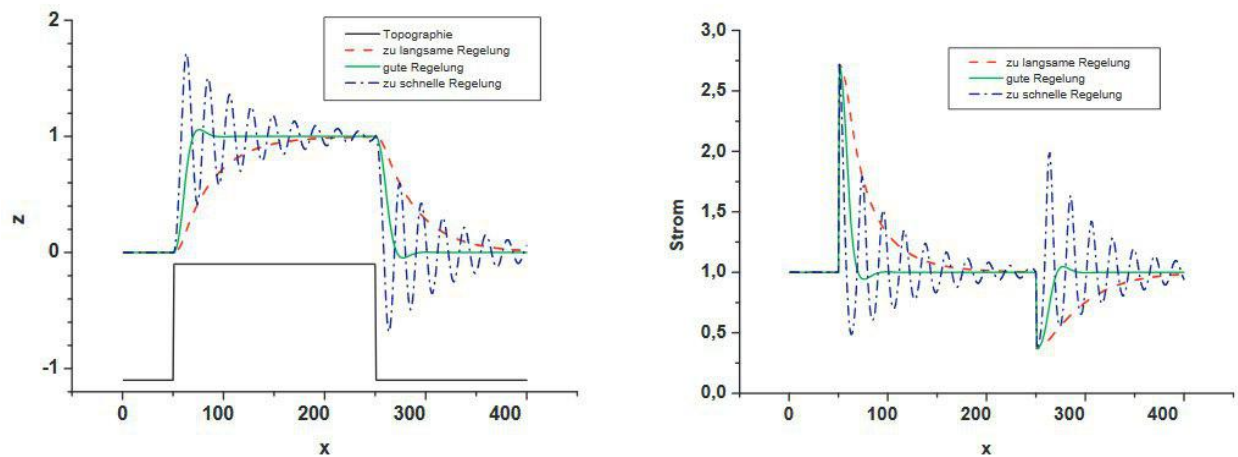


Abbildung 2. Auswirkungen verschiedener Regelgeschwindigkeiten im z-Bild (l) und im Strombild (r)

Deutlich erkennbar ist die Überschwingung bei einem zu empfindlich eingestellten Regler. Bei Verlangsamung der Regelgeschwindigkeit verschiebt sich die Höheninformationen zunehmend ins Strombild. Dies ist gut zu erkennen wenn Vorwärts- und Rückwärtsprofil verglichen werden, da die Abbildung von Strukturen bei zu langsamer Regelung in Rasterrichtung verschoben ist.

Der Konstanthöhenmodus kommt vor allem für atomare Auflösung bei ebenen Proben zum Einsatz. Hierbei wird der Abstand zwischen Spitze und Probe konstant gehalten, so dass schon kleinste Änderungen der Topographie starke Änderungen des Tunnelstroms zur Folge haben. Die Bildinformationen finden sich also fast komplett im Strombild.

### 3. Aufbau des Rastertunnelmikroskops

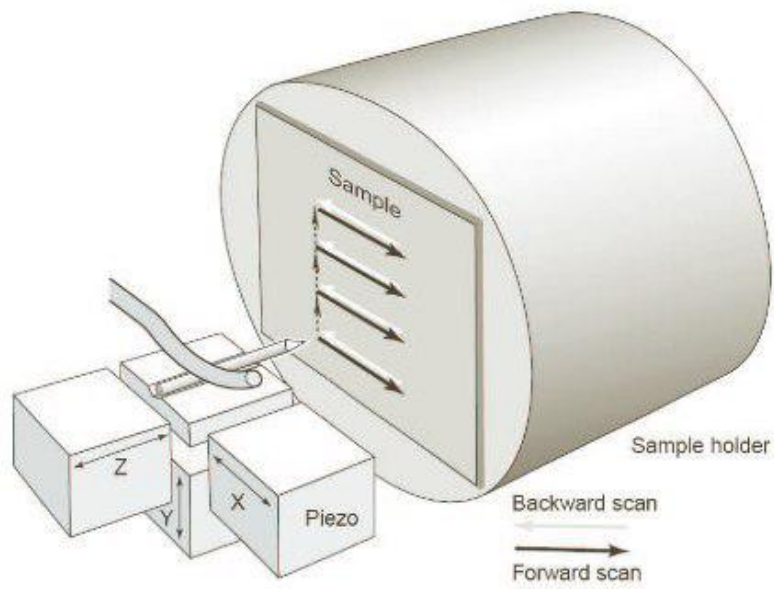


Abbildung 3. Aufbau des verwendeten RTMs

Die Probe ist auf einem Metallstempel angebracht, welcher zu Beginn einer Messreihe grob an die Spitze angenähert wird. Die Feinannäherung sowie die Rasterbewegung der Spitze erfolgt durch Piezokristalle in allen Raumrichtungen.

### III. GOLD

#### A. Durchführung

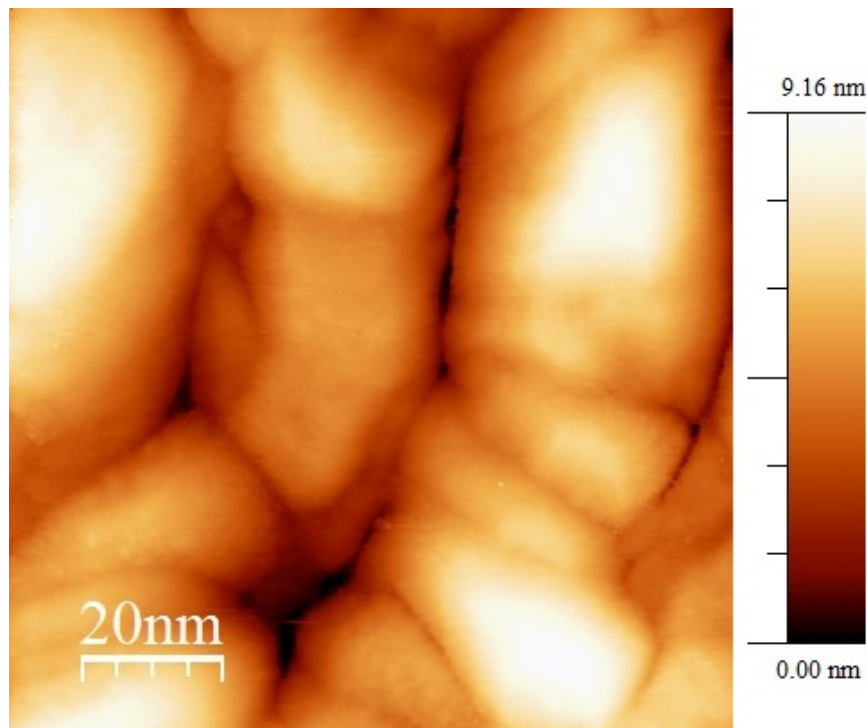


Abbildung 4. Topografie Bild von Gold bei einer Bildgröße von  $100\text{nm} \times 100\text{nm}$  im forward Scan

Die erste Probe, die unter dem Rastertunnelmikroskop untersucht wird, ist Gold. Um sich mit dem Mikroskop vertraut zu machen, werden die Parameter Rasterzeit und I-Gain variiert. Ziel ist es, eine gute Einstellung der Parameter zu ermitteln. Dazu werden bei Gold zunächst vier Bilder mit unterschiedlichen I-Gain Werten aber fester Rasterzeit aufgenommen und die beste Einstellung ermittelt. Diese wird dann beibehalten und es werden ebenfalls vier Bilder mit unterschiedlichen Rasterzeiten aufgenommen, bis der beste Wert gefunden ist.

Damit die Bilder gut vergleichbar sind, wird eine prägnante Struktur des Goldes betrachtet. In Abbildung 4 ist diese zu sehen.

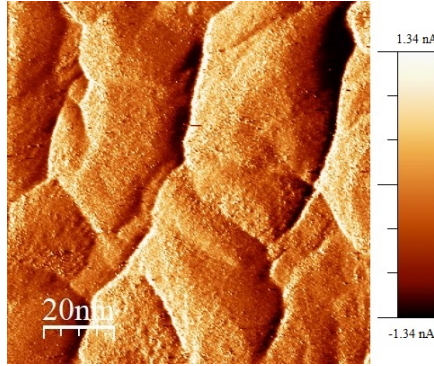


## B. Auswertung

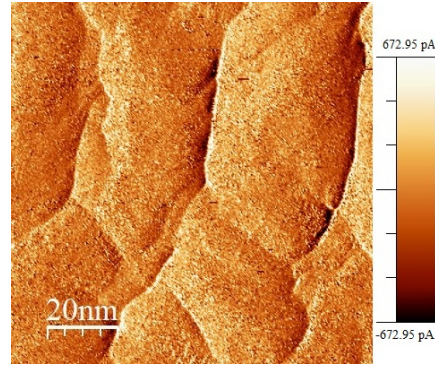
Zunächst wird der identische Bereich des Goldes mit vier verschiedenen I-Gain Werten aufgenommen. Die Einstellungen des Rastertunnelmikroskops hierfür sind in Tabelle I aufgelistet.

Tabelle I. Einstellungen des RTMs für die Aufnahmen des Goldes bei vier verschiedenen I-Gains

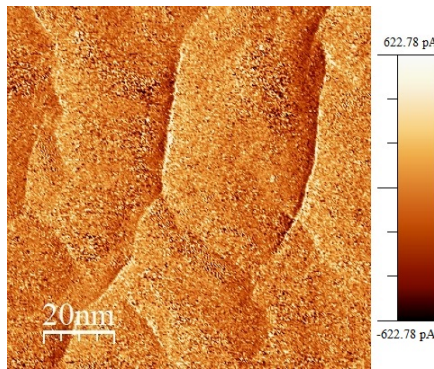
<i>Bildgröße</i>	<i>Rasterzeit</i>	<i>Tunnelstrom</i>	<i>P-Gain</i>	<i>I-Gain</i>	<i>Spannung</i>
nm	ms	nA			V
100	300	1	1000	1000	1
100	300	1	1000	3500	1
100	300	1	1000	6000	1
100	300	1	1000	8000	1



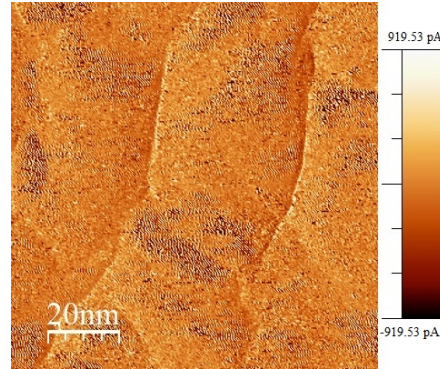
(a) I-Gain: 1000



(b) I-Gain: 3500



(c) I-Gain: 6000



(d) I-Gain: 8000

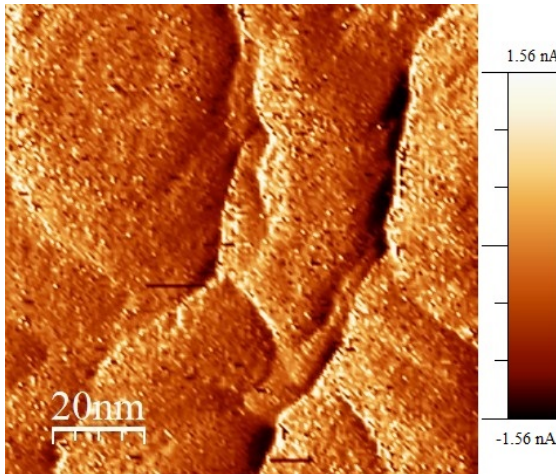
Abbildung 5. Strombild von Gold bei einer Bildgröße von  $100\text{nm} \times 100\text{nm}$  im forward Scan mit vier verschiedenen I-Gain Werten

In Abbildung 5 sind die Strombilder bei vier verschiedenen I-Gain Einstellungen zu sehen. Eine zu niedrige Einstellung des I-Gain ist daran zu erkennen, dass die Topografie des Goldes stark im Strombild zu sehen ist, wie man in Abbildung 5(a) erkennen kann. Der I-Gain ist zu hoch eingestellt, wenn man die Überschwüfung der Spitze im Strombild durch helle Punkte und wellenartige Muster sehen kann. Dies ist deutlich in Abbildung 5(d) zu erkennen. Eine gute Einstellung wurde bei einem I-Gain von 3500 gefunden (Abbildung 5(b)), da hier die Topografie gegenüber Abbildung 5(a) stark reduziert ist und die Überschwüfung, im Gegensatz zu Abbildung 5(c), noch nicht zu sehen ist.

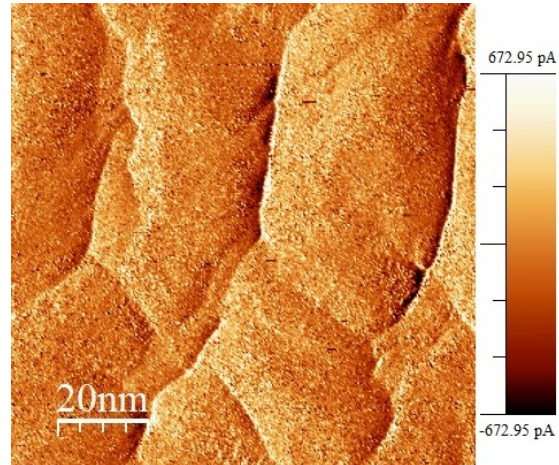
Zur weiteren Verbesserung der Bildqualität wird als nächstes die Rasterzeit des RTMs variiert. Die dafür gewählten Einstellungen sind der Tabelle II zu entnehmen.

Tabelle II. Einstellungen des RTMs für die Aufnahmen des Goldes bei vier verschiedenen Rasterzeiten

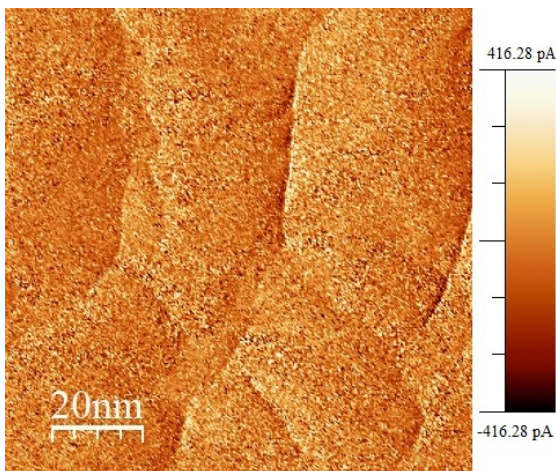
<i>Bildgröße</i>	<i>Rasterzeit</i>	<i>Tunnelstrom</i>	<i>P-Gain</i>	<i>I-Gain</i>	<i>Spannung</i>
nm	s	nA			V
100	0.1	1	1000	3500	1
100	0.3	1	1000	3500	1
100	1	1	1000	3500	1
100	1.2	1	1000	3500	1



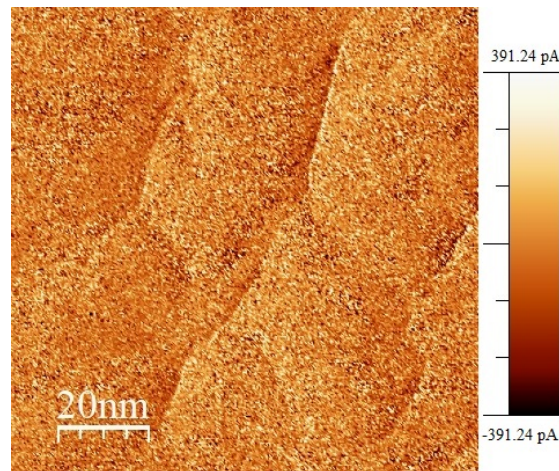
(a) Rasterzeit: 100ms



(b) Rasterzeit: 300ms



(c) Rasterzeit: 1s



(d) Rasterzeit: 1.2s

Abbildung 6. Strombild von Gold bei einer Bildgröße von  $100\text{nm} \times 100\text{nm}$  im forward Scan mit vier verschiedenen Rasterzeiten

In Abbildung 6 sind die Strombilder bei vier verschiedenen Rasterzeiten zu sehen. Abbildung 6(a) zeigt eine zu niedrige Rasterzeit. Die Topografie der Probe ist deutlich im Strombild zu erkennen. Vergleicht man Abbildung 6(b) mit Abbildung 6(c), wird deutlich, dass die Topografie bei einer Rasterzeit von 1s signifikant gegenüber der von 300ms reduziert ist. In Abbildung 6(d) nimmt die Bildqualität gegenüber Abbildung 6(c) ab, während die Topografie ungefähr gleich stark abgebildet wird. Dies lässt sich möglicherweise durch Störeffekte des Piezokristalls erklären. Somit wird die beste Einstellung für eine Rasterzeit von 1s und für einen I-Gain von 3500 gefunden.



## IV. HOCHORIENTIERTER PYROLYTISCHER GRAPHIT

### A. Durchführung

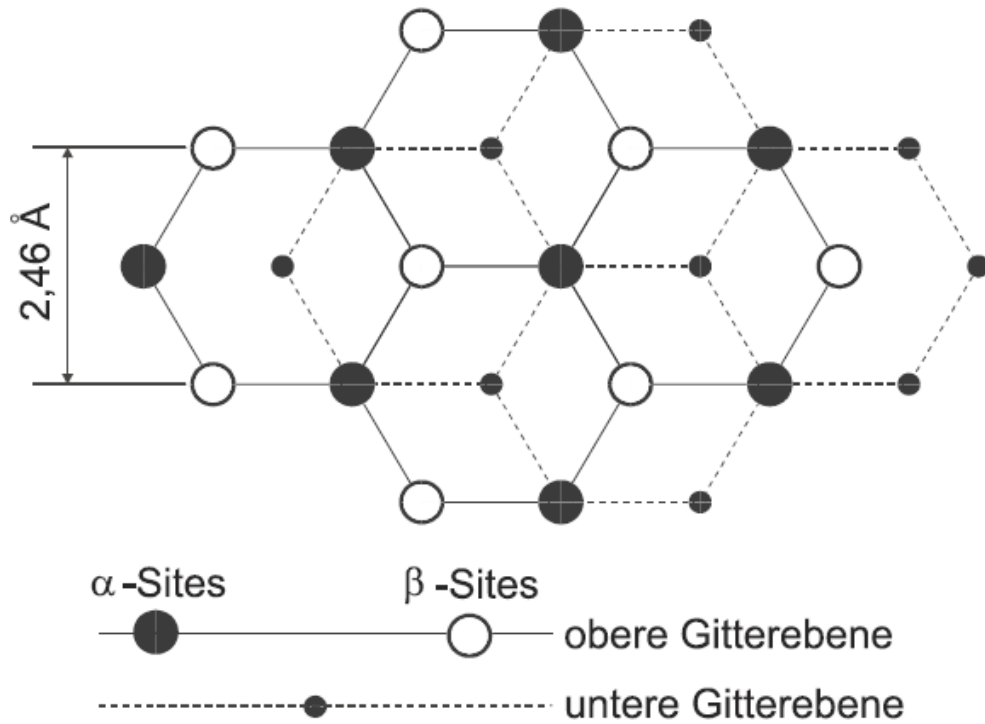


Abbildung 7. Struktur von HOPG, Ansicht v.o.

Hochorientiertes pyrolytisches Graphit (HOPG) ist aus übereinander liegenden Schichten aufgebaut, die eine hexagonale Kristallstruktur mit einer Kantenlänge von  $1.42 \text{ \AA}$  aufweisen. Die hexagonalen Schichten sind gegeneinander verschoben, sodass sich in Ansicht von oben die in Abbildung 7 dargestellte Struktur ergibt. Durch diese Verschiebung der Schichten gegeneinander kommt es dazu, dass nur unter jedem zweiten Atom des Gitters ein Atom der darunter liegenden Schicht liegt. Bei diesen Atomen ( $\alpha$ -sites) ist die Zustandsdichte der Elektronen höher und es fließt ein größerer Tunnelstrom. Dies hat zur Folge, dass man auf den Aufnahmen der atomaren Struktur mit dem Rastertunnelmikroskop nur die  $\alpha$ -sites deutlich sehen kann, die ebenfalls eine hexagonale Struktur mit einer Kantenlänge von  $2.46 \text{ \AA}$

bilden.

Die Schichten werden von schwachen Van-der-Waals-Kräften zusammen gehalten und lassen sich deswegen leicht abspalten. Aus diesem Grund sollte die am Rastertunnelmikroskop angelegte Spannung im mV-Bereich liegen, da bei höheren Spannungen die Spitze eine der Graphitschichten abspalten und anziehen könnte und diese somit verunreinigt werden würde.

In diesem Versuch soll eine Stufenkante sowie die atomare Struktur des Graphits untersucht werden. Deshalb wird zunächst mit dem Rastertunnelmikroskop eine Stufenkante in der Graphitprobe gesucht und es werden drei Bilder verschiedener Größe aufgenommen.

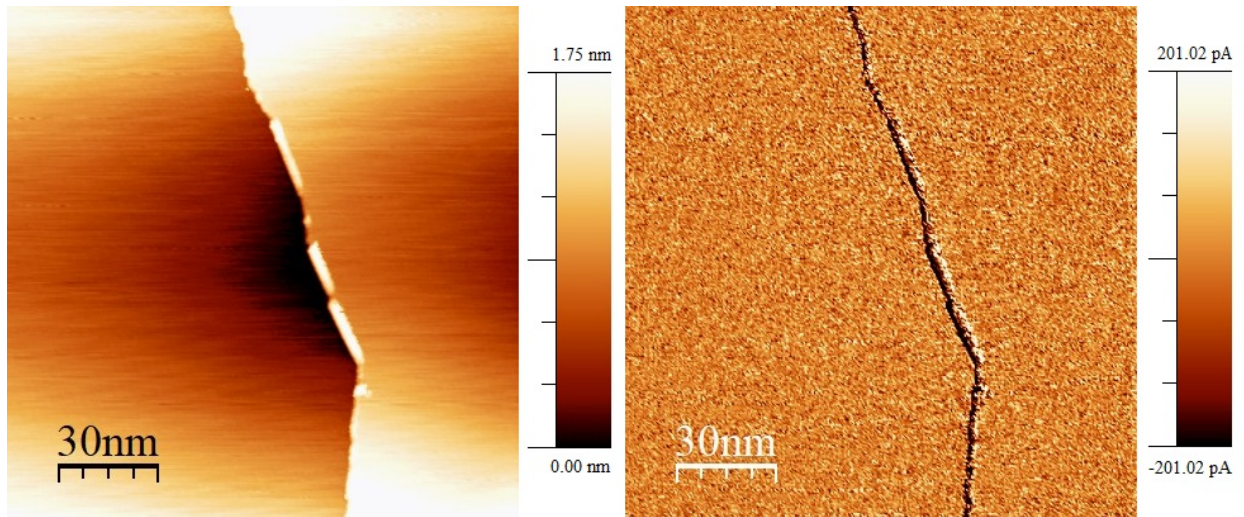


Abbildung 8. HOPG Stufenkante bei einer Bildgröße von  $150\text{nm} \times 150\text{nm}$ . l.: Topografiebild, r.: Strombild

Tabelle III. Einstellungen des RTMs für die Aufnahmen der Kante

<i>Bildgröße</i>	<i>Rasterzeit</i>	<i>Tunnelstrom</i>	<i>P-Gain</i>	<i>I-Gain</i>	<i>Spannung</i>
nm	ms	nA			mV
200	400	1	1000	3500	400
150	400	1	1000	3500	400
100	400	1	1000	3500	400

Für die Untersuchung der atomaren Struktur von HOPG wird auf eines der Plateaus heran-

gezoomt und ebenfalls drei Bilder verschiedener Größe aufgenommen. Leider wurde während der Durchführung die Spitze des RTMs zerstört und die Zeit reichte nicht mehr aus, um eine neue gute Spitze anzufertigen. Deshalb werden im Folgenden Musterbilder für die Aufnahmen im atomaren Bereich genutzt.

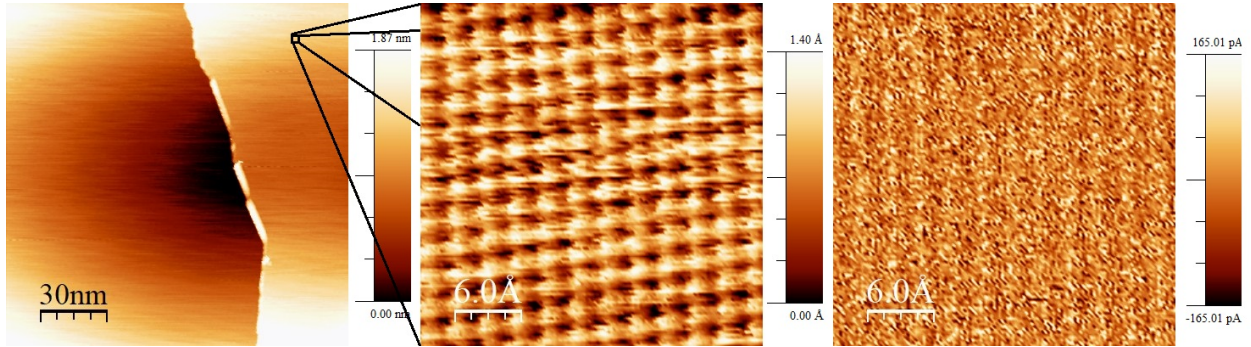


Abbildung 9. 1.: Topografie der Stufenkante bei einer Bildgröße von  $150\text{nm} \times 150\text{nm}$ , m.: Topografiebild eines Plateaus bei einer Bildgröße von  $3\text{nm} \times 3\text{nm}$ , r.: zugehöriges Strombild

Tabelle IV. Einstellungen des RTMs für die Aufnahmen im atomaren Bereich

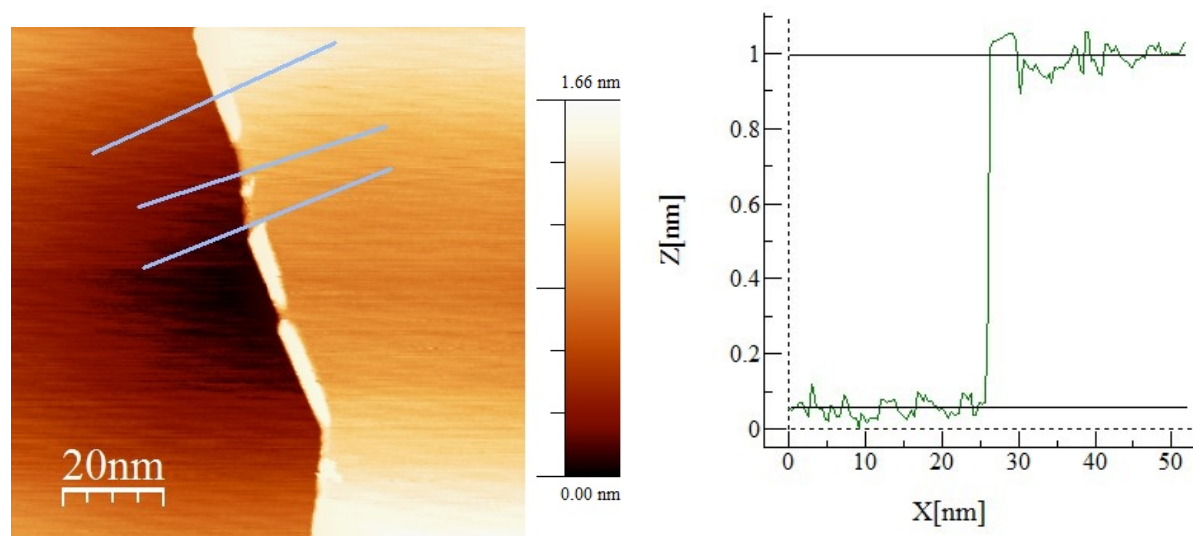
<i>Bildgröße</i>	<i>Rasterzeit</i>	<i>Tunnelstrom</i>	<i>P-Gain</i>	<i>I-Gain</i>	<i>Spannung</i>
nm	ms	nA			mV
3	100	2	1000	2000	50.1
4.49	100	2	1000	2000	50.1
8.98	200	2	1000	2000	50.1

## B. Auswertung

### 1. Vermessung einer Graphitkante

Ziel dieses Versuchsteils ist es, eine Graphitkante zu vermessen. Dazu werden die aufgenommenen Bilder zuallererst mit der *local plane* Funktion in WSxM bearbeitet um eine gute Kantenvermessung zu ermöglichen. Anschließend wird in jedem Bild an drei Stellen die Kante vermessen. Aus dem zugehörigen Kantenprofil lassen sich jeweils die Kantenhöhen ablesen.

Die so erhaltenen Werte finden sich in untenstehender Tabelle.



(a)Topographiebild der zu vermessenden Graphitkan- (b)Erste Profillinie v.o. der zu vermessenden Kante  
te

Abbildung 10. Vermessung der Kantenhöhe bei einer Bildgröße von  $100\text{nm} \times 100\text{nm}$

Tabelle V. Daten zur Vermessung der Kantenhöhen (Nummerierung der Profillinien im Bild von o. nach u.)

<i>Bildgröße Profilnr. Min. Max. Kantenhöhe</i>				
nm		nm	nm	nm
100	1	0.06	0.99	0.93
100	2	0.06	0.88	0.82
100	3	0.06	0.87	0.81
150	1	0.08	1.14	1.06
150	2	0.02	0.94	0.92
150	3	0.05	1.04	0.99
200	1	0.07	0.98	0.91
200	2	0.06	0.94	0.88
200	3	0.03	0.85	0.82

Für die abgelesenen Kantenhöhen werden nun Mittelwert und Standardabweichung bestimmt, so dass jeder Aufnahme (100nm, 150nm, 200nm) ein Wert für die Kantenhöhe zugeordnet werden kann.

Die Berechnung von Mittelwert und Standardabweichung erfolgt über die Formeln:

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^N x_i \quad (\text{IV.1})$$

$$\sigma = \frac{1}{N} \sqrt{\sum_{i=0}^N (x_i - \bar{x})^2} \quad (\text{IV.2})$$

Es ergeben sich folgende Kantenhöhen mit Fehler:

Tabelle VI. Ermittelte Kantenhöhen mit Fehler

<i>Bildgröße</i>	<i>Mittelwert</i>	<i>Standardabweichung</i>
nm	nm	nm
100.00	0.85	0.05
150.00	0.99	0.06
200.00	0.87	0.04

Der Abstand zweier Atomlagen in Graphit ist bekannt und beträgt  $0.335\text{nm}$ . Somit lässt sich die Anzahl Atomlagen bestimmen, die an unserer gemessenen Kante vorliegen.

Tabelle VII. Bestimmung der Kantenhöhe in Atomlagen

<i>Bildgröße</i>	<i>Gemessene Höhe/Literaturwert</i>	<i>Anzahl Atomlagen</i>
nm	nm	
100	2.54	3
150	2.96	3
200	2.60	3



Da nur ganze Anzahlen von Atomlagen Sinn ergeben, wurde gerundet. Die vermessene Graphitkante hat also eine Höhe von 3 Atomlagen.

Die nicht ganzzahligen Werte lassen sich möglicherweise durch nicht ideale Einstellungen des RTMs erklären.

## 2. Bestimmung der Atomabstände und der Kalibrierung

Zunächst wird der Atomabstand der Graphit  $\alpha$ -sites direkt ausgemessen. Dazu wird mit der *profile* Funktion von WSxM die Länge verschiedener Strecken entlang der  $\alpha$ -sites gemessen und durch die Anzahl der Atomabstände entlang dieser Strecke geteilt.

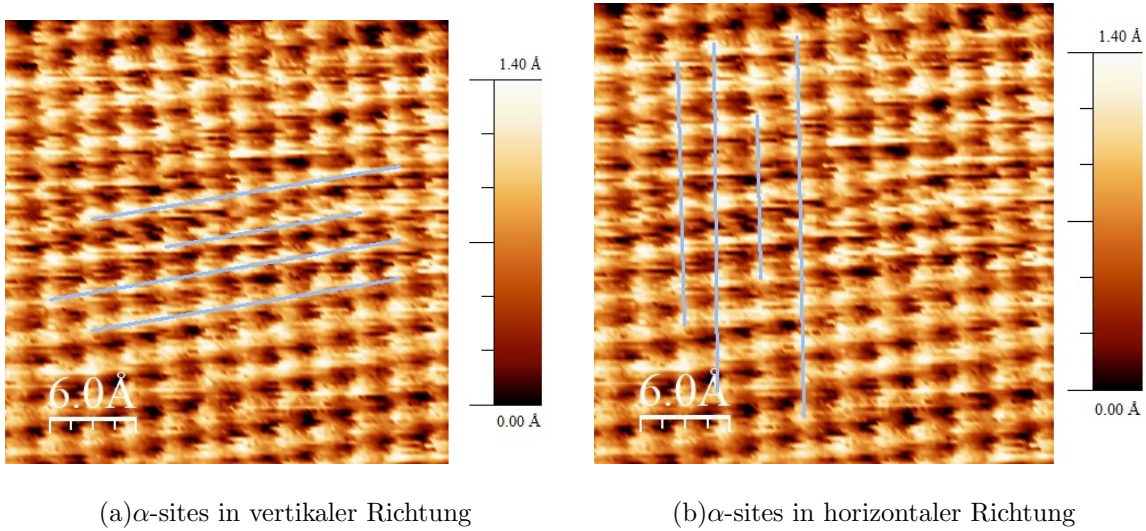


Abbildung 11. Direkte Messung der Atomabstände bei Graphit mit Bildgröße  $3\text{nm} \times 3\text{nm}$

In Abbildung 11 sind vier Strecken in horizontaler ( $h$ ) wie vertikaler ( $v$ ) Richtung eingezeichnet. Die zugehörigen Werte sind in Tabelle VIII aufgelistet. Die Gitterkonstante lässt sich wie folgt errechnen:

$$g_{h/v} = \frac{Länge_{h/v}}{\#Zwischenräume_{h/v}}$$

Tabelle VIII. Werte zur direkten Messung der Atomabstände in einem Bild der Größe  $3\text{nm} \times 3\text{nm}$

$L\ddot{a}nge_h$	$\#Zwischenr\ddot{a}ume_h$	$g_h$	$L\ddot{a}nge_v$	$\#Zwischenr\ddot{a}ume_v$	$g_v$
nm		Å	nm		Å
2.09	8	2.61	1.71	7	2.44
2.38	9	2.64	2.25	9	2.50
1.33	5	2.66	1.05	4	2.63
2.09	8	2.61	2.46	10	2.46

Aus den Gitterkonstanten der horizontalen und vertikalen Ausrichtung lässt sich ein Mittelwert mit Standardabweichung bilden. Man erhält:

$$g_h = 2.63 \pm 0.02\text{Å}$$

$$g_v = 2.51 \pm 0.07\text{Å}$$

Die Ergebnisse zeigen, dass die Gitterkonstante in der richtigen Größenordnung liegt, allerdings zeigt sich bei dem horizontalen Anteil, dass die Fehler zu klein sind, um die Abweichung vom Literaturwert ( $g = 2.46\text{Å}$ ) zu rechtfertigen. Dies zeigt, dass eine Kalibrierung nötig ist. Um diese zu berechnen macht man sich die Eigenschaften der hexagonalen Struktur zu Nutze. Zieht man ein Dreieck entlang der  $\alpha$ -sites, bildet dieses immer einen Winkel von  $\phi = 60^\circ$  oder  $\phi = 120^\circ$ , wie in Abbildung 12 veranschaulicht.

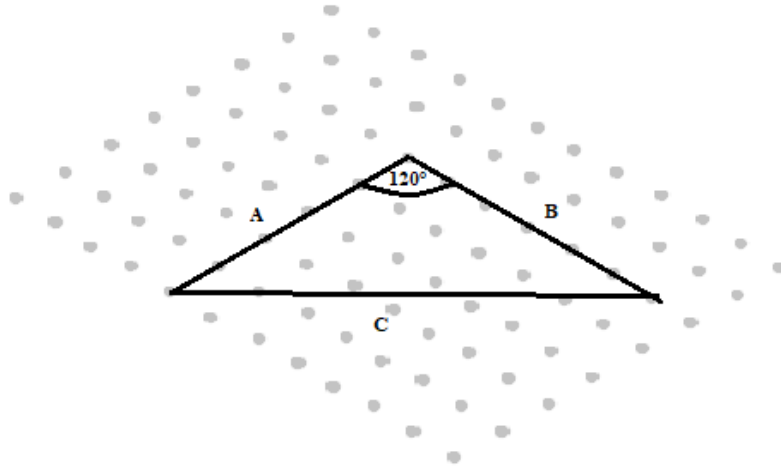


Abbildung 12. Anwendung des Kosinussatzes bei hexagonaler Gitterstruktur

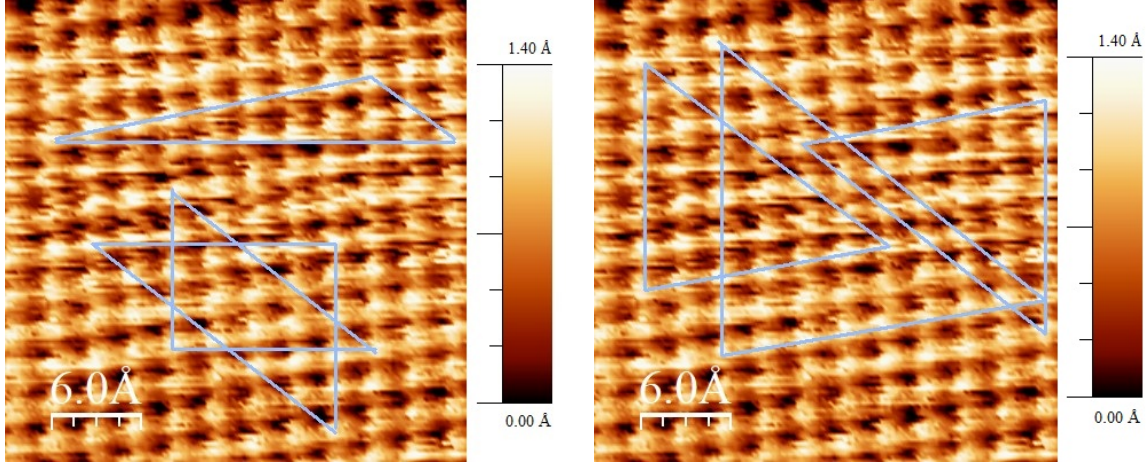
Mit Hilfe des Kosinussatzes lässt sich die Strecke  $C$  berechnen:

$$C^2 = A^2 + B^2 - AB \cos \phi$$

Zählt man ab wie viele Atomabstände die Strecken  $A$  und  $B$  beinhalten, kann man  $C$  ebenfalls in Atomabständen angeben. Dies ist dann die Anzahl an Atomabständen, die  $C$  tatsächlich beinhalten sollte. Mit der *profile* Funktion von WSxM lässt sich die Strecke  $C$  ausmessen und man erhält die Größe  $C^{\text{gemessen}}$ . Aus der gemessenen Strecke und der tatsächlichen Strecke in Atomabständen lässt sich dann ein Kalibrierungsfaktor errechnen.

$$K_{x/y} = \frac{C_{x/y}^{\text{gemessen}}}{C_{x/y} \cdot 2.46 \text{Å}}$$

Um die Kalibrierungsfaktoren in x- und y-Richtung möglichst unkorreliert angeben zu können, muss die Strecke  $C$  der Dreiecke parallel zur x- bzw y-Achse sein. In Abbildung 13 sind drei Beispiele für Dreiecke zur Kalibrierung der x- und y-Richtung dargestellt.



(a) Dreiecke zur x-Kalibrierung

(b) Dreiecke zur y-Kalibrierung

Abbildung 13. Messung der x- und y-Kalibrierung mit Hilfe des Kosinussatzes

Insgesamt werden in Bildern drei verschiedener Größe jeweils drei Dreiecke für die x- und y-Richtung verwendet, sodass man für die Kalibrierungsfaktoren neun Werte erhält.

Tabelle IX. Auswertung der Dreiecke in den Aufnahmen der atomaren Gitterstruktur drei verschiedener Größen

<i>Bildgröße</i>	<i>Dreieck</i>	$C_x^{gemessen}$	$\phi_x$	$A_x$	$B_x$	$K_x$	$C_y^{gemessen}$	$\phi_y$	$A_y$	$B_y$	$K_y$
nm		nm	°				nm	°			
3	1	2.58	120	8	2	1.20	1.50	60	6	6	0.83
3	2	1.31	60	4	5	0.96	1.99	60	8	8	0.83
3	3	1.57	60	5	6	0.94	1.45	60	6	6	0.80
4.49	1	3.93	120	12	3	1.22	2.84	60	12	10	0.85
4.49	2	2.84	60	9	11	0.94	3.30	120	2	12	1.06
4.49	3	2.81	60	11	2	1.07	1.44	60	5	6	0.86
8.98	1	4.14	60	13	16	0.94	3.23	60	12	14	0.82
8.98	2	4.21	60	13	16	0.96	3.65	120	2	13	1.09
8.98	3	6.67	120	21	5	1.19	3.09	60	13	11	0.85

Aus den neun Kalibrierungsfaktoren lässt sich ein Mittelwert mit Fehler bilden und man erhält als Ergebnis für die x- und y-Kalibrierung:

$$K_x = 1.07 \pm 0.12$$

$$K_y = 0.92 \pm 0.14$$

## V. FAZIT

Während der Messungen mit dem Rastertunnelmikroskop haben wir viel über die Funktionsweise erfahren. Wir haben getestet, wie verschiedene Parametereinstellungen die Qualität der Bilder beeinträchtigt und erste Erfahrungen mit dem Umgang der Hardware und Software gesammelt. Die aufgenommenen Bilder zeigen deutlich den Einfluss der verschiedenen Parameter. Auch die Vermessung einer Graphitkante ist gut gelungen. Die Messungen zur atomaren Auflösung konnten leider nicht von uns selbst durchgeführt werden, die Auswertung lieferte aber gute Ergebnisse zu den Atomabständen des Graphits.