

# FK03: Rastertunnelmikroskop

Jonas Colve, Matrikelnr. 377593  
Anna Stollenwerk, Matrikelnr. 381103  
Gruppe 43

11.03.2020

# Inhaltsverzeichnis

<b>1 Das Rastertunnelmikroskop</b>	<b>3</b>
<b>2 Untersuchung von Gold</b>	<b>3</b>
2.1 Anpassung des I-Gains . . . . .	3
2.1.1 Versatz von markanten Stellen . . . . .	5
2.1.2 Vergleich der Steigung . . . . .	6
2.1.3 Untersuchung der Rauigkeit . . . . .	6
2.1.4 Fazit . . . . .	7
2.2 Variation der Rasterzeit . . . . .	7
2.3 Fazit . . . . .	9
<b>3 Untersuchung von HOPG</b>	<b>9</b>
3.1 Ebenenabstand . . . . .	9
3.2 X-Y-Kalibrierung . . . . .	11
<b>4 Quellen</b>	<b>15</b>
<b>5 Anhang</b>	<b>15</b>
5.1 Gold . . . . .	15
5.1.1 Steigungsmessung . . . . .	15
5.2 HOPG . . . . .	17
5.2.1 Kalibrierung . . . . .	17

# 1 Das Rastertunnelmikroskop

Das Rastertunnelmikroskop nutzt den Tunnelstrom von Elektronen an einer Potentialbarriere, um Strukturen in der Größenordnung von wenigen Nanometern aufzulösen. Dieser Tunnelstrom ist abhängig von der angelegten Tunnelspannung, dem Abstand der Spitze zur Probe und der Austrittsarbeit der Elektronen in der Probe und der Spitze.

$$I \propto U \cdot e^{-\kappa d}$$

wobei  $I$  der Tunnelstrom,  $U$  die Tunnelspannung,  $d$  der Abstand zwischen Spitze und Probe, und  $\kappa$  von der Austrittsarbeit abhängt.

Der Abstand zwischen der Messspitze und der Probe wird mit Hilfe eines PI-Reglers reguliert, der durch ein P-Gain und ein I-Gain charakterisiert wird. Der P-Gain ist der Proportionalitätsteil und der I-Gain der Integralteil des Reglers.

Es gibt zwei Messmodi, den Konstant-Höhen-Modus und den Konstant-Strom-Modus, zwischen denen über den I-Gain gewechselt werden kann.

## 2 Untersuchung von Gold

Tab. 1: Einstellungen des RTM für die I-Gain Anpassung

Bildgröße	200 nm
Rasterzeit	200 ms
Pixel pro Zeile	128
P-Gain	1000
Tunnelstrom	1 nA
Tunnelspannung	1 V

In diesem Versuchsteil sollen anhand einer Goldprobe die Auswirkungen von I-Gain und Rasterzeit auf die Scans untersucht werden. Außerdem soll ein möglichst optimaler I-Gain ermittelt werden, indem die Position charakteristischer Strukturen in der Hin- und Rückrichtung, die Steigung an Inseln oder Kanten im Höhenbild und Mittelwert und Standardabweichung des Strombildes verglichen werden.

### 2.1 Anpassung des I-Gains

Um den I-Gain in diesem Versuchsteil anzupassen, wurden vier Scans mit den Rastereinstellungen in Tab.(1) durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Abb.(1) bis Abb.(4) zu sehen. Gezeigt ist die Rückwärtsrichtung der Scans und das zugehörige Strombild, da ab einem I-Gain von 2000 kein signifikanter Unterschied mehr im Höhenbild zu erkennen ist. Im Strombild ist bei den niedrigeren I-Gains noch stark die Topographie der Probe zu erkennen, was auf einen zu geringen Wert dessen hindeutet. Dies war während der Durchführung allerdings nicht für uns ersichtlich, weshalb 4000 als Beispiel für einen zu hohen I-Gain eingestellt wurde. Im Laufe der Auswertung stellt sich jedoch heraus, dass 4000 ein besserer Wert ist als 2500, welcher von uns als guter I-Gain angenommen wurde.

Um eine quantitative Bewertung der verschiedenen I-Gain Werte vorzunehmen, werden

1. die Positionen markanter Stellen in Vor- und Rückrichtung verglichen.
2. die Steigungen einer Kante mit verschiedenen I-Gains untersucht.
3. die Rauigkeiten der Scans betrachtet.

Diese Auswertungsschritte werden allerdings nicht für den 800er Scan vorgenommen, da dort im Höhenbild keine markanten Stellen sichtbar sind und die Steigung einer Kante auch nicht sinnvoll ist. Allerdings kann trotzdem die Rauigkeit verglichen werden.

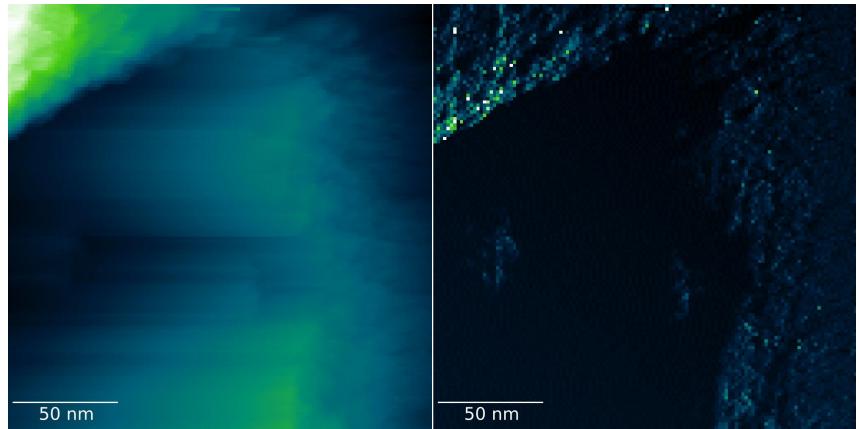


Abb. 1: Rückwärtsrichtung bei I-Gain = 800

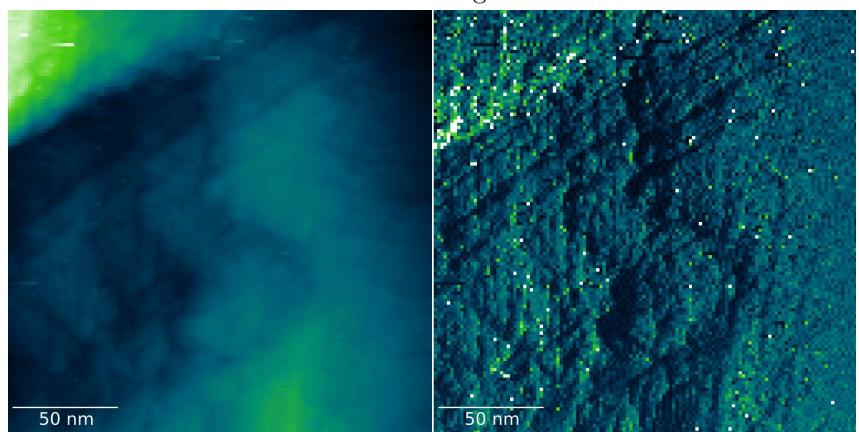


Abb. 2: Rückwärtsrichtung bei I-Gain = 2000

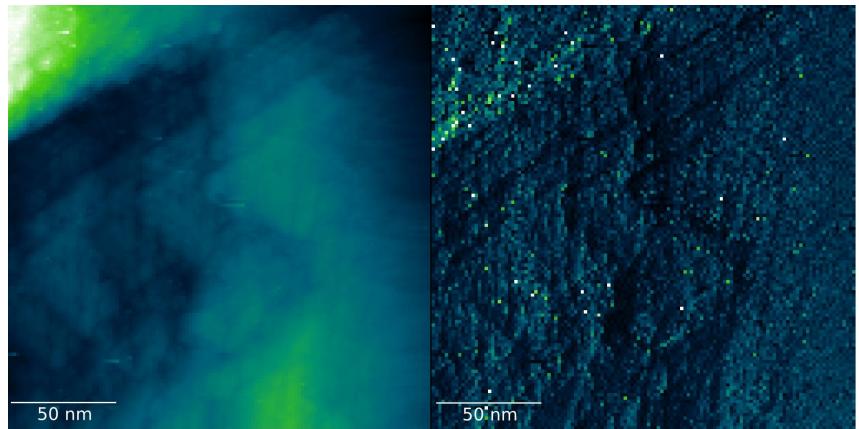


Abb. 3: Rückwärtsrichtung bei I-Gain = 2500

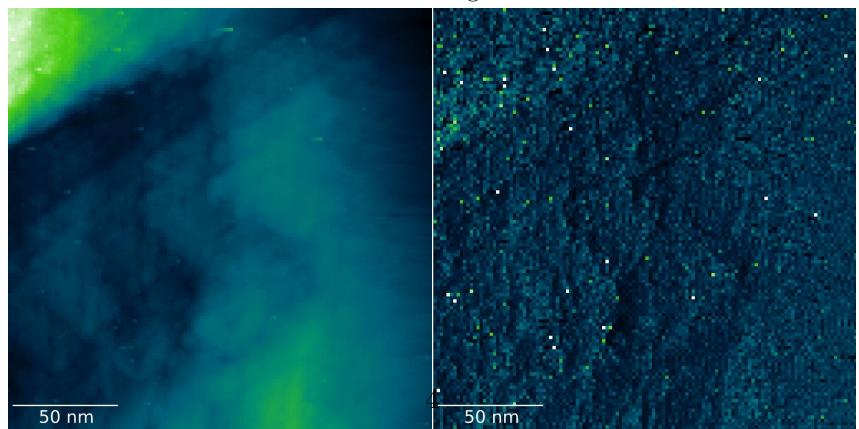


Abb. 4: Rückwärtsrichtung bei I-Gain = 4000

### 2.1.1 Versatz von markanten Stellen

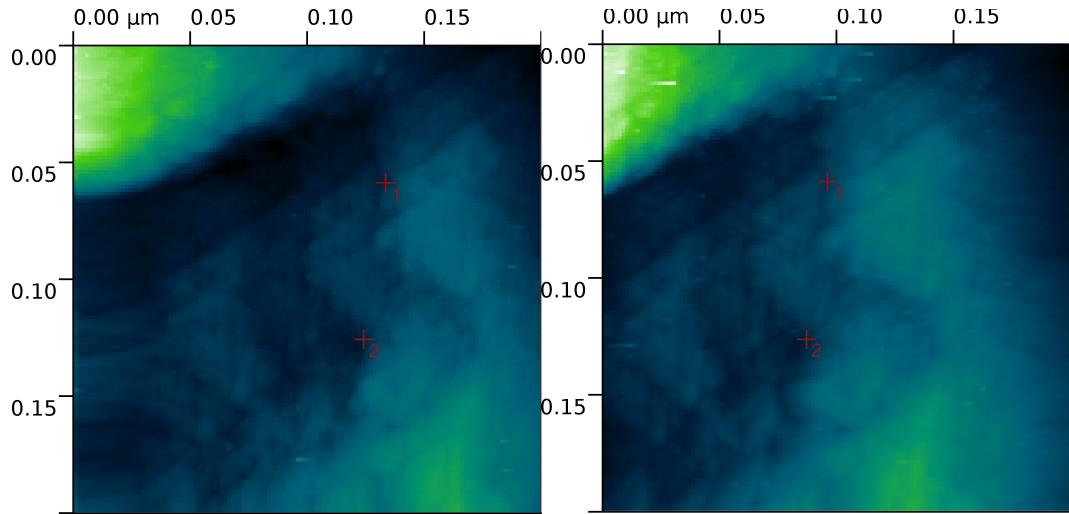


Abb. 5: Markierungen, an denen der Versatz gemessen wird, hier bei I-Gain = 2000 (links Vorwärts, rechts Rückwärts)

Bei einem perfekten I-Gain sollten in Vor- und Rückrichtung des Scans alle Punkte der Probe die Selbe Position haben. Da dies in der Realität nicht möglich ist, sollte der Versatz zwischen den Positionen jedoch möglichst gering sein. Er kann verringert werden, indem man einen höheren I-Gain einstellt.

Hier wurden die Punkte verwendet, die in Abb.(5) markiert wurden. Dieselben Punkte wurden auch für die I-Gains von 2500 und 4000 markiert. Die Ergebnisse sind für Punkt 1

I-Gain	x-Wert Rückwärts [nm]	x-Wert Vorwärts [nm]	y-Wert [nm]	$\Delta x$ [nm]
2000	$96 \pm 1.56/\sqrt{12}$	$134 \pm 1.56/\sqrt{12}$	$59 \pm 1.56/\sqrt{12}$	$38 \pm 1.56/\sqrt{6}$
2500	$99 \pm 1.56/\sqrt{12}$	$134 \pm 1.56/\sqrt{12}$	$61 \pm 1.56/\sqrt{12}$	$35 \pm 1.56/\sqrt{6}$
4000	$99 \pm 1.56/\sqrt{12}$	$134 \pm 1.56/\sqrt{12}$	$59 \pm 1.56/\sqrt{12}$	$35 \pm 1.56/\sqrt{6}$

und Punkt 2

I-Gain	x-Wert Rückwärts [nm]	x-Wert Vorwärts [nm]	y-Wert [nm]	$\Delta x$ [nm]
2000	$88 \pm 1.56/\sqrt{12}$	$124 \pm 1.56/\sqrt{12}$	$126 \pm 1.56/\sqrt{12}$	$36 \pm 1.56/\sqrt{6}$
2500	$90 \pm 1.56/\sqrt{12}$	$124 \pm 1.56/\sqrt{12}$	$126 \pm 1.56/\sqrt{12}$	$34 \pm 1.56/\sqrt{6}$
4000	$90 \pm 1.56/\sqrt{12}$	$124 \pm 1.56/\sqrt{12}$	$126 \pm 1.56/\sqrt{12}$	$34 \pm 1.56/\sqrt{6}$

Die Fehler röhren hier daher, dass ein Pixel im Bild ca. 1.56nm entspricht, da es 200nm lang ist und 128 Punkte auf 128 Reihen aufgenommen wurden. Für den Versatzfehler wurden diese quadratisch addiert.

Der Versatz nimmt also tatsächlich für steigende I-Werte ab, sodass 2500 und 4000 als I-Gain geeigneter scheinen. Allerdings kann nicht entschieden werden, welcher der beiden Werte besser ist, da sie die selbe Verschiebung haben.

### 2.1.2 Vergleich der Steigung

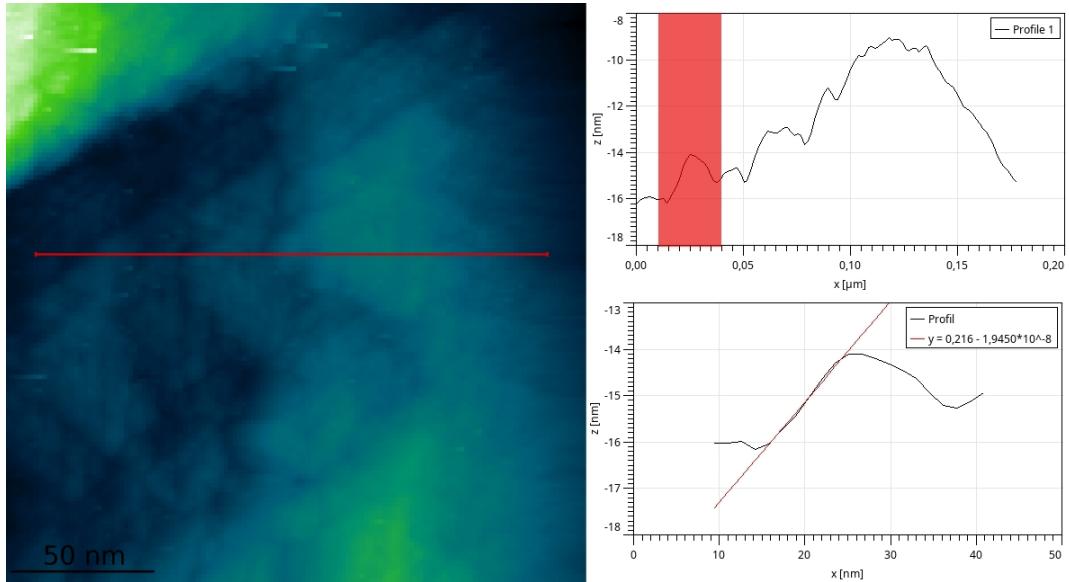


Abb. 6: Markierung an der das Profil erstellt wird und das , hier bei I-Gain = 2000

Um die Steigung einer Kante bei verschiedenen I-Gains zu vergleichen, wird das Profil an der in Abb.(6) zu sehenden roten Linie analysiert. Die Profillinien der anderen I-Werte sind im Anhang zu sehen (Abb(19), Abb.(20)). An den rot markierten Peak wird nun jeweils eine Grade gefittet. So ergeben sich für die verschiedenen I-Gain Werte

I-Gain	Steigung	Achsenabschnitt [nm]
2000	$0.216 \pm 0.008$	$-19.452 \pm 0.156$
2500	$0.242 \pm 0.011$	$-20.671 \pm 0.242$
4000	$0.650 \pm 0.036$	$-26.359 \pm 0.621$

wobei die Fehler aus der Gradenanpassung von Gwyddion resultieren.  
Die Steigung nimmt also mit steigendem I-Wert wie erwartet zu, sodass bei einem I-Gain von 4000 Kanten genauer abgebildet werden als bei 2500 und 2000.

### 2.1.3 Untersuchung der Rauigkeit

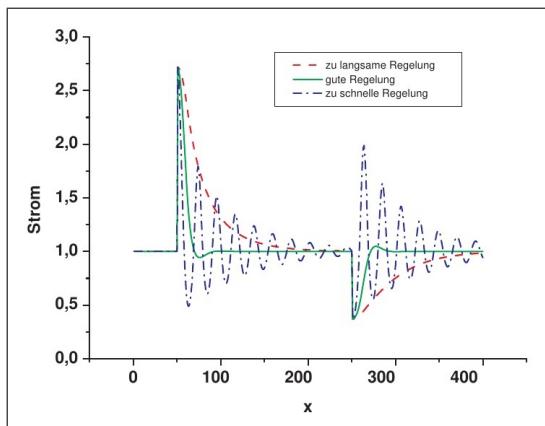


Abb. 7: Stromverlauf bei einem Plateau

Als letzte Analysemethode wird nun mit Hilfe von Gwyddion die Rauigkeit der Probe untersucht, indem die Standardabweichung des Stromwerts über den gesamten Scanbereich berechnet wird. Diese sollte für einen optimalen I-Gain möglichst gering sein, da in diesem Fall nur scharfe Peaks in Strom zusehen sein sollten. Dies ist beispielhaft in Abb.(7) zu sehen, wobei der rote Verlauf einem zu niedrigen, der Blaue einem zu hohen und der Grüne einem optimalen I-Gain entspricht. Zudem sollte der Mittelwert des Stroms in Vor- und Rückrichtung möglichst gleich sein. Aus einer möglichen Diskrepanz dieser, hier  $\Delta_\mu$ ,

kann man einen zu niedrigen I-Gain erkennen. Allerdings ist ein zu hoher Wert daraus nicht zu erkennen, da sich das Überschwingen des Stroms gegenseitig kompensiert und  $\Delta_\mu$  damit gegen einen konstanten Wert konvergiert. Für den hier gezeigten Probenausschnitt ergeben sich folgende Werte für den Mittelwert  $\mu$  und die Standardabweichung  $\sigma$ :

I-Gain	$\mu_{Vorwärts}$ [nA]	$\mu_{Rückwärts}$ [nA]	$\Delta_\mu$ [nA]	$\sigma_{Vorwärts}$ [pA]	$\sigma_{Rückwärts}$ [pA]
800	1.56	0.45	1.11	1438	1070
2000	1.26	0.75	0.51	746	683.9
2500	1.20	0.80	0.40	712.9	576.7
4000	1.13	0.88	0.23	521.3	506.3

Es ist also wieder ersichtlich, dass 4000 der beste I-Gain ist, da bei diesem Wert die Standardabweichung und  $\Delta_\mu$  am niedrigsten ist. Leider wurde kein Scan mit einem noch höheren I-Gain aufgenommen, an dem zu sehen ist, dass  $\Delta_\mu$  konvergiert, die Standardabweichung allerdings wieder zunimmt.

#### 2.1.4 Fazit

Insgesamt deuten alle oben genannten Analysemethoden darauf hin, dass ein I-Gain von 4000 am geeignetsten ist um den hier gewählten Probenausschnitt zu untersuchen. Allerdings wurde von uns leider fälschlicherweise der I-Gain von 2500 als am besten angesehen, weshalb auch die Untersuchung der Rasterzeit mit diesem Wert durchgeführt wird.

## 2.2 Variation der Rasterzeit

Tab. 2: Einstellungen für die Anpassung der Rasterzeit

Bildgröße	200 nm
Pixel pro Zeile	128
P-Gain	1000
I-Gain	2500
Tunnelstrom	1 nA
Tunnelspannung	1 V

In diesem Versuchsteil wird nun ein fester I-Gain von 2500 eingestellt, damit die Auswirkungen von verschiedenen Rasterzeiten auf den Scan untersucht werden können. Die Rasterzeit beschreibt dabei die Zeit, die für den Scan einer Zeile benötigt wird. Die anderen Einstellungen sind wie in Tab.(2) zu sehen identisch zum vorherigen Versuchsteil. Betrachtet werden dafür die Höhen- und Strombilder mit Rasterzeiten von 100ms, 200ms, 500ms, 700ms und 1000ms, die in Abb.(1) und Abb.(8) bis Abb.(11) zu sehen sind. Da mit steigender Rasterzeit die Topologie im Strombild verschwindet, liefert

ein längerer Scan bessere Bilder. Zudem gibt es weniger Fehlerstellen durch Überreglung, welche in Abb.(8) als weiße Streifen sehr gut zu sehen sind. Diese sind ein Zeichen eines zu hohen I-Gain, welcher im vorherigen Versuchsteil nicht aufgenommen wurde.

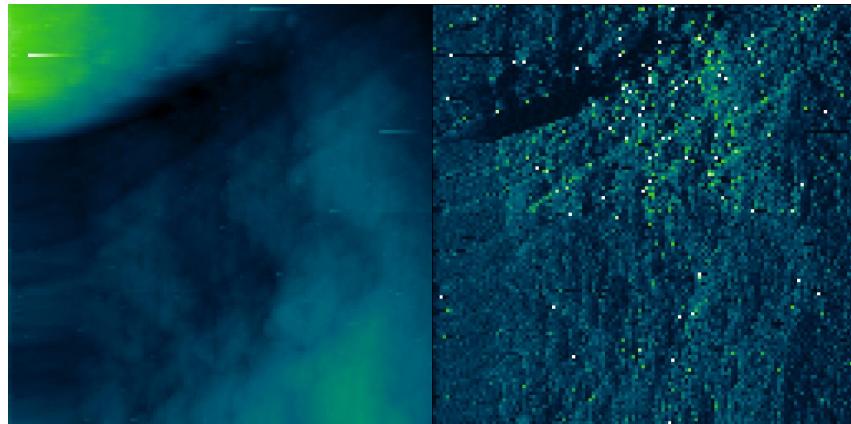


Abb. 8: Vorwärtsrichtung bei einer Rasterzeit von 100ms

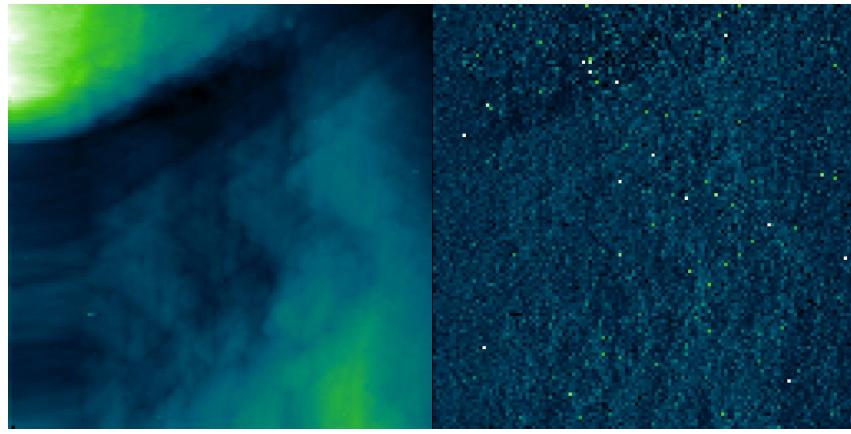


Abb. 9: Vorwärtsrichtung bei einer Rasterzeit von 500ms

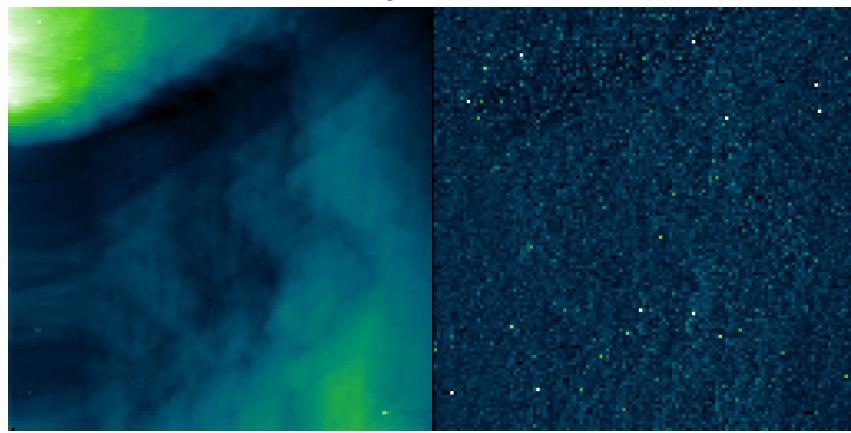


Abb. 10: Vorwärtsrichtung bei einer Rasterzeit von 700ms

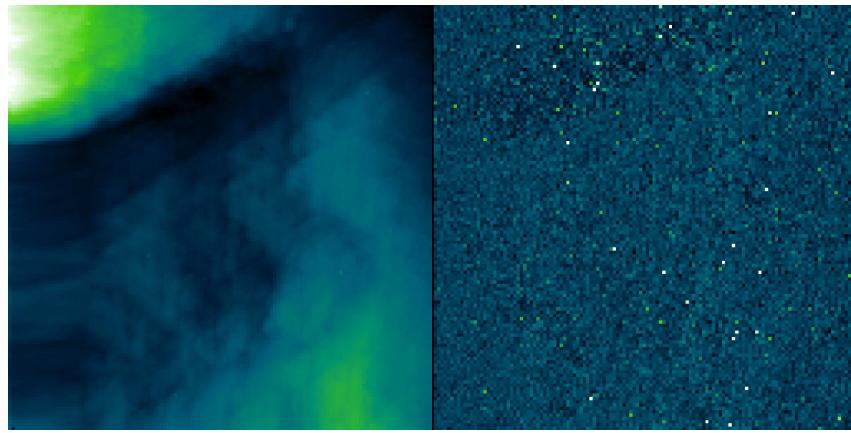


Abb. 11: Vorwärtsrichtung bei einer Rasterzeit von 1000ms

Um auch die Rasterzeit quantitativ zu untersuchen, wird die Standardabweichung und der Mittelwert des Stroms bei verschiedenen Zeiten und der Versatz markanter Stellen betrachtet. Für erstere berechnet Gwyddion die folgenden Werte:

Rasterzeit [ms]	$\mu_{Vorwärts}$ [nA]	$\mu_{Rückwärts}$ [nA]	$\Delta_\mu$ [nA]	$\sigma_{Vorwärts}$ [pA]	$\sigma_{Rückwärts}$ [pA]
100	1.29	0.74	0.55	1008	938.8
200	1.20	0.80	0.40	712.9	576.7
500	1.08	0.92	0.29	410.1	363.1
700	1.06	0.94	0.12	372.8	369.9
1000	1.04	0.97	0.07	321.7	331.7

Demnach ist eine Rasterzeit von 1000ms am sinnvollsten, da hier der Unterschied zwischen den Mittelwerten und die Standardabweichung am geringsten ist. Wird der Ortsunterschied zwischen Vor- und Rückrichtung nach dem selben Schema wie oben untersucht, erhält man folgende Werte:

Rasterzeit [ms]	x-Wert Rückwärts [nm]	x-Wert Vorwärts [nm]	y-Wert [nm]	$\Delta x$ [nm]
100	$85 \pm 1.56/\sqrt{12}$	$123 \pm 1.56/\sqrt{12}$	$118 \pm 1.56/\sqrt{12}$	$38 \pm 1.56/\sqrt{6}$
200	$82 \pm 1.56/\sqrt{12}$	$118 \pm 1.56/\sqrt{12}$	$118 \pm 1.56/\sqrt{12}$	$36 \pm 1.56/\sqrt{6}$
500	$85 \pm 1.56/\sqrt{12}$	$120 \pm 1.56/\sqrt{12}$	$118 \pm 1.56/\sqrt{12}$	$35 \pm 1.56/\sqrt{6}$
700	$84 \pm 1.56/\sqrt{12}$	$118 \pm 1.56/\sqrt{12}$	$118 \pm 1.56/\sqrt{12}$	$34 \pm 1.56/\sqrt{6}$
1000	$85 \pm 1.56/\sqrt{12}$	$118 \pm 1.56/\sqrt{12}$	$118 \pm 1.56/\sqrt{12}$	$33 \pm 1.56/\sqrt{6}$

Auch dies spricht für die höchste Rasterzeit als die Optimalste.

## 2.3 Fazit

Die obrigen Versuchsteile zeigen, dass sowohl I-Gain, als auch die Rasterzeit einen sehr großen Einfluss auf die Qualität eines Scans haben und ein optimaler Wert für beide wichtig für weitere Messungen sind. Wie wir feststellen mussten, kann es für ungeübte Experimentatoren schwierig sein, beides passend zu wählen. So ist für den hier untersuchten Goldprobenausschnitt ein I-Gain von 4000 oder höher optimal und bei einem I-Gain von 2500 eine Rasterzeit von 1000 ms. Insgesamt fällt jedoch auf, dass eine Erhöhung der Rasterzeit die negativen Effekte eines falsch eingestellten I-Gains stark verringern kann. So dämpft ein langsamer Scan Überschwinger und verringert Höheninformationen im Strombild.

## 3 Untersuchung von HOPG

In diesem Versuchsteil wird nun die Goldprobe gegen eine aus HOPG (Hochorientierter polytischer Graphit) getauscht. HOPG hat schichtweise eine hexagonale Kristallstruktur, die nach dem Schema ABAB gegeneinander verschoben ist. Mit Hilfe des Rastertunnelmikroskops soll nun der Ebenenabstand zwischen den Kristalllagen gemessen werden. Außerdem soll die bekannte Gitterkonstante von HOPG genutzt werden, um die Längenmessung des RTMs bei verschiedenen Bildgrößen in x und y-Richtung zu kalibrieren.

### 3.1 Ebenenabstand

Tab. 3: Einstellungen für die Messung des Ebenenabstands

Rasterzeit	500 ms
Pixel pro Zeile	128
P-Gain	1000
I-Gain	2500
Tunnelstrom	200 pA
Tunnelspannung	500 mV

Um den Ebenenabstand zu bestimmen, muss zunächst eine geeignete Kante gefunden werden. Also wird ein Übersichtsbild über 300 nm aufgenommen. Die untersuchende Kante wird Mittig im Bild platziert und in den Bildgrößen 300 nm, 200 nm und 100 nm aufgenommen. Zur Bestimmung der Kantenhöhe werden über drei verschiedenen Strecken Höhenprofile orthogonal zur Kante erstellt. Diese lassen sich nun in drei Bereiche einteilen: die erste Ebene, die Kante und die zweite Ebene. Die beiden Ebenen können nun aus einem Höhenprofil mithilfe linearen Regressionen bestimmt werden.

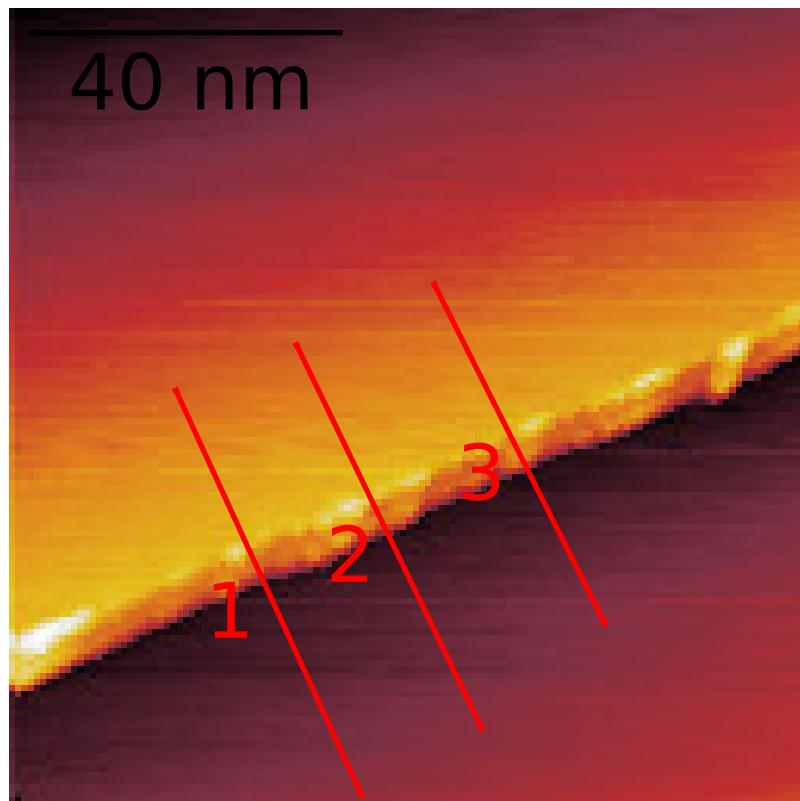
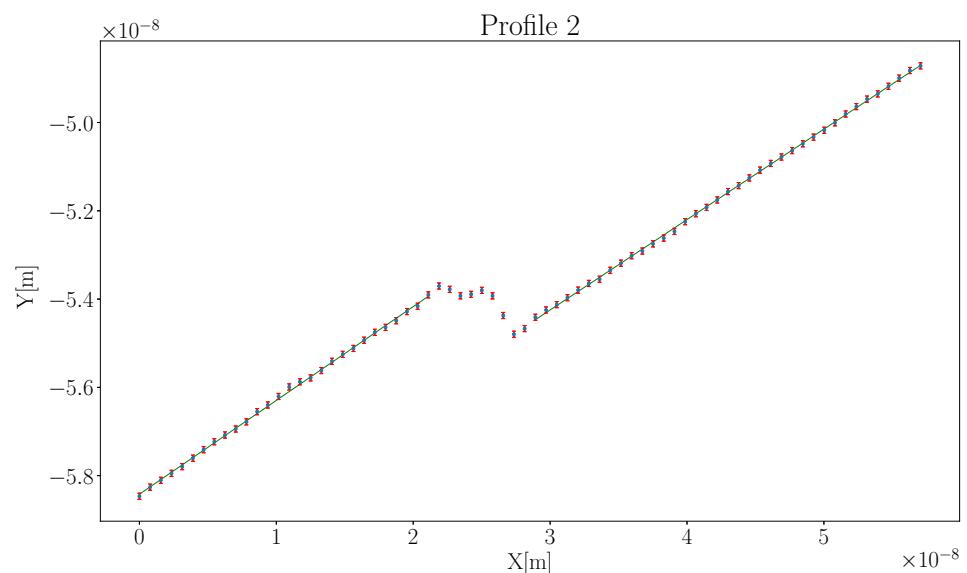


Abb. 12: Profillinien an einer Kante bei einer Bildgröße von 100nm



Um den Ebenenabstand zu bestimmen, benutzt man nun den Mittelwert der beiden Ebenensteigungen  $a_i$  und die Differenz der Ebenenoffsets  $b_i$ . Dafür nimmt man an, dass beide Graden die selbe Steigung haben und kann dann über Pythagoras deren Abstand ermitteln:

$$\Delta z = \sqrt{1 + \bar{a}^2 \Delta b}$$

mit den Fehlern:

$$\sigma_{\bar{a}} = \frac{\Delta a}{2}$$

$$\sigma_{\Delta b} = \sqrt{\sigma_{b_1}^2 + \sigma_{b_2}^2}$$

Tab. 4: Parameter Ebenen-fit von Höhenprofile (100nm)

Nr.	Seite $s$	$a_s$	$b_s/\text{nm}$	$\Delta z/\text{nm}$
1	$L$	$0.212 \pm 4 \cdot 10^{-7}$	$-57.5 \pm 1 \cdot 10^{-13}$	$2.15 \pm 0.07$
	$R$	$0.208 \pm 34 \cdot 10^{-7}$	$-59.6 \pm 40 \cdot 10^{-13}$	
2	$L$	$0.213 \pm 13 \cdot 10^{-7}$	$-58.4 \pm 2 \cdot 10^{-13}$	$2.01 \pm 0.03$
	$R$	$0.204 \pm 4 \cdot 10^{-7}$	$-60.4 \pm 8 \cdot 10^{-13}$	
3	$L$	$0.214 \pm 7 \cdot 10^{-7}$	$-60.4 \pm 1 \cdot 10^{-13}$	$2.10 \pm 0.04$
	$R$	$0.209 \pm 8 \cdot 10^{-7}$	$-62.4 \pm 12 \cdot 10^{-13}$	

Insgesamt ergeben sich über alle drei Bildgrößen neun Profile mit neun Ebenenabständen, mit Mittelwert  $\bar{\Delta z} = (2.057 \pm 0.117)\text{nm}$ , welcher nur  $0.40\sigma_{\Delta z}$  von  $6C = 6 \cdot 0.335\text{ nm} = 2.010\text{ nm}$  dem sechsfachen des Literaturwertes eines einzelnen Schichtabstands ist. Es scheint sich also bei der betrachteten Kante tatsächlich um eine Graphitstufenkante zu handeln und nicht etwa um einen Kratzer oder anderen Fehler der Probe. Dies wird noch zusätzlich dadurch gestützt, dass in manchen Profilen (wie der oben gezeigten Nr.2 bei 100 nm) eine klare Zwischenstufe bei 2/3 der Höhe zu erkennen ist, die sechsfach Kante somit aus einer zweifachen und einer vierfachen Kante zusammengesetzt ist.

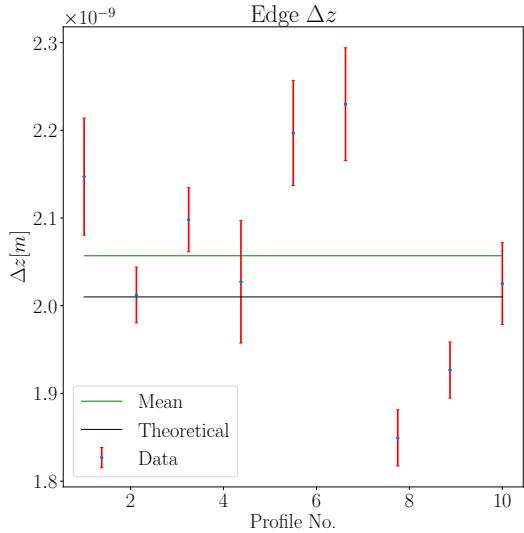


Abb. 14: Ebenenabstände mit Mittelwert und theoretischem Wert

### 3.2 X-Y-Kalibrierung

Tab. 5: Einstellungen für die Kalibrierung

Rasterzeit	80 ms
Pixel pro Zeile	256
P-Gain	1000
I-Gain	250
Tunnelstrom	800 pA
Tunnelspannung	150 mV

Um die Kalibrierung des RTMs in x- und y- Richtung zu bestimmen, werden für beide Richtungen in jedes Bild je drei Verbindungslinien zwischen einzelnen Atomen gezeichnet. Die Länge dieser Linien kann mit Hilfe von Gwyddion ausgemessen werden. Der theoretische Abstand zwischen den Atom kann über den Cosinussatz und den bekannten Abstand zweier Atome von 0.246 nm ausgerechnet werden. Der dafür benötigte Winkel beträgt immer 60 oder 120, aufgrund der hexagonalen Anordnung der Atome. Demnach kann der Winkel einfach abgelesen werden. Es werden Bildgrößen von 2 nm, 2.5 nm und 3 nm vermessen, unter den in Tab.(5) zu sehenden Einstellungen des RTMs.

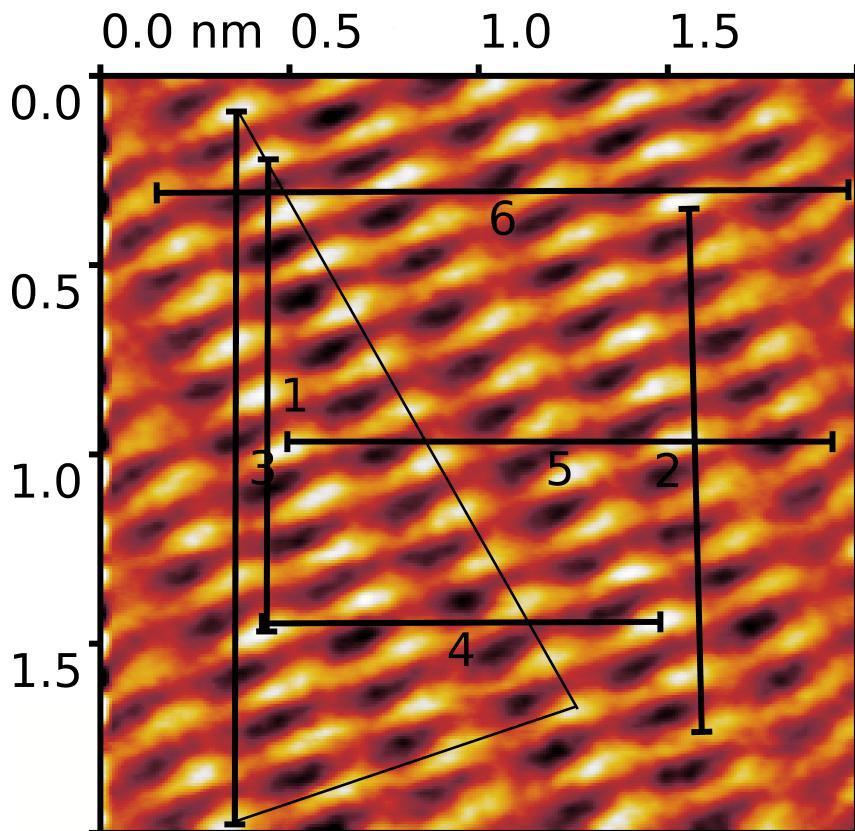


Abb. 15: Kohlenstoffatome bei einer Bildgröße von 2nm

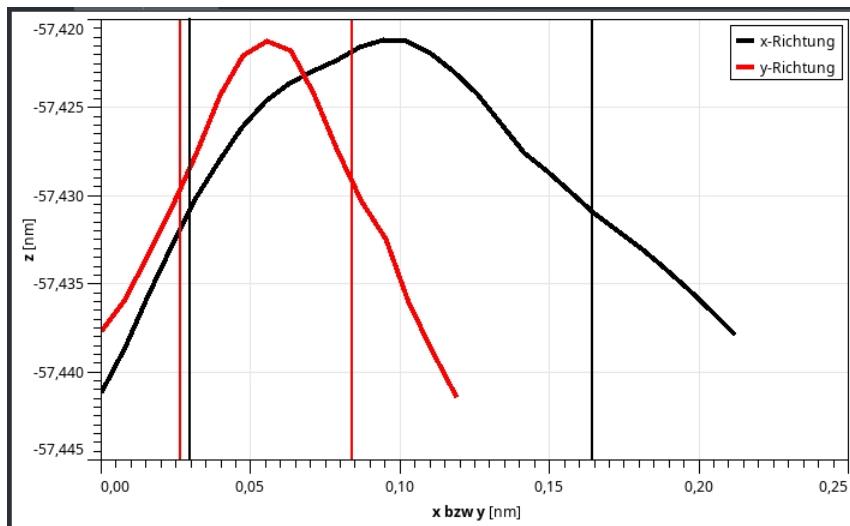


Abb. 16: Fehlerbestimmung in x- und y-Richtung für 2nm

In Abb.(15) sieht man beispielhaft ein zur Auswertung benötigtes Dreieck. Die anderen Bildgrößen sind im Anhang zu sehen. Die einzelnen Auswertungsschritte werden nun beispielhaft an Linie 3 gezeigt. Ihre gemessene Länge beträgt  $(1898.094 \pm 50.959)$  pm. Dabei wurde der Fehler auf die Längenmessung über FWHM einer Elektronenzustandsdichte der Atome für eine Bildgröße bestimmt, wie in Abb.(16) zu sehen ist. Die Kurven wurden hier als gaußförmig angenommen, sodass die Breite der Kurve noch durch  $2 \cdot \sqrt{2 \ln 2}$  geteilt wer-

den muss um den Fehler zu erhalten.

Um nun die theoretische Länge zu berechnen, wird der Cosinussatz

$$c^2 = a^2 + b^2 - 2ab \cos \gamma$$

verwendet. Im Falle der Linie 3 beträgt  $\gamma = 60^\circ$ . Für  $a$  und  $b$  werden nun die Atome gezählt und das Ergebnis mit dem Atomabstand multipliziert

$$a = 3 \cdot 246 \text{ pm} = 738 \text{ pm} \text{ und } b = 12 \cdot 246 \text{ pm} = 2952 \text{ pm}$$

Damit ergibt sich als theoretischer Wert für Linie 3

$$c = 2660.897 \text{ pm}$$

Dieser Wert hat keinen Fehler, da der Atomabstand keinen Fehler hat und kein Abzählfehler angenommen wird.

Nach diesem Verfahren werden nun alle Linien für eine Richtung und eine Bildgröße berechnet und über die Ergebnisse wird eine lineare Regression ohne Achsenabschnitt durchgeführt. Die Regression für die y-Richtung bei 2nm ist in Abb.(17) zu sehen. Die Kalibrationskonstante ergibt sich dann als Steigung der Graden.

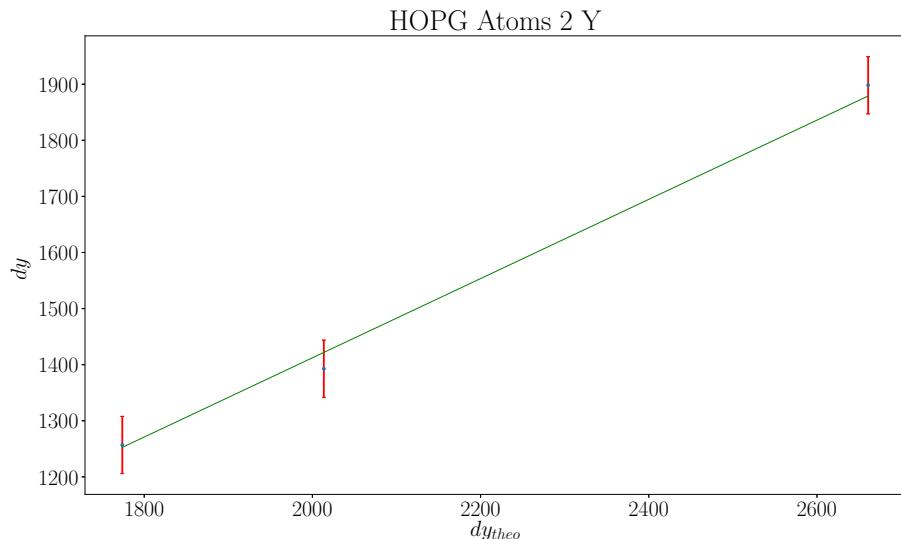


Abb. 17: Lineare Regression über  $dy = k \cdot dy_{theo}$  für 2nm, mit  $k$  als Kalibrationskonstante

Für die anderen Bildgrößen ergeben sich damit folgende Werte

Bildgröße [nm]	$k_x$	$k_y$
2	$0.968 \pm 0.008$	$0.706 \pm 0.007$
2.5	$0.960 \pm 0.017$	$0.729 \pm 0.008$
3	$0.967 \pm 0.002$	$0.928 \pm 0.015$

Das heißt, dass das RTM in x-Richtung für alle Bildgrößen relativ gut kalibriert ist und die Werte untereinander auch sehr ähnlich sind. In y-Richtung fällt allerdings auf, dass der  $k_y$  bei einer Größe von 3 nm von den anderen abweicht. Den Effekt davon kann man auch gut in den Scans in Abb.(18) sehen. So sind nur bei dem 3 nm Bild runde Elektronenzustandsdichten der Atome zu sehen. In den anderen Bildern sind diese in y-Richtung zusammengestaucht, was  $k_x > k_y$  entspricht.

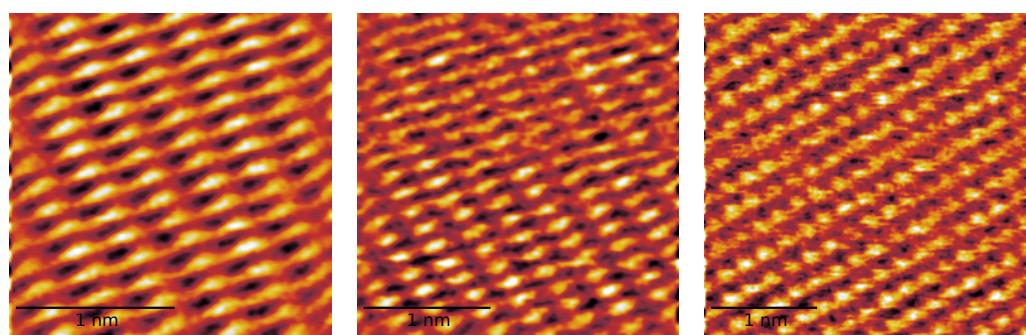


Abb. 18: Die drei Bildgrößen im Vergleich, Größe steigt von links nach rechts

## 4 Quellen

Abb.(7): <https://institut2a.physik.rwth-aachen.de/de/teaching/praktikum/Anleitungen/FK03-RTM.pdf>

## 5 Anhang

### 5.1 Gold

#### 5.1.1 Steigungsmessung

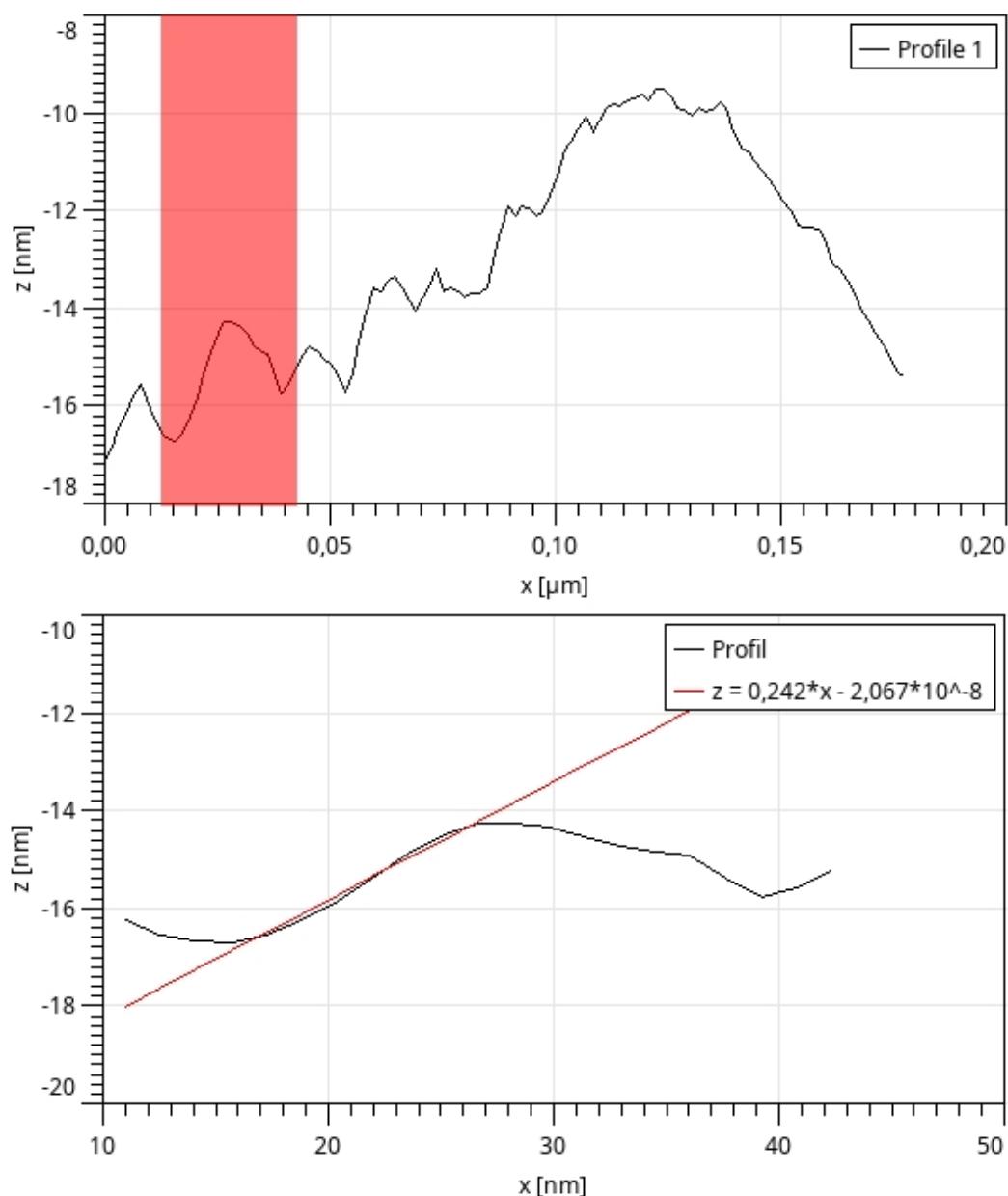


Abb. 19: Profillinie zur Bestimmung der Steigung bei I-Gain = 2500

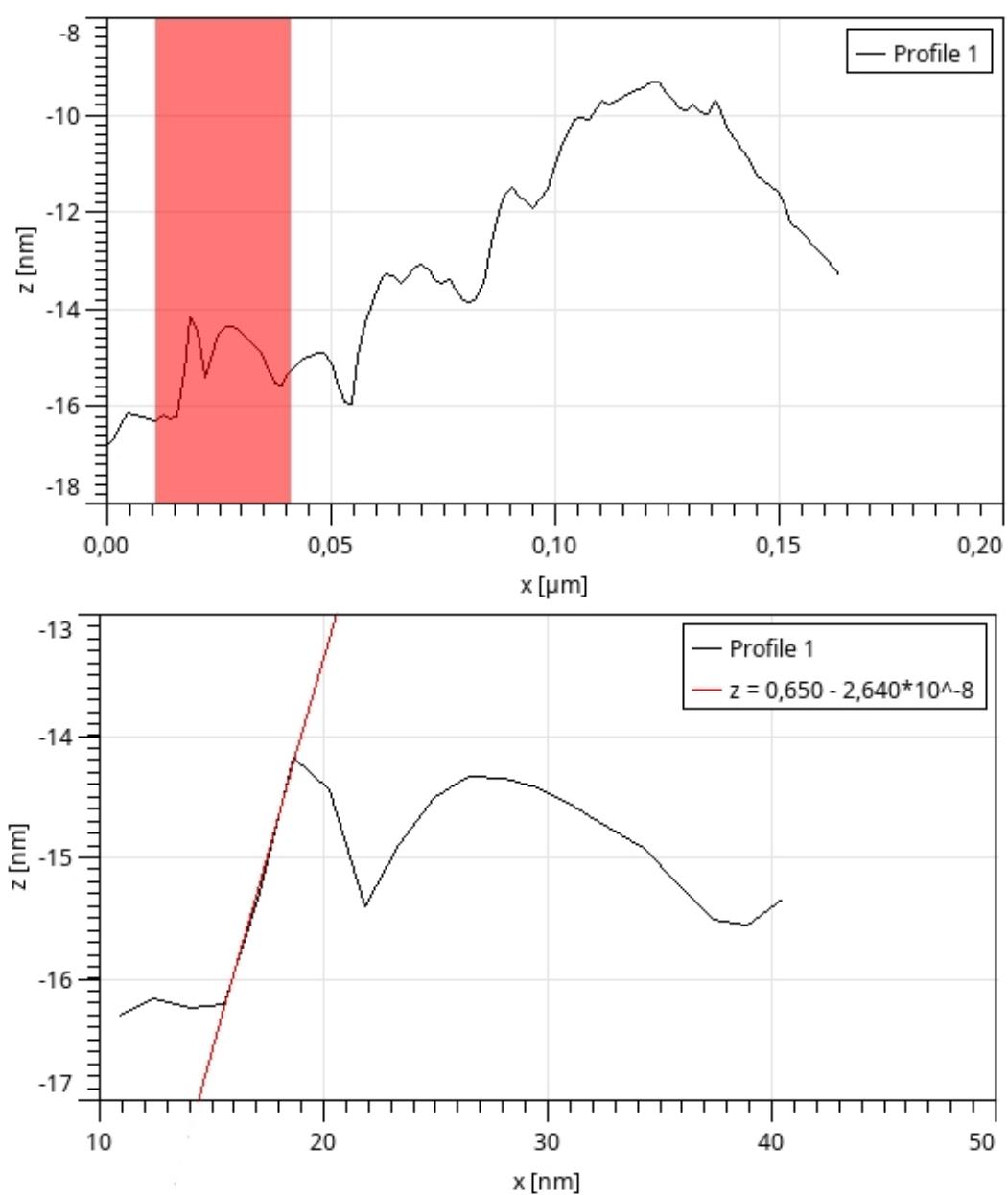


Abb. 20: Profillinie zur Bestimmung der Steigung bei I-Gain = 4000

## 5.2 HOPG

### 5.2.1 Kalibrierung

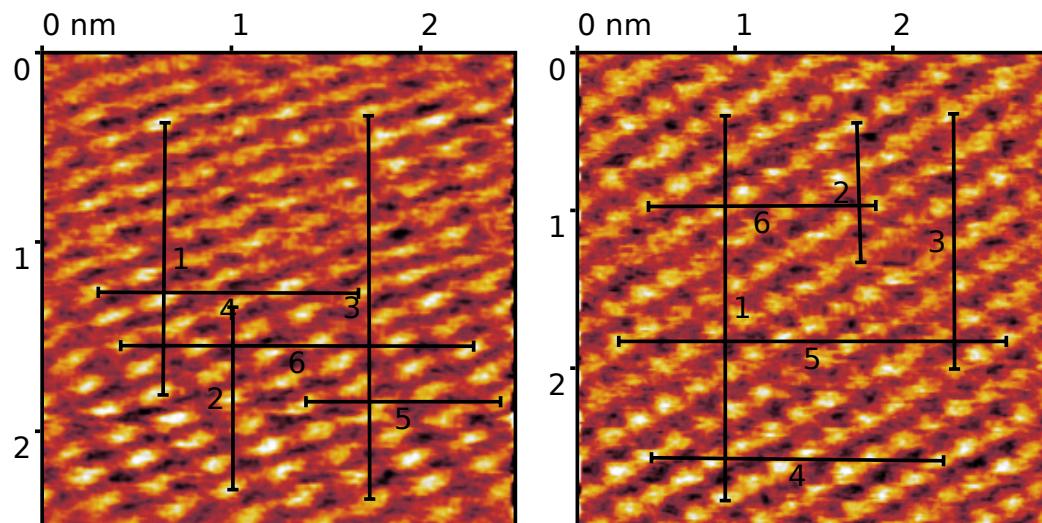


Abb. 21: Kohlenstoffatome bei einer Bildgröße von 2.5nm  
Abb. 22: Kohlenstoffatome bei einer Bildgröße von 3nm