

Versuchsprotokoll Fortgeschrittenen-Praktikum I

## **Rastertunnelmikroskopie (STM)**

Sebastian Knust (Protokollant)  
sknust@physik.uni-bielefeld.de

Armin Grundmann  
agrundmann@physik.uni-bielefeld.de

08.12.2011

## Inhaltsverzeichnis

<b>1. Theoretische Grundlagen</b>	<b>3</b>
1.1. Energieniveaus in Festkörpern . . . . .	3
1.2. Fermi-Energie und Austrittsarbeit . . . . .	3
1.3. Quantenmechanischer Tunneleffekt am idealen Potentialwall . . . . .	4
1.4. Energieniveaus beim STM und Tunnelstrom . . . . .	4
<b>2. Versuchsaufbau und -durchführung</b>	<b>5</b>
2.1. Spitzenpräparation . . . . .	6
2.2. Messmodi . . . . .	6
2.2.1. CCM . . . . .	6
2.2.2. CHM . . . . .	6
2.3. Proben . . . . .	7
2.3.1. Nanogrid . . . . .	7
2.3.2. HOPG . . . . .	7
2.3.3. Gold . . . . .	7
<b>3. Auswertung</b>	<b>8</b>
3.1. Spitze . . . . .	8
3.2. Kalibrierung mit Nanogrid . . . . .	9
3.3. HOPG . . . . .	11
3.3.1. CCM . . . . .	11
3.3.2. CHM . . . . .	14
3.3.3. Gitterkonstante . . . . .	15
3.4. Gold . . . . .	16
<b>A. Literatur</b>	<b>20</b>
<b>B. Daten</b>	<b>20</b>
<b>C. Selbstständigkeitserklärung</b>	<b>20</b>

# 1. Theoretische Grundlagen

## 1.1. Energieniveaus in Festkörpern

Bei Festkörpern liegen die quantenmechanisch erlaubten Energieniveaus sehr dicht beieinander, so dass sie sich zu einem quasikontinuierlichen Energieband zusammenschließen. Das höchste vollständig besetzte Energieband wird hierbei als *Valenzband*, das darüberliegende Band als *Leitungsband* bezeichnet.

Das elektrische Verhalten eines Festkörpers wird im Wesentlichen durch die Lage seiner Bänder bestimmt. Bei einem *Isolator* ist das Valenzband komplett mit Elektronen gefüllt, so dass es hier keine freien Zustände für eine elektrische Leitung gibt. Zudem ist die *Bandlücke*, der Abstand zwischen Valenz- und Leitungsband, so hoch, dass durch thermische Energie so gut wie keine Elektronen in das Leitungsband und die dort vorhandenen freien Zustände wechseln.

Bei einem *Halbleiter* ist die Bandlücke im Vergleich zum Isolator kleiner, sie liegt im Bereich von einigen wenigen Elektronenvolt. Hierdurch können durch die thermische Energie einige Elektronen in das Leitungsband wechseln. Durch eine Dotierung, also eine Anreicherung mit Elektronen oder freien Zuständen, kann die Leitfähigkeit von Halbleitern weiter erhöht werden.

Bei *Leitern* liegt keine Bandlücke vor bzw. Valenz- und Leitungsband überlappen sich. Hierdurch können Elektronen ungehindert in freie Zustände übertreten.

## 1.2. Fermi-Energie und Austrittsarbeit

Die Elektronen als Fermionen folgen in Festkörpern der Fermi-Verteilung, welche sich aus der Fermi-Dirac-Statistik ergibt. Die Wahrscheinlichkeit, dass sich ein Elektron bei einer Temperatur  $T$  in der Energie  $E$  befindet, ergibt sich mit der Fermi-Energie  $E_F$  als

$$W(E) = \frac{1}{\exp\left(\frac{E-E_F}{k_B T}\right) + 1} \quad (1)$$

Bei  $T = 0\text{ K}$  ergibt sich eine scharfe Kante: Unterhalb der Fermi-Energie ist die Aufenthaltswahrscheinlichkeit 1, darüber 0. Bei höheren Temperaturen weicht diese Kante auf, bei der Fermi-Energie ist die Wahrscheinlichkeit allerdings unabhängig von der Temperatur immer  $\frac{1}{2}$ .

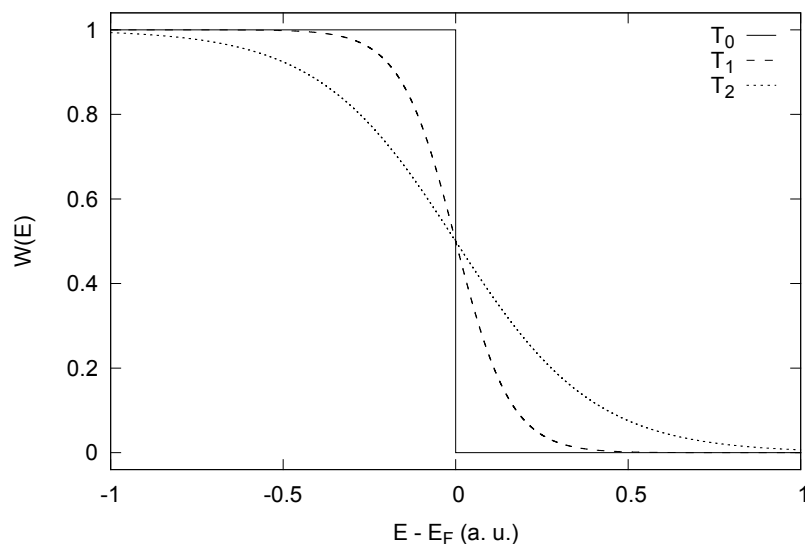


Abb. 1: Fermi-Verteilung bei unterschiedlichen Temperaturen  $T_0 = 0\text{ K} < T_1 < T_2$

Die Austrittsarbeit wird nun definiert als die Arbeit, die benötigt wird, um ein Elektron aus dem Energieniveau der Fermi-Energie komplett vom Atom zu lösen.

### 1.3. Quantenmechanischer Tunneffekt am idealen Potentialwall

Betrachten wir ein Potential  $V(x)$ , das überall 0 ist, bis auf den Bereich von  $-\frac{d}{2}$  bis  $\frac{d}{2}$ , in dem es  $V_0 > 0$  ist. Es ist also:

$$V(x) = \begin{cases} V_0 & |x| \leq \frac{d}{2} \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}$$

Laufe nun von  $x = -\infty$  ein Teilchen der Masse  $m$  ein. Die Lösung der Schrödingergleichung

$$\left[ -\frac{\hbar^2}{2m} \frac{d^2}{dx^2} + V(x) \right] \Psi_E(x) = E \Psi_E(x) \quad (2)$$

ergibt eine auch bei  $E < V_0$  nicht verschwindende Aufenthaltswahrscheinlichkeit für das Teilchen auf der anderen Seite der Potentialbarriere, die *Tunnelwahrscheinlichkeit*, welche sich klassisch nicht erklären lässt. Sie ist gegeben als: [5, S. 283]

$$T(E) = \left( 1 + \frac{V_0^2}{E(V_0 - E)} \frac{\sinh\left(\sqrt{2m(V_0 - E)} \cdot \frac{d}{\hbar}\right)^2}{4} \right)^{-1} \quad (3)$$

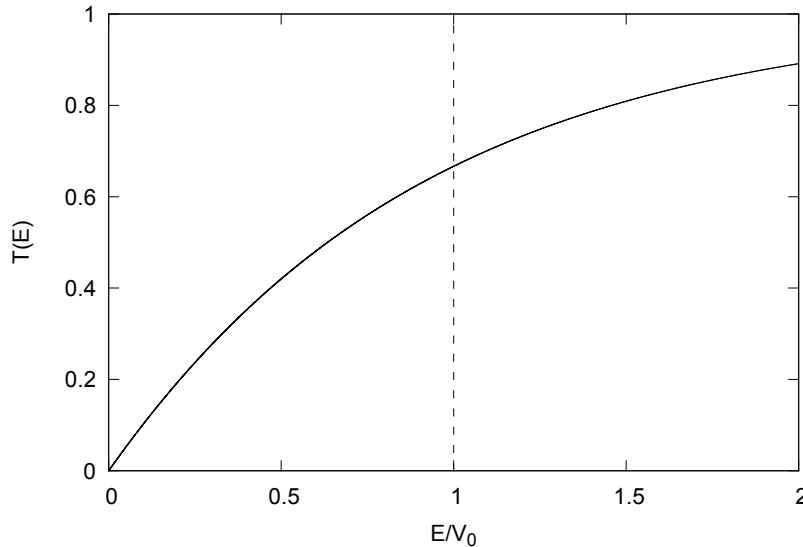


Abb. 2: Verlauf der Tunnelwahrscheinlichkeit, beachte den Bereich  $E < V_0$ , also  $\frac{E}{V_0} < 1$

### 1.4. Energieniveaus beim STM und Tunnelstrom

Der Aufbau des Rastertunnelmikroskops besteht, wie später ausführlich beschrieben, aus einer metallischen atomaren Spitze und einer ebenfalls metallischen (oder metallisch bedampften) Probe, die sich im Abstand von wenigen Nanometern zueinander befinden. Damit ergibt sich ein Energieschema gemäß Abb. 3.

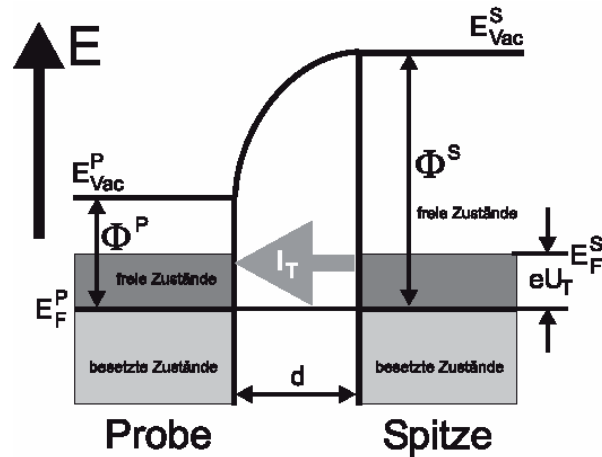


Abb. 3: Energieschema beim STM, aus [1]

Betrachten wir der Einfachheit halber ein Elektron mit der Fermi-Energie  $E_F^S$  in der Spitze, so stößt dieses auf einen Potentialwall der Höhe der Austrittsenergie  $\Phi^S$  aus dem Spitzenmaterial, welches in einer modellabhängigen Form innerhalb des Abstands zwischen Spitze und Probe  $d$  auf die Austrittsenergie  $\Phi^P$  der Probe absinkt. Wir erhalten also eine Potentialbarriere ähnlich dem genannten Potentialwall. Mit einer angelegten kleinen Tunnelspannung  $U_T$ , welche üblicherweise bei  $U_T \approx 100$  mV liegt, erhalten wir einen Tunnelstrom  $I_T$  in der Größenordnung einiger nA. Dieser hängt exponentiell vom Abstand  $d$  ab:

$$I_T \propto U_T \exp\left(-\frac{2d}{\hbar} \sqrt{2m\Phi}\right) \tag{4}$$

## 2. Versuchsaufbau und -durchführung

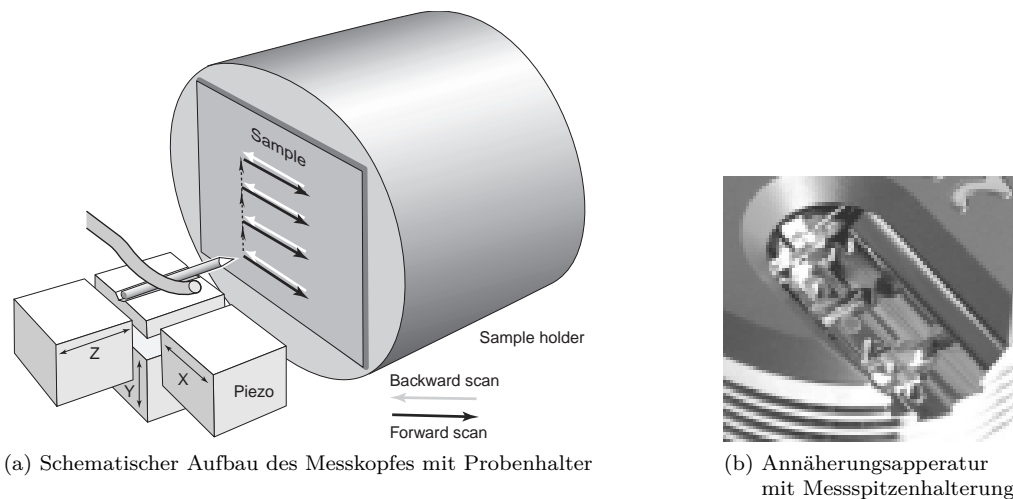


Abb. 4: Versuchsaufbau, aus [4]

Der Aufbau des easyScan 2 STM besteht gemäß Abb. 4 aus einer Vertiefung für den Probenhalter, welcher mittels einer Piezo Slide an die Messspitze angenähert werden kann. Diese ist an einem

dreidimensionalen Piezo befestigt.

## 2.1. Spitzenpräparation

Essentiell für detaillierte und scharfe Bilder ist die Qualität der Spitze. Im Idealfall besteht diese aus lediglich einem einzelnen Atom. Bei breiteren Spitzen können kleine Strukturen nicht mehr aufgelöst werden, es entsteht also ein unscharfes Bild. Des weiteren sollte sich an der Spitze tatsächlich nur eine Spitze befinden. Bei mehreren Spitzen ist eine Zuordnung des gemessenen Tunnelstroms zur Spitze und damit eine genaue Lokalisierung nicht mehr möglich, es können Geisterbilder mit parallelen Strukturen entstehen.

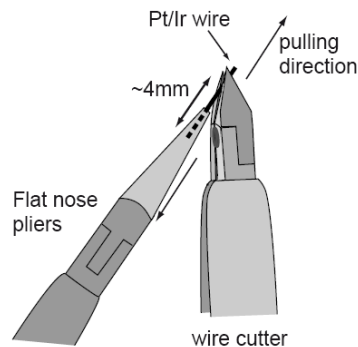


Abb. 5: Spitzenpräparation, aus [1]

Die Präparation der Spitze erfolgt gemäß Anleitung und Abb. 5 mithilfe eines Seitenschneiders, mit dem ein PtIr-Draht in spitzem Winkel abgezogen wird. Alternativ hierzu könnten Spitzen z. B. durch lithographische Methoden oder Ätzen hergestellt werden.

## 2.2. Messmodi

### 2.2.1. CCM

Beim der *constant current method* wird der Tunnelstrom konstant gehalten, in dem über einen Regelkreis der Abstand zwischen Spitze und Probe mittels des Piezos in z-Richtung angepasst wird. Die Auftragung der Piezoaussteuerung ergibt damit ein Bild, welches jedoch nicht direkt als topographische Abbildung verstanden werden darf, da der Tunnelstrom wie in Glg. 4 ersichtlich auch durch die elektrischen Eigenschaften von Spitze und Probe wesentlich bestimmt werden. Zudem handelt es sich bei dieser Gleichung nur um eine Näherung, welche im Detail nicht der Realität entspricht.

Die wesentlichen Vorteile dieser Methode sind eine relativ große Langzeitstabilität gegenüber mechanischem Drift sowie relativ geringe Anforderungen an die Glätte der Probenoberfläche. Nachteilig hingegen sind die langsame Abtastrate sowie die Möglichkeit von Artefakten durch den Regelkreis, wie beispielsweise eine Oszillation durch ungeeignete Regelparameter oder unscharfe Kantendarstellung sowohl durch Regelparameter als auch durch Kriechen des Piezos.

### 2.2.2. CHM

Im Gegensatz dazu wird bei der *constant height method* der Tunnelstrom bei konstanter Piezoposition gemessen.

Der wesentliche Vorteil dieser Methode ist die wesentlich höhere Abtastrate. Diese ist nun nicht mehr durch den Regelkreis, sondern lediglich durch die Bandbreite der Strommessung limitiert. Daher eignet sich diese Methode vor allem für die Analyse von schnell ablaufenden Oberflächenprozessen.

Nachteilig hingegen ist die geringe Langzeitstabilität, da sich bereits kleinste mechanische Störungen wie Schwingungen der Unterlage, Schall sowie Drift des Piezos aufgrund des exponentiellen Zusammenhangs stark auf den Tunnelstrom auswirken. Der größte Nachteil sind allerdings die hohen Anforderungen an die Glätte der Probenoberfläche. Durch größere Strukturen besteht schnell die Gefahr einer Kollision zwischen Spitze und Probe, welche sowohl die Oberfläche lokal beschädigt als auch in vielen Fällen die Spitze unbrauchbar macht.

## 2.3. Proben

### 2.3.1. Nanogrid

Beim Nanogrid handelt es sich um ein künstliches rechtwinkliges Gitter mit einer Periodenlänge von  $a = 160 \text{ nm}$ .

### 2.3.2. HOPG

Bei HOPG handelt es sich um ein hochqualitatives Graphit mit einer minimalen Abweichung der Ausrichtung der einzelnen Graphenlagen. Durch Abziehen der obersten Schichten mit einem Tesastreifen kann eine frische, unkontaminierte Schicht für die Messungen gewonnen werden.

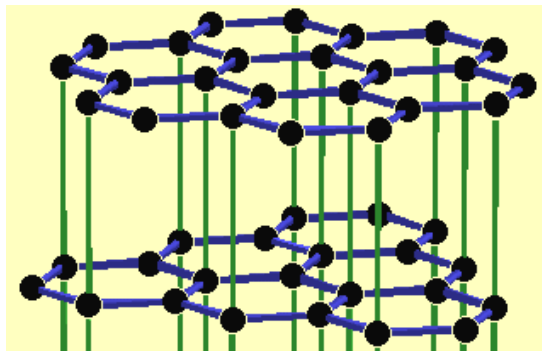


Abb. 6: Kristallstruktur von Graphit, aus [1]

HOPG ist in einem hexagonalen Gitter angeordnet. Der Abstand zum übernächsten Nachbarn beträgt  $a = (2,464 \pm 0,002) \text{ \AA}$ , der Schichtabstand beträgt  $c = (6,711 \pm 0,004) \text{ \AA}$ [3]. Die Kristallstruktur ist in Abb. 6 dargestellt. Jedes zweite Atom kommt an dieser Stelle in allen Schichten vor. Es lässt sich zeigen, dass diese Atome im STM nicht zu sehen sind. Gesehen werden lediglich die Atome der obersten Lage, welche in der direkt darunter liegenden Lage keinen direkten Nachbar haben. Damit sollte sich im STM eine Struktur von gleichseitigen Dreiecken mit Seitenlänge  $a$  ergeben.

### 2.3.3. Gold

Gold liegt als Kristall kubisch flächenzentriert mit einer Gitterkonstanten von  $a = 4,0786 \text{ \AA}$  vor, die Oberflächen sind (111)-Flächen[2]. Damit ergibt sich eine Stufenhöhe von  $h = \frac{a}{\sqrt{3}} \approx 235,5 \text{ pm}$ .

### 3. Auswertung

#### 3.1. Spitze

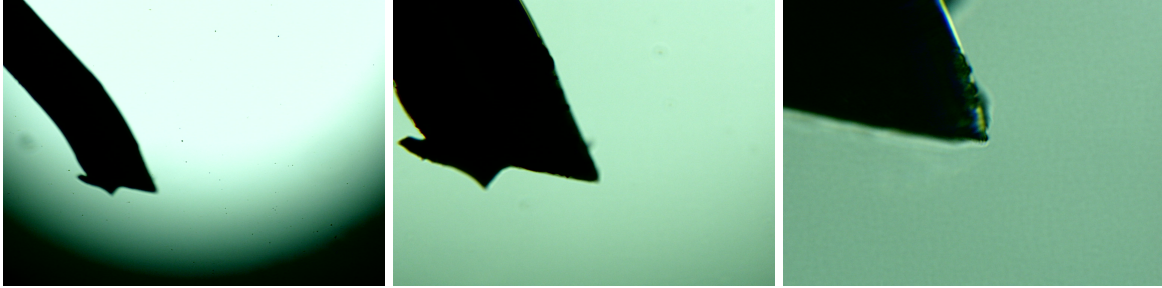


Abb. 7: Lichtmikroskop-Aufnahmen der verwendeten PtIr-Spitze



### 3.2. Kalibrierung mit Nanogrid

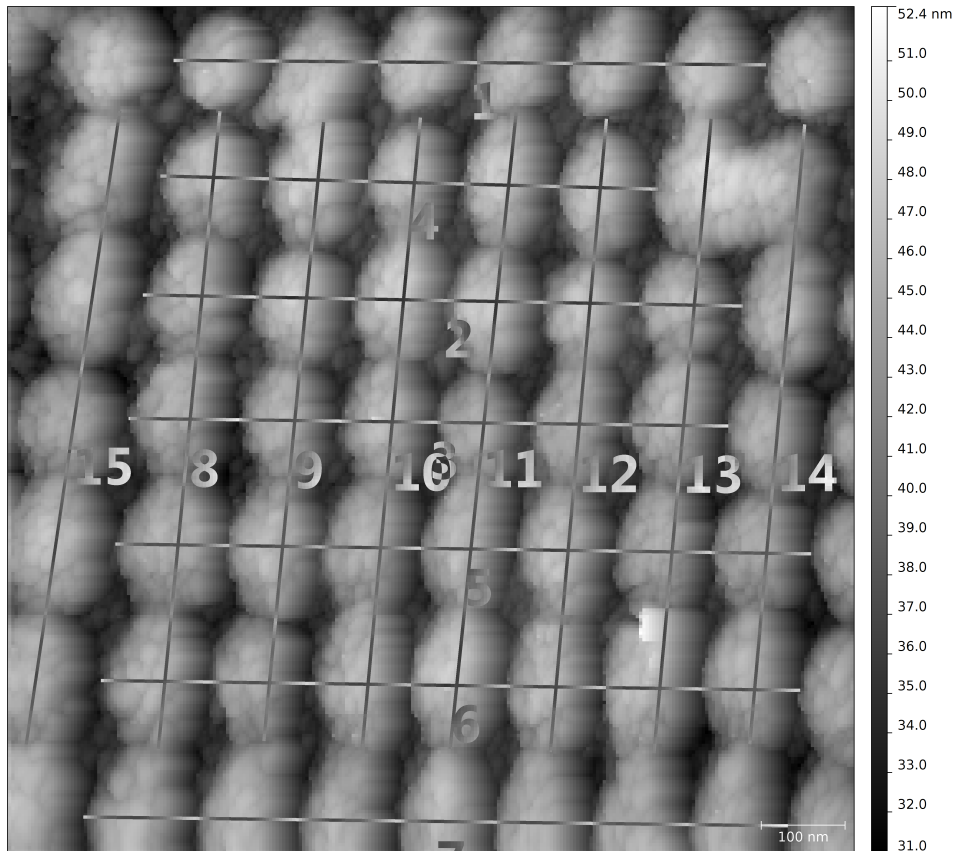


Abb. 8: Aufnahme Nanogrid ( $1\ \mu\text{m} \times 1\ \mu\text{m}$  0,6 s/line 256 pt /line), unkorrigiert

Die Auswertung der Nanogrid-Aufnahmen ergibt eine notwendige Korrektur der Achsenfaktoren und des Winkels zwischen den Achsen. Wir korrigieren daher die nachfolgenden Messungen mit folgender Korrekturmatrix:

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f_x \cos \alpha & f_y \cos \beta \\ f_x \sin \alpha & f_y \cos \beta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \quad (5)$$

und folgenden Werten für die Korrekturfaktoren:

$$\begin{array}{ll} \alpha \text{ [rad]} & -0,012 \\ \beta \text{ [rad]} & 1,444 \\ f_x & 1,354 \\ f_y & 1,080 \end{array}$$

Die Korrektur der Bilder ist in der verwendeten Auswertungssoftware Gwyddion nicht so trivial wie gewünscht. Erforderlich ist zunächst eine Polynomial Distortion. Diese erwartet Korrekturmatrizen bzw. -polynome der Form

$$x_{\text{old}} = P_x(x_{\text{new}}, y_{\text{new}}) \quad (6)$$

$$y_{\text{old}} = P_y(x_{\text{new}}, y_{\text{new}}) \quad (7)$$

Leider vergrößert die Software das Ausgabebild nicht, auch wenn dies aufgrund der Polynome notwendig sein sollte. Wir verwenden daher

$$P_x = 1,1063x_{\text{new}} - 0,1406y_{\text{new}} \quad (8)$$

$$P_y = 0,0168x_{\text{new}} + 1,3985y_{\text{new}} \quad (9)$$

und skalieren anschließend x- und y-Achse um einen Kalibrierungsfaktor von 1,360. Die damit erhaltenen Bilder haben folgende Form:

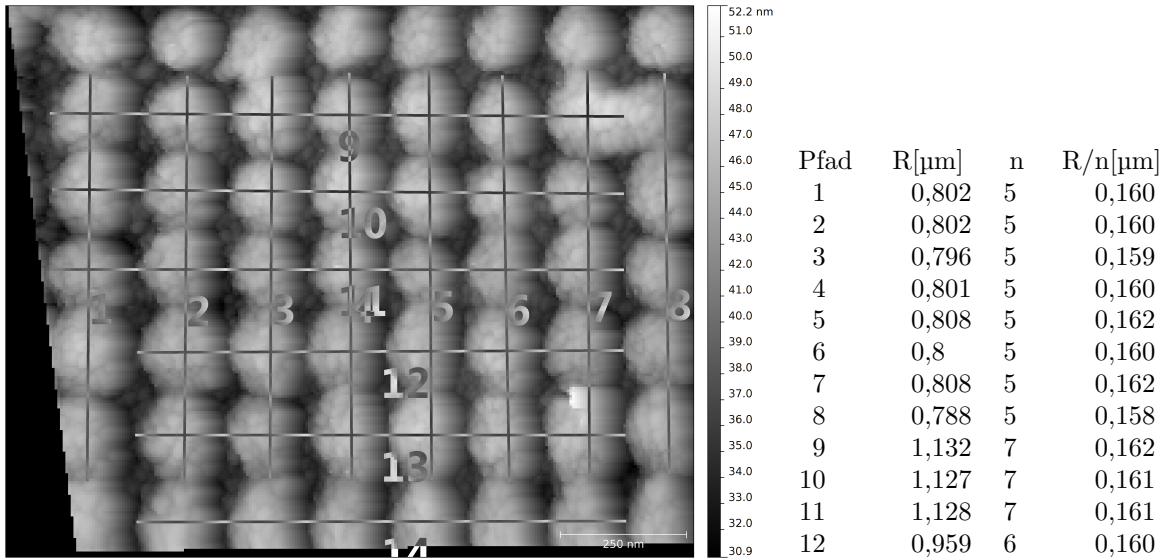


Abb. 9: Aufnahme Nanogrid ( $1\ \mu\text{m} \times 1\ \mu\text{m}$  0,6s/line 256 pt/line), korrigiert, vertikale Pfade v. l. n. r.: 1-8, horizontale Pfade v. o. n. u.: 9-14

Tabelle 1: Pfade in Abb. 9

Die Pfade in Abb. 9 entsprechend Tabelle 1 ergeben eine Gitterkonstante des Nanogrids von  $a = (0,160 \pm 0,001)\ \text{nm}$ . Damit ist die Korrektheit der Kalibrierung gezeigt. Der Kalibrierungsfehler ist im Vergleich zu den Standardabweichungen der Gitterkonstanten in den weiteren Messungen vernachlässigbar klein, weshalb er nicht weiter beachtet wird.

### 3.3. HOPG

#### 3.3.1. CCM

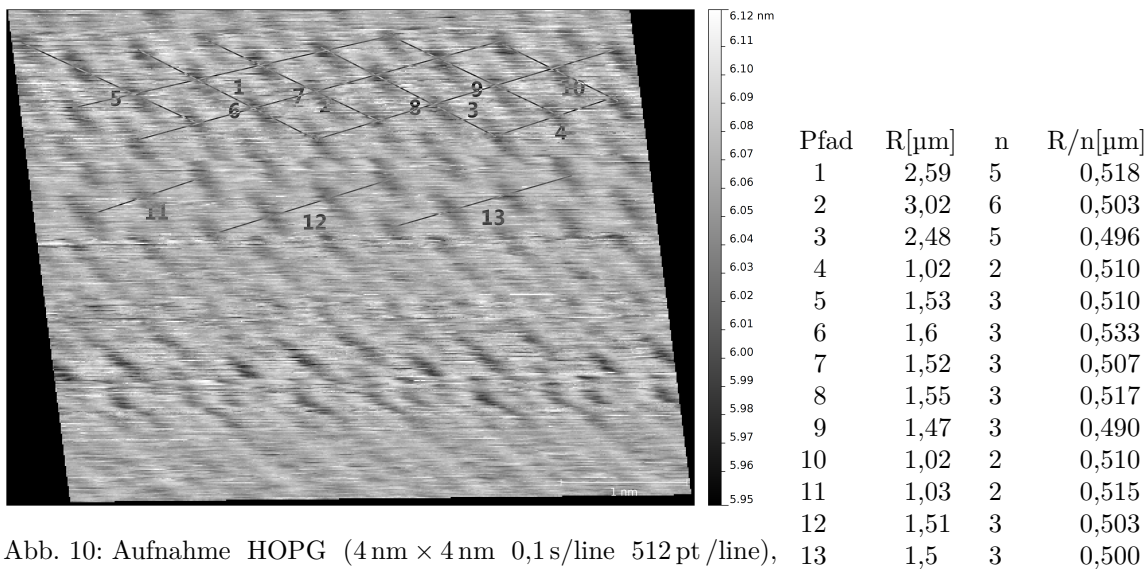


Abb. 10: Aufnahme HOPG (4 nm  $\times$  4 nm 0,1 s/line 512 pt /line), steigende Pfade v. l. n. r.: 1-4 (oben) / 11-13 (unten), fallende Pfade v. l. n. r.: 5-10

Tabelle 2: Pfade in Abb. 10

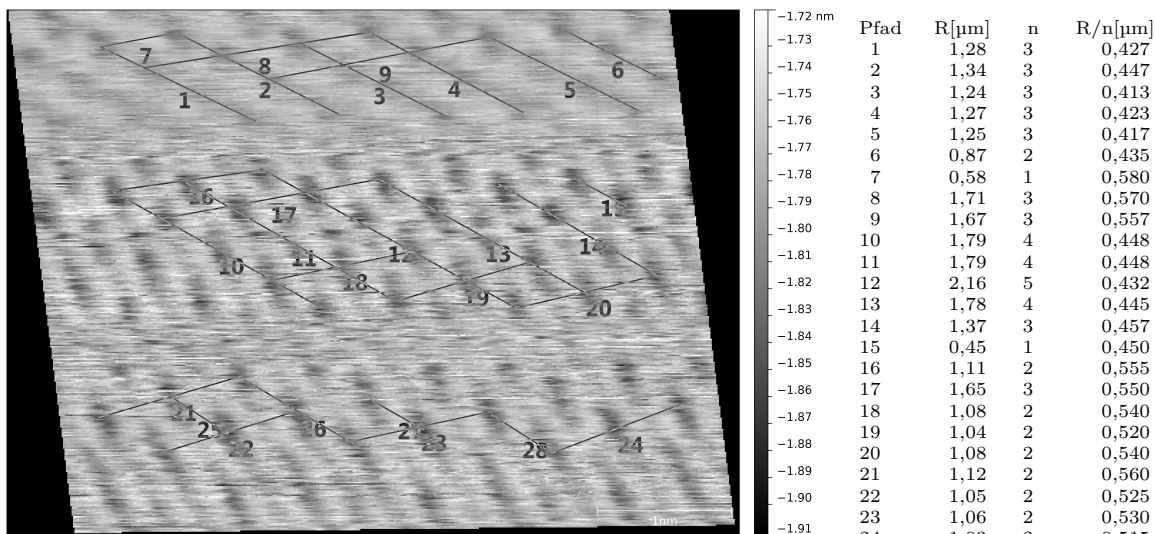
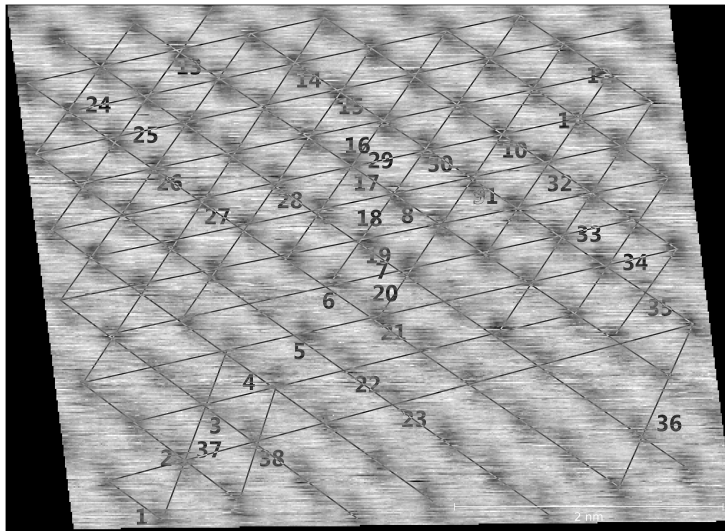


Abb. 11: Aufnahme HOPG (4 nm  $\times$  4 nm 0,1 s/line 512 pt /line), steigende Pfade v. l. n. r.: 7-9 (oben) / 16-20 (mitte) / 21-24 (unten), fallende Pfade v. l. n. r.: 1-6 (oben) / 10-15 (mitte) / 25-28 (unten)

Tabelle 3: Pfade in Abb. 11



Pfad	R[ $\mu\text{m}$ ]	n	R/n[ $\mu\text{m}$ ]
1	0,5	1	0,500
2	1,48	3	0,493
3	2,75	6	0,458
4	3,48	8	0,435
5	4,66	11	0,424
6	5,31	13	0,408
7	5,69	14	0,406
8	4,76	12	0,397
9	3,93	10	0,393
10	3,14	8	0,393
11	1,97	5	0,394
12	1,2	3	0,400
13	2,26	4	0,565
14	3,43	6	0,572
15	4,57	8	0,571
16	4,02	7	0,574
17	4,56	8	0,570
18	4,03	7	0,576
19	4,6	8	0,575
20	3,99	7	0,570
21	4,54	8	0,568
22	3,35	6	0,558
23	4,49	8	0,561
24	1,22	3	0,407
25	2,05	5	0,410
26	2,43	6	0,405
27	3,26	8	0,408
28	2,46	6	0,410
29	2,06	5	0,412
30	2,41	6	0,402
31	2,47	6	0,412
32	1,67	4	0,418
33	2,05	5	0,410
34	1,22	3	0,407
35	0,78	2	0,390
36	1,35	3	0,450
37	1,31	3	0,437
38	0,92	2	0,460

Abb. 12: Aufnahme HOPG (4 nm  $\times$  4 nm 0,2 s/line 512 pt /line), fallende Pfade v. u. n. o.: 1-12, leicht steigende Pfade v. o. n. u.: 13-23, steil steigende Pfade v. l. n. r.: 24-36 / 37-38 (unten links)

Tabelle 4: Pfade in Abb. 12

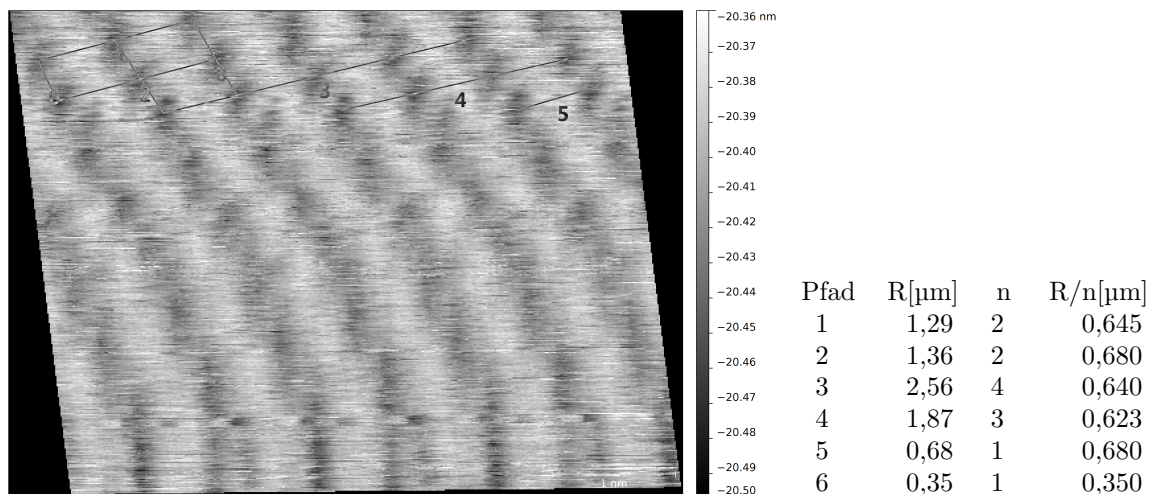


Abb. 13: Aufnahme HOPG ( $4\text{ nm} \times 4\text{ nm}$ ,  $0,4\text{ s/line}$ ,  $512\text{ pt/line}$ ),  
steigende Pfade v. l. n. r.: 1-5, fallende Pfade v. l. n. r.:  
6-8

Tabelle 5: Pfade in Abb. 13

Die beste Aufnahme ist Abb. 12 mit einer Rastergeschwindigkeit von  $0,2\text{ s/line}$ . Bei den Abbildungen 10 und 11 mit einer niedrigeren Rastergeschwindigkeit ist der Kontrast zwar ebenfalls relativ hoch, allerdings gibt es hier wesentlich mehr Versatz zwischen den einzelnen Zeilen, was eine genaue Lokalisierung der Atome behindert. Dies ist vermutlich durch mechanische oder thermische Verschiebungen auf einer Zeitskala der Größenordnung der Rastergeschwindigkeit zurückzuführen.

Im Gegensatz hierzu zeigt Abb. 13 mit einer höheren Rastergeschwindigkeit einen viel geringeren Kontrast, was sich auf die Trägheit des Regelkreises zurückführen lässt. Es ist anzumerken, dass alle Aufnahmen den selben Abschnitt der HOPG-Oberfläche zeigen.

### 3.3.2. CHM

Die nachfolgenden Strombilder zeigen den selben Oberflächenabschnitt wie die vorausgegangenen Topographieaufnahmen.

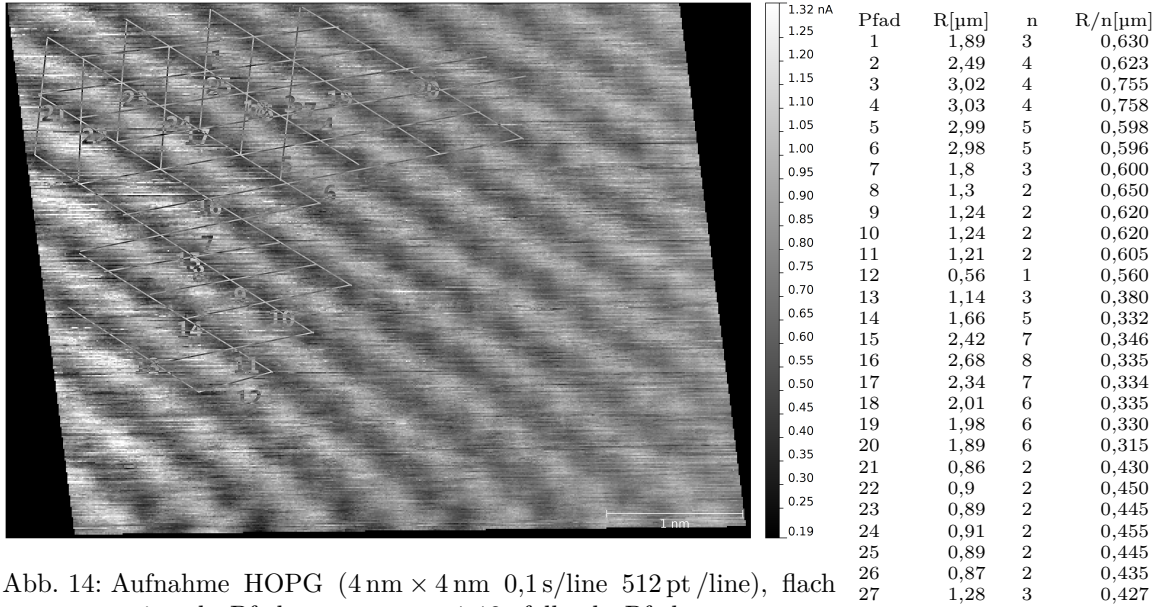


Abb. 14: Aufnahme HOPG ( $4\text{ nm} \times 4\text{ nm}$ ,  $0,1\text{ s/line}$   $512\text{ pt/line}$ ), flach steigende Pfade v. o. n. u.: 1-12, fallende Pfade v. u. n. o.: 13-20, steile Pfade v. l. n. r.: 21-27

Tabelle 6: Pfade in Abb. 14

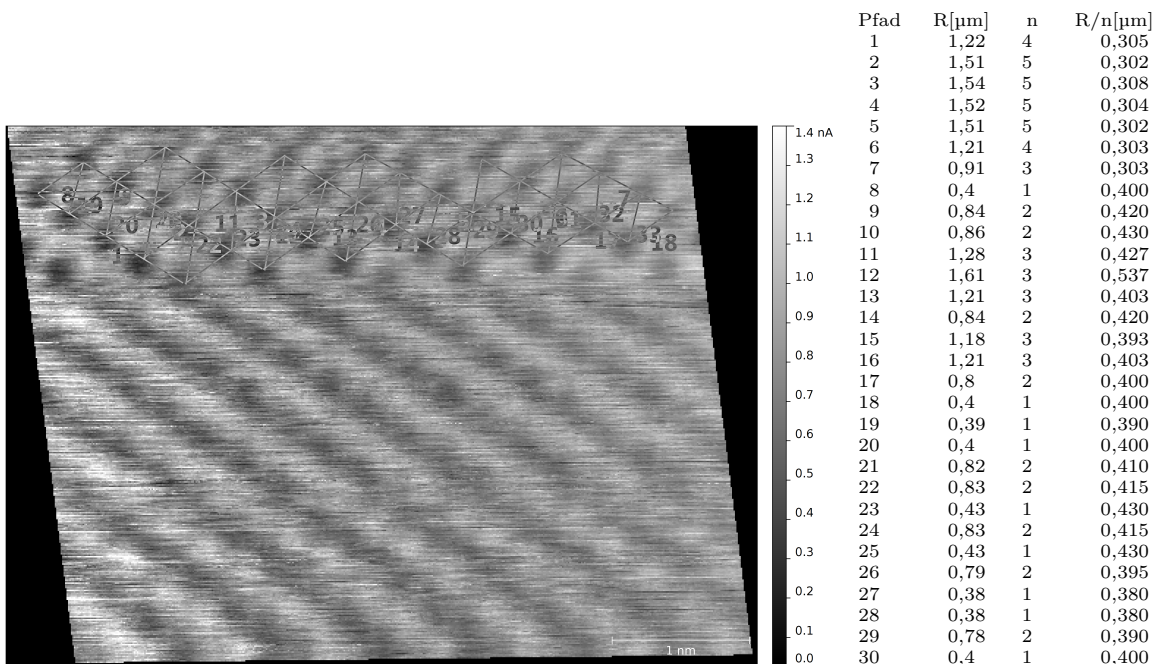


Abb. 15: Aufnahme HOPG ( $4 \text{ nm} \times 4 \text{ nm}$   $0,1 \text{ s/line}$   $512 \text{ pt /line}$ ), fallende v. l. n. r.: 1-7, flach steigende Pfade v. l. n. r.: 8-18, steile Pfade v. l. n. r.: 19-33

Pfad	R[ $\mu\text{m}$ ]	n	R/n[ $\mu\text{m}$ ]
1	1,22	4	0,305
2	1,51	5	0,302
3	1,54	5	0,308
4	1,52	5	0,304
5	1,51	5	0,302
6	1,21	4	0,303
7	0,91	3	0,303
8	0,4	1	0,400
9	0,84	2	0,420
10	0,86	2	0,430
11	1,28	3	0,427
12	1,61	3	0,537
13	1,21	3	0,403
14	0,84	2	0,420
15	1,18	3	0,393
16	1,21	3	0,403
17	0,8	2	0,400
18	0,4	1	0,400
19	0,39	1	0,390
20	0,4	1	0,400
21	0,82	2	0,410
22	0,83	2	0,415
23	0,43	1	0,430
24	0,83	2	0,415
25	0,43	1	0,430
26	0,79	2	0,395
27	0,38	1	0,380
28	0,38	1	0,380
29	0,78	2	0,390
30	0,4	1	0,400
31	0,74	2	0,370
32	0,37	1	0,370
33	0,36	1	0,360

Tabelle 7: Pfade in Abb. 15

### 3.3.3. Gitterkonstante

Unter Einbeziehung aller HOPG-Aufnahmen erhalten wir eine Gitterkonstante von  $a = (0,466 \pm 0,097) \text{ nm}$ . Dieser Wert stimmt im Rahmen der dreifachen, nicht aber der zweifachen Standardabweichung mit dem Literaturwert von  $a = 0,246 \text{ nm}$  überein. Die Tatsache, dass die gefundenen Dreiecke nicht gleichseitig sind und wir somit für unterschiedliche Messrichtungen unterschiedliche Werte für die Gitterkonstante bekommen (vgl. z. B. in Abb. 12 die Pfade 1-12 ( $a = (0,425 \pm 0,039) \text{ nm}$ ) den Pfaden 13-23 ( $a = (0,569 \pm 0,006) \text{ nm}$ ) und den Pfaden 24-38 ( $a = (0,416 \pm 0,019) \text{ nm}$ )), deutet auf eine fehlerhafte Kalibrierung bei den HOPG-Aufnahmen hin. Diese könnte durch die unterschiedlichen absoluten Piezo-Positionen bei der Kalibrierung mit dem Nanogrid und der Messung mit HOPG oder durch Nichtlinearitäten in der Größenordnung der Messungen beim HOPG verursacht sein.

### 3.4. Gold

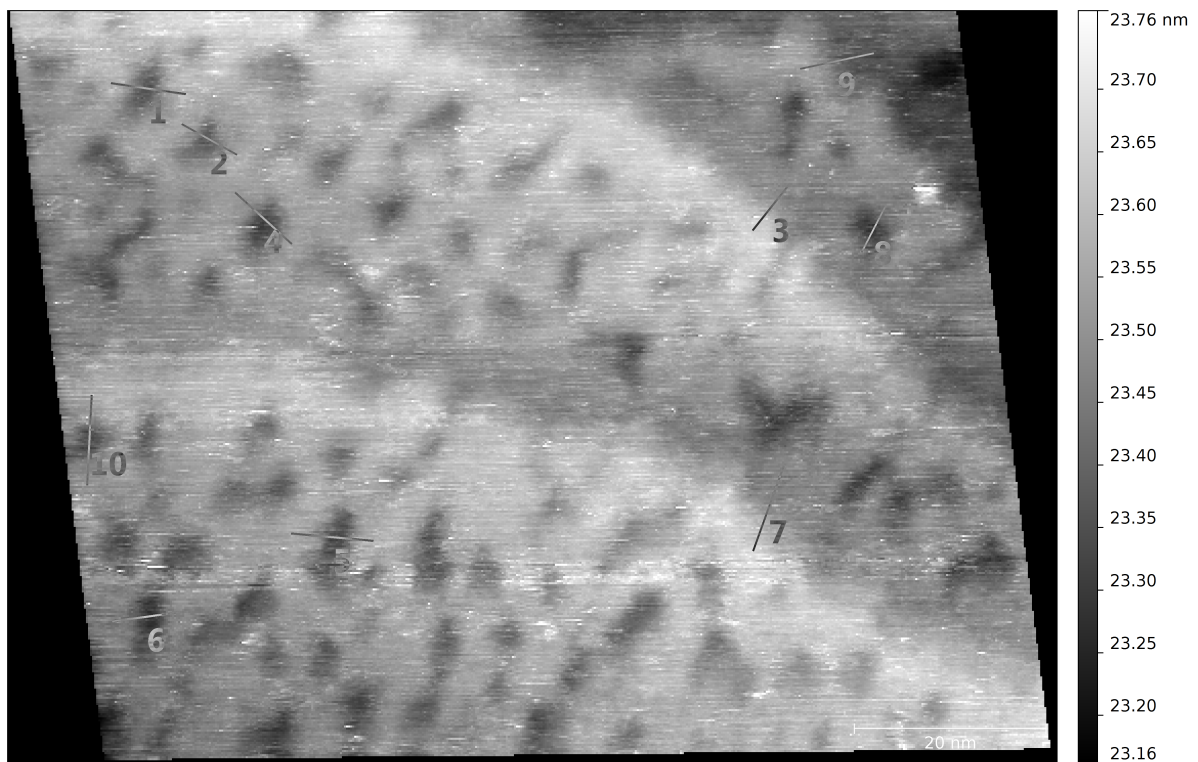


Abb. 16: Aufnahme Gold ( $80 \text{ nm} \times 80 \text{ nm}$  0,2 s/line 512 pt /line), Pfade v. l. n. r.: 1, 2, 4 (oben links) / 9 (oben rechts) / 3, 8 (darunter) / 7 (unten rechts) / 10, 6, 5 (unten links)



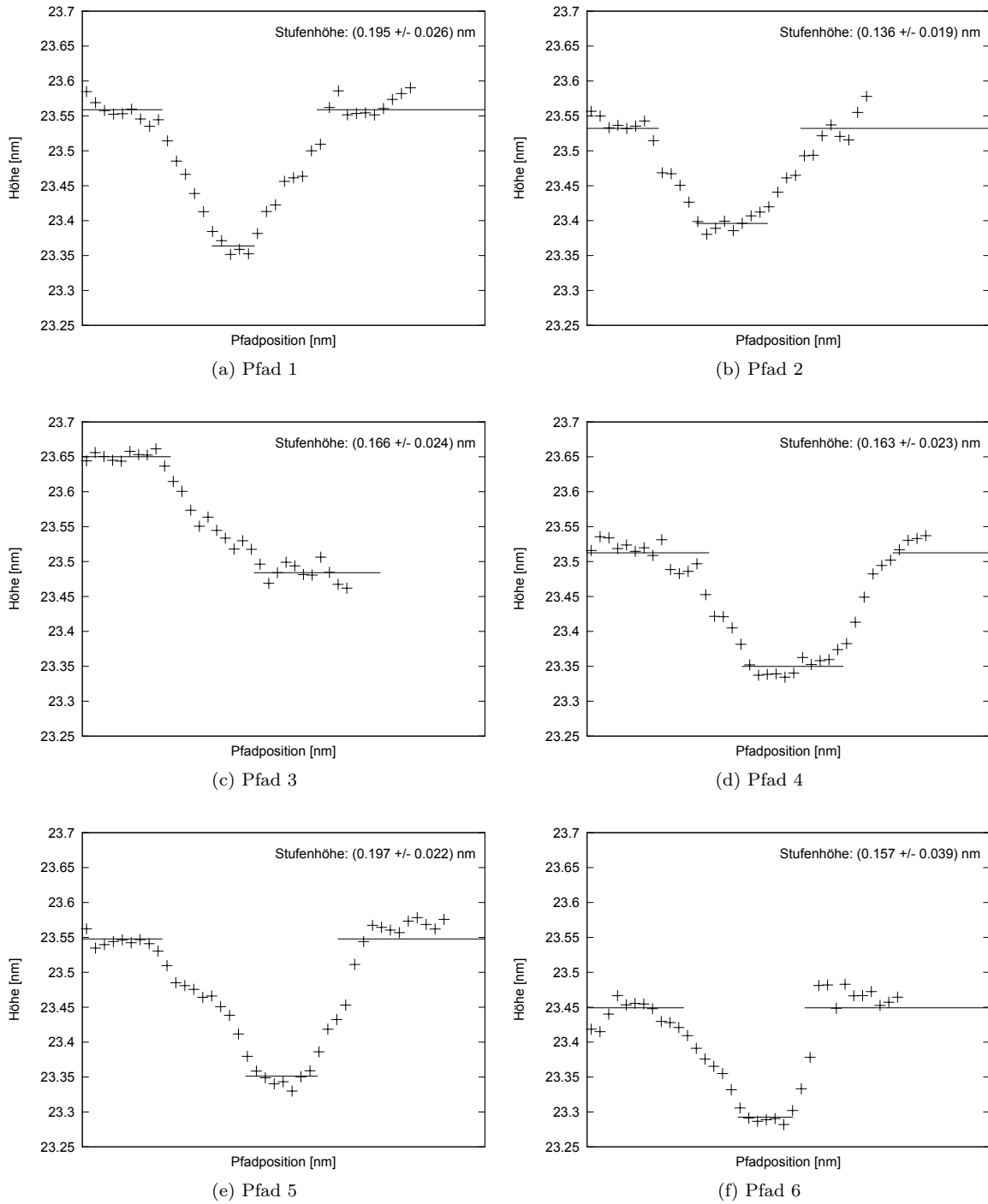
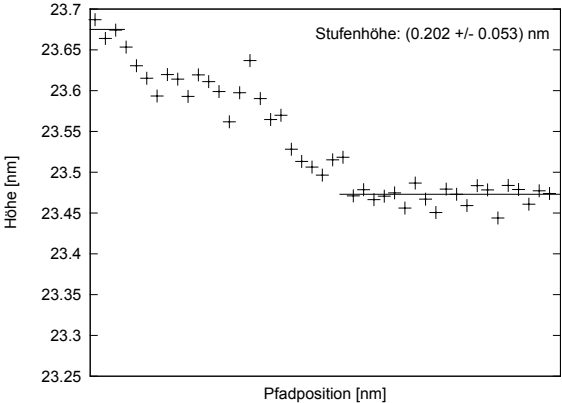
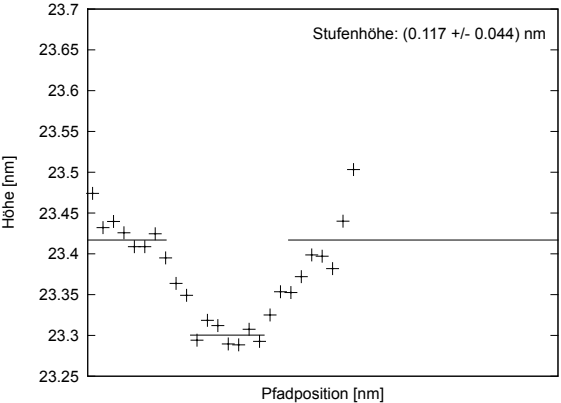


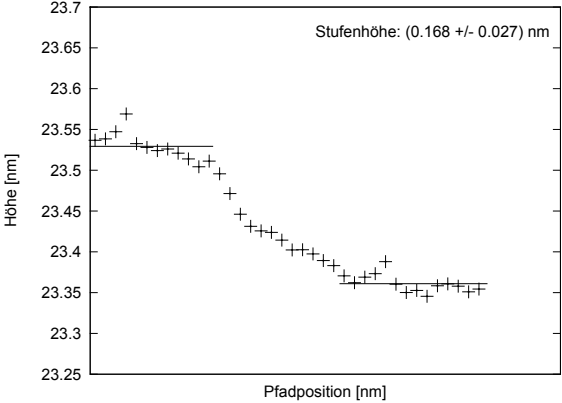
Abb. 17: Profilverlauf entlang der Pfade



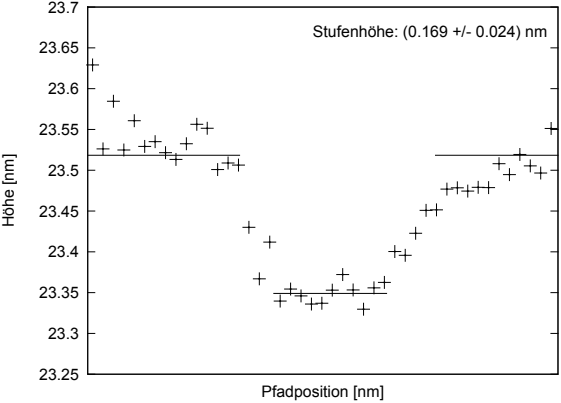
(g) Pfad 7



(h) Pfad 8



(i) Pfad 9



(j) Pfad 10

Abb. 17: Profilverlauf entlang der Pfade

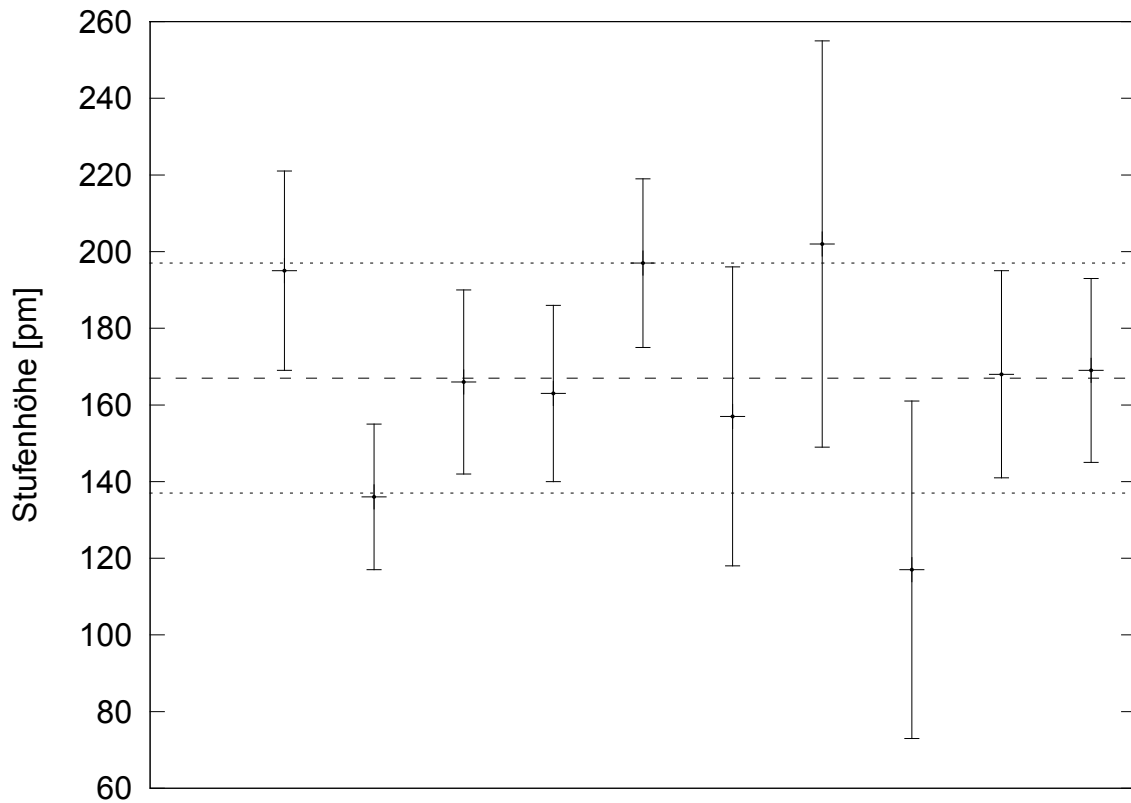


Abb. 18: Stufenhöhen Gold mit Mittelwert

Im Rahmen des relativ großen Fehlers bei der Bestimmung der Stufenhöhen ist es möglich, dass alle Stufen die kleinst möglichen Stufen darstellen. In diesem Fall beträgt die Stufenhöhe  $h = (167 \pm 30)$  nm. Dieser Wert stimmt im Rahmen des dreifachen Fehlers mit dem erwarteten Literaturwert von  $h = 235,5$  nm überein. In Ermangelung einer Kalibrierung in z-Richtung lässt sich damit lediglich bestätigen, dass die Annahme, dass es sich bei den Stufen um die kleinst möglichen Stufen handelt, vermutlich korrekt ist.

## A. Literatur

- [1] BRECHLING, Armin: *Skript Rastertunnelmikroskopie (STM) FP I*. Universität Bielefeld, Nov. 2011
- [2] DOWNS, R. T. u. a.: *The RRUFF Project: an integrated study of the chemistry, crystallography, Raman and infrared spectroscopy of minerals – Gold*. <http://rruff.geo.arizona.edu/doclib/hom/gold.pdf>
- [3] DOWNS, R. T. u. a.: *The RRUFF Project: an integrated study of the chemistry, crystallography, Raman and infrared spectroscopy of minerals – Graphite*. <http://rruff.geo.arizona.edu/doclib/hom/graphite.pdf>
- [4] NANOSURF AG (Hrsg.): *Operating Instructions easyScan 2 STM*. Version 1.6R0. Schweiz: Nanosurf AG, Mai 2007
- [5] NOLTING, Wolfgang: *Quantenmechanik – Grundlagen*. Berlin : Springer-Verlag, 2009. doi: 10.1007/978-3-540-68869-3

## B. Daten

Dieses Protokoll sowie die Daten befinden sich online unter <http://www.skust.de/sci/2011/STM/>.

## C. Selbstständigkeitserklärung

Dieses Protokoll wurde von mir selbstständig unter Zuhilfenahme der angegebenen Quellen verfasst.

Bielefeld, den 8. Januar 2012

Sebastian Knust