

Fortgeschrittenes Physik Lab SS19

Experiment: Rastertunnel

(Durchgeführt am: 18-19.09.19 bei Meinhardt Patrick)

Erik Bode, Damian Lanzenstiel
(Group 103)

28.September 2019

Zusammenfassung

Im Versuch zum Rastertunnelmikroskop sollte die Oberfläche von unterschiedlichen Materialien untersucht werden. Hierzu wurden Graphit, Gold und Molybdändisulfid benutzt. Für Graphit sollte dann die Gitterkonstante bestimmt werden. Hierbei wurden ein Wert von $a = (0.2585 \pm 0.0019) \text{ nm}$ für die Gitterkonstante erhalten. Jedoch ist dieser vermutlich wegen Systematischen Fehlern nicht mit dem Literaturwert von $a = 0.2456 \text{ nm}$ verträglich. Für Gold wurde eine wolkenartige Struktur gesehen die mit den Erwartungen übereinstimmt. Für Molybdändisulfid konnte keine passende Auflösung gefunden werden.

Inhaltsverzeichnis

| | |
|---|-----------|
| 1 Theorie | 2 |
| 1.1 Quantenmechanischer Tunneleffekt | 2 |
| 1.2 Tunneleffekt am RTM | 2 |
| 1.3 Piezokristalle | 3 |
| 1.4 Rückkopplung | 3 |
| 1.5 Arbeitsmodi des RTM | 3 |
| 1.5.1 Constant Current Mode | 3 |
| 1.5.2 Constant Height Mode | 3 |
| 1.6 Graphit | 4 |
| 1.7 Gold | 4 |
| 1.8 Molybdändisulfid | 4 |
| 2 Versuchsdurchführung | 5 |
| 3 Auswertung | 5 |
| 3.1 Graphit | 5 |
| 3.2 Gold | 7 |
| 3.3 Molybdändisulfid | 8 |
| 4 Diskussion | 9 |
| 4.1 Aufgetretene Probleme und Mögliche Fehlergründe | 9 |
| 4.2 Ergebnisse | 9 |
| 5 Tabellen | 10 |
| 6 Bilder | 10 |
| 7 Bibliography | 10 |
| Literatur | 10 |
| 8 Anhang | 10 |

1 Theorie

Das Rastertunnelmikroskop (RTM) ist ein Gerät welches verwendet wird die Topografien von Oberflächen abzubilden. Das Grundprinzip basiert auf dem Quantenmechanischen Tunneleffekt welcher durch das heranfahren einer Nadel an die Oberfläche so wie dem anlegen eines Stromes zwischen den beiden auftritt.

1.1 Quantenmechanischer Tunneleffekt

Der Tunneleffekt beschreibt den Effekt das Teilchen durch Potentialbarrieren durch können auch wenn sie es klassisch nicht könnten. Innerhalb der Barriere nimmt die Wahrscheinlichkeit des Teilchens exponentiell

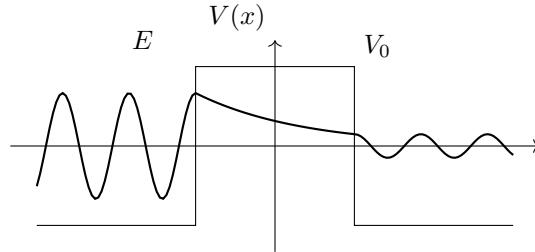


Abbildung 1: Tunneleffekt bei einer Potentialbarriere $V(x)$ [3]

ab. Die Transmissionswahrscheinlichkeit der Teilchen, die aus der Schrödinger-Gleichung resultiert, ist abhängig von der Energie des Teilchens und der Breite der Barriere.

1.2 Tunneleffekt am RTM

Bei leitenden Metallen gibt es eine hohe Anzahl an freien Elektronen. Wenn ein Potential zwischen Oberfläche und Nadel angelegt wird fließt ein Strom. Dieser wird Tunnelstrom genannt und entsteht durch dass Tunneln von Elektronen aus besetzten Zuständen von der Probe zur Spitze. Bildlich wird der Effekt in Abbildung 2 dargestellt. Der Strom hängt wie in Gleichung 1 dargestellt exponentiell vom Abstand d

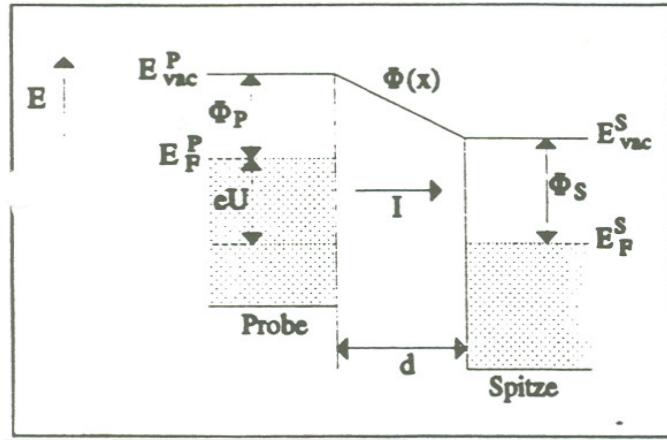


Abbildung 2: Tunneleffekt zwischen Leiter und Spitzenelektrode bei Metallen. E_F ist hierbei die Fermienergie, ϕ die Austrittsarbeitspotentiale.[4]

der Probe zur Spitze ab. Die Gleichung gilt bei kleinen Spannungen $eU \ll \phi, eU \ll E_F$.

$$I \propto U \cdot e^{-\sqrt{\frac{2\pi\phi}{\hbar}}d} \quad (1)$$

Da bei Halbleitern das Fermi-Niveau in der Energielücke und nicht im Leitungsband liegt, wird eine größere externe angelegte Spannung benötigt um einen Tunnelstrom hervorzurufen. Bei hohen Spannungen sind jedoch die Energieabhängigkeiten komplexer. Die Abbildungen 3 und 4 zeigen das Bändermodell für den Fall des Tunnelübergangs zwischen Halbleiter und Metall für unterschiedliche Polaritäten der angelegten Spannung.

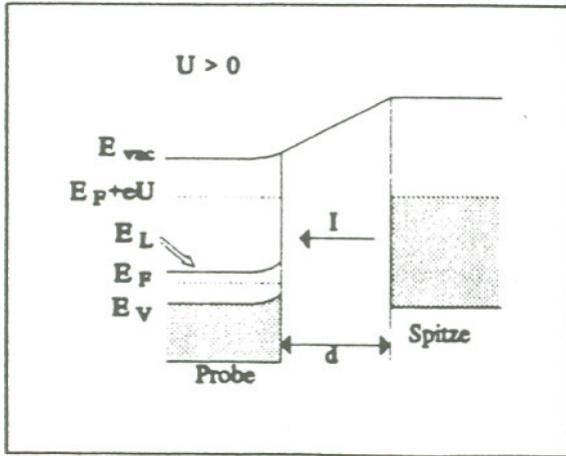


Abbildung 3: Tunneleffekt zwischen Halbleiter und Metall bei positiver Spannung gegenüber der Spitze.[4]

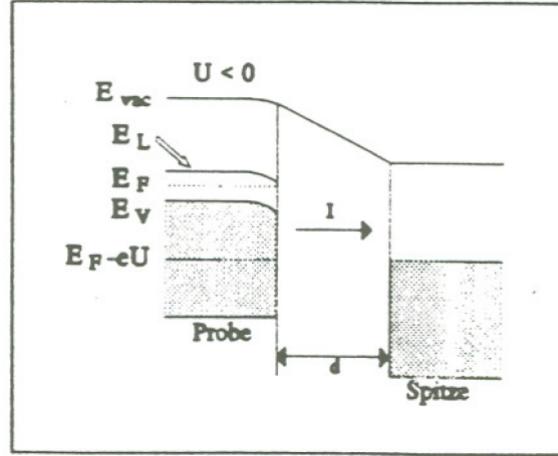


Abbildung 4: Tunneleffekt zwischen Halbleiter und Metall bei negativer Spannung gegenüber der Spitze.[4]

Deshalb kann die gerade verwendete Näherung nicht verwendet werden. In einer Erweiterung des Tersoff-Hamann-Modells lässt sich der Tunnelstrom I_T angeben als:

$$I_T \propto \int_{E_F}^{E_F + eU} \rho(\vec{r}_0, E) dE \quad (2)$$

1.3 Piezokristalle

Piezokristalle sind Kristalle, die durch anlegen einer Spannung ihre Form verändern. Dieser Effekt beruht darauf, dass sich die im Kristall enthaltenen elektrischen Dipole im elektrischen Feld ausrichten und dadurch für eine Längenvergrößerung des Kristalls in einer Richtung und zeitgleich für eine Längenkontraktion des Kristalls in einer anderen Richtung sorgen. Umgekehrt lässt sich mit Piezokristallen durch mechanisches Verformen auch eine Spannung erzeugen. Mit ihnen lässt sich eine präzise Bewegung der Nadel erzeugen.

1.4 Rückkopplung

Das RTM ist mit einem Rückkopplungssystem in Form eines elektronischen Regelkreises ausgestattet. Eine Erhöhung des Tunnelstroms führt zu einer Erhöhung des Abstands von der Probe. Umgekehrt wird der Abstand zwischen Spitzenecke und Probe bei Abnahme des Tunnelstroms verringert. Die Rückkopplung ermöglicht die Topographie der Oberfläche nachzufahren.

1.5 Arbeitsmodi des RTM

Ein RTM hat Grundsätzlich zwei Arbeitsmodi Constant Current Mode und Constant Height Mode".

1.5.1 Constant Current Mode

Beim Constant Current Mode wird der Tunnelstrom konstant gehalten und die Höhe verändert. Beim vermessen der Oberfläche wird eine Spannung U_z verwendet welche ein Maß für die absolute Höhe der Spitzenecke über der Probe ist. Die Methode ist genauer aber da die Nadel vorsichtig beim überqueren der Oberfläche seien muss ist die Methode recht langsam.

1.5.2 Constant Height Mode

Beim Constant Height Mode wird die der Abstand zur Oberfläche konstant gehalten. Die Topografie wird daher durch die Veränderung des Tunnelstroms vermessen. Die Methode ist nur nützlich wenn die Oberfläche relativ glatt ist da in dieser Methode die Spitzenecke nicht in der Lage ist auszuweichen. Der Vorteil ist dass sie schneller ist als der Constant Current Mode.

1.6 Graphit

Graphit gehört den Halbmetallen an. Es besteht aus Schichten von sechseckig miteinander verknüpften sp^2 hybridisierten Kohlenstoffatomen. In der obersten Schicht gibt es zwei Gruppen von Kohlenstoffatomen, die im Folgenden als α - und β -Atome bezeichnet werden. Die α -Atome der obersten Schicht liegen direkt über einem Atom der zweiten Schicht. Die β -Atome der obersten Schicht hingegen liegen über 'Löchern' der zweiten Schicht. Abbildung 5 zeigt die Struktur von Graphit. Die Kopplung der β -Atome bewirkt eine Absenkung der Energie der Energie dieser Atome. Da nur Elektronen nahe der Fermienergie am Tunnelprozess teilhaben, kann man erwarten, dass das RTM eine dreieckige Struktur aus β -Atomen, statt einer sechseckigen Struktur darstellt.

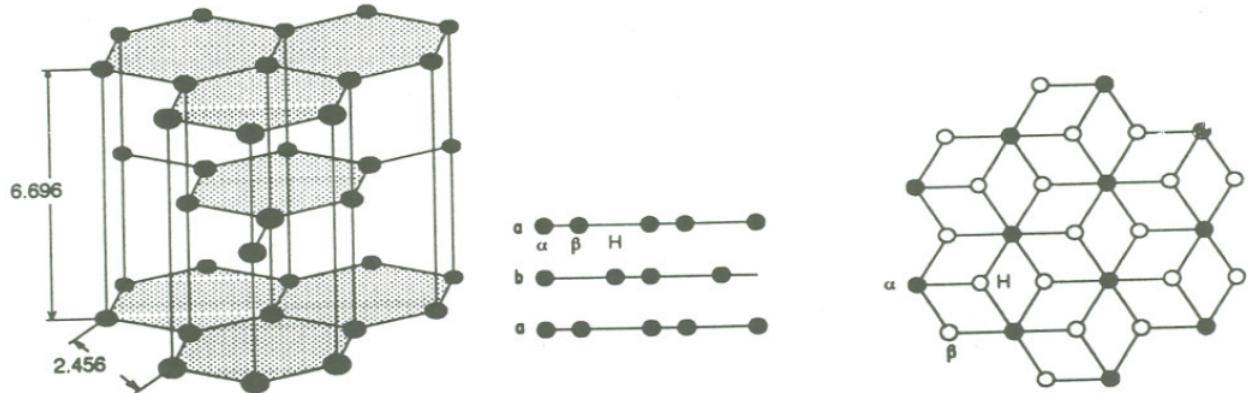


Abbildung 5: Aufbau von Graphit so wie Aufteilung in α und β -Atome

1.7 Gold

Gold als ein Metall hat eine Leitfähigkeit welche durch frei bewegliche Elektronen entsteht. Diese machen jedoch die Messung schwer da sich eine Art Elektronengas bildet. Es ist daher leichter die Oberfläche in einem größeren Bereich anzuschauen in Form von Elektronen Wolken zu beobachten. Ein Beispiel ist hier aus der Anleitung[1] in Abbildung 6 zu sehen.

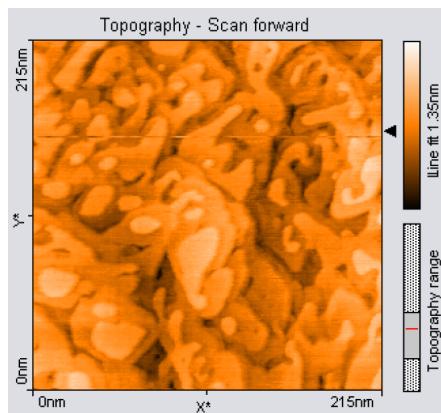


Abbildung 6: Beispiel für die erwartete Elektronenwolken Struktur bei Gold.

1.8 Molybdändisulfid

Molybdändisulfid ist ein Vertreter der Halbleiter. MoS_2 ist schichtartig aufgebaut. Auf eine Schicht Molybdändisulfid folgen jeweils zwei Schichten Schwefel. Die Schwefelatome sind in Form eines Gitters mit einer Gitterkonstanten $g = 3.16\text{ \AA}$ angeordnet. Die Molybdändisulfid-Schichten sind dazu seitlich versetzt und werden durch Van-der-Waalskräfte zusammengehalten.

2 Versuchsdurchführung

Für den Versuch wurde als erstes das RTM und ein Computer zum Auslesen der Informationen eingeschaltet. Zur Erstellung der Spitze, welche zur Abtastung verwendet wird, wird PtIr Draht verwendet. Hierfür muss der Draht so abgetrennt werden, dass die Spitzenspitze wenige Atome dick ist. Um die Güte der Spitzenspitze zu testen wurde die Probe erst einmal an einer Graphit Probe getestet, da diese besonders leicht zu untersuchen ist. Hierfür wird eine Graphit Probe an einem Magneten befestigt welcher dann in das RTM eingesetzt wird. Diese wird dann auf ein paar Millimeter von Hand herangeschoben. Danach wird die Probe mechanisch langsam herangefahren bis man über einen Spiegel keine Lücke zwischen Probe und Spitzenspitze erkennen kann. Es ist jedoch Vorsicht geboten da die Spitzenspitze nicht die Probe berühren darf, da dies die Spitzenspitze zerstören würden. Ab diesem Punkt wurde die Approach Methode des RTM genutzt, welche die Probe den restlichen Weg an die Spitzenspitze fährt. Dies geht solange bis das System ein Bild anzeigt. Wenn dies trotz beendeten Approach nicht der Fall ist muss entweder eine neue Spitzenspitze erstellt werden oder der Vorgang erneut gestartet werden. Sobald ein Bild erkannt wird kann getestet werden ob die Spitzenspitze sinnvoll ist oder nicht. Hierfür wurden Hinweise aus der Betriebsanleitung des Geräts verwendet[2]. Als Modus des RTM wird Constant Current Mode verwendet. Dies erlaubt drei Weitere Einstellung unter z-Einstellung. Diese sind P,I und D-Gain welche die Trajektorie der Spitzenspitze verändern und damit das Bild verbessern. Sollten diese auch zu nichts führen muss eine neue Spitzenspitze verwendet werden.

Nach dem Testen einiger Spitzenspitzen wurde eine gute gefunden mit der die Oberfläche von Graphit gut Aufgelöst werden konnte. Danach wurde die Probe zurückgefahren und durch Gold ersetzt. Beim Heranfahren ist jedoch die Spitzenspitze gegen die Probe gefahren und eine neue Spitzenspitze musste erstellt werden und erneut an Graphit getestet werden. Nach dem dies gelang wurden letztendlich auf Gold vermessen bei dem eine Wolken ähnliche Struktur gesehen wurde. Hier wurden für mehrere z- Einstellungen Messungen gespeichert. Als letztes wurde die Molybdändisulfid Probe vermessen. Hier wurde jedoch schnell klar das die Nadel nicht geeignet war die Oberfläche sinnvoll aufzulösen.

3 Auswertung

3.1 Graphit

Für Graphit soll der Gitterparameter $a = 2.456 \text{ nm}$ bestimmt werden welcher in links in Abbildung 5 eingezeichnet ist. Dieser Parameter beschreibt den Abstand zwischen zwei α oder β Atomen. Hierfür wurden die in Abbildung 7, 8 dargestellten Messungen von den beiden funktionierenden Spitzenspitzen verwendet. Hierbei wurde das Programm Gwyddion verwendet um die Abstände der Atome zu bestimmen. Um Fehler zu verringern werden mehrere Atomabstände a auf einmal gemessen. Der Fehler auf den Abstand x_{Abst} wurde auf $\sigma_x = 0.05 \text{ nm}$ geschätzt.

$$a = \frac{x_{Abst}}{n} \quad (3)$$

$$\sigma_a = \frac{\sigma_x}{n_{Atome}}$$

Die Einzelnen Werte für x_{Abst} sind in Tabelle 1 notiert.

| Abbildung | Messreihe | Abstand x_{Abst} [nm] | Anzahl an Atome – 1 | Gitterparameter a [nm] |
|----------------------|-----------|-------------------------|---------------------|--------------------------|
| Erste Spitzenspitze | 1 | 2.22 ± 0.05 | 7 | 0.278 ± 0.006 |
| Erste Spitzenspitze | 2 | 1.92 ± 0.05 | 6 | 0.274 ± 0.007 |
| Erste Spitzenspitze | 3 | 3.45 ± 0.05 | 10 | 0.314 ± 0.005 |
| Erste Spitzenspitze | 4 | 3.77 ± 0.05 | 11 | 0.314 ± 0.004 |
| Zweite Spitzenspitze | 1 | 2.29 ± 0.05 | 8 | 0.254 ± 0.006 |
| Zweite Spitzenspitze | 2 | 3.97 ± 0.05 | 14 | 0.2647 ± 0.0033 |
| Zweite Spitzenspitze | 3 | 2.84 ± 0.05 | 10 | 0.258 ± 0.005 |
| Zweite Spitzenspitze | 4 | 2.55 ± 0.05 | 9 | 0.255 ± 0.005 |
| Zweite Spitzenspitze | 5 | 1.82 ± 0.05 | 6 | 0.260 ± 0.007 |

Tabelle 1: Messung

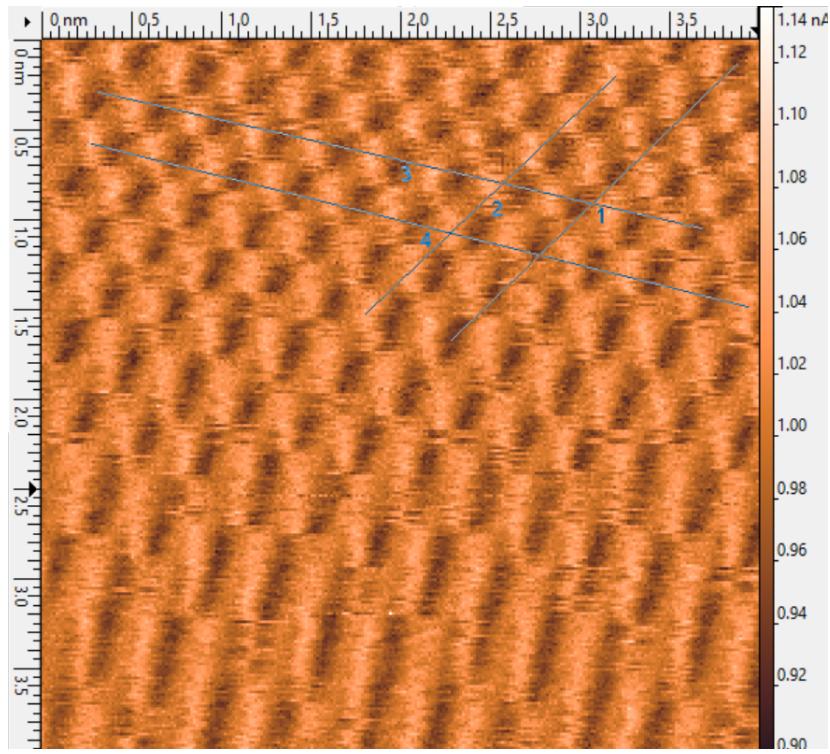


Abbildung 7: Graphit Messung der ersten Spalte mit 4 Messreihen bei 4 nm. Die Parameter bei dieser Messung waren: $P = 4500$, $I = 500$, $D = 0$, $\frac{P}{L} = 256$ und $\frac{T}{L} = 0.2$ s.

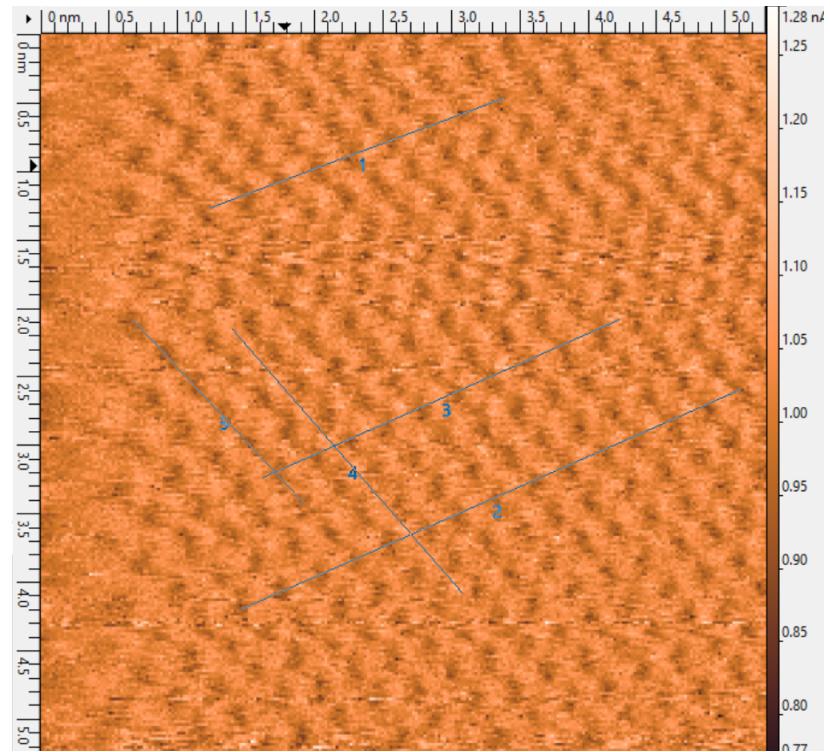


Abbildung 8: Graphit Messung der zweiten Spalte mit 5 Messreihen bei 5.3 nm. Die Parameter bei dieser Messung waren: $P = 2300$, $I = 400$, $D = 0$, $\frac{P}{L} = 256$ und $\frac{T}{L} = 0.1$ s.

Aus den Werten Gitterparametern wird nun der Mittelwert berechnet und dessen Fehler mit Gleichung 4.

$$\sigma_{\bar{x}} = \sqrt{\frac{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}} \quad (4)$$

Hiermit ergeben sich für Abbildung 7 mit Spalte eins und Abbildung 8 von Spalte zwei folgende Werte:

$$a_{S1} = (0.295 \pm 0.011) \text{ nm}$$

$$a_{S2} = (0.2585 \pm 0.0019) \text{ nm}$$

3.2 Gold

Beim nutzen der Nadel für Gold konnte nach Einstellen des z-Controller eine Abbildung gefunden werden welche Elektronen Wolken abbildete. Diese ist in Abbildung 9 zu finden.

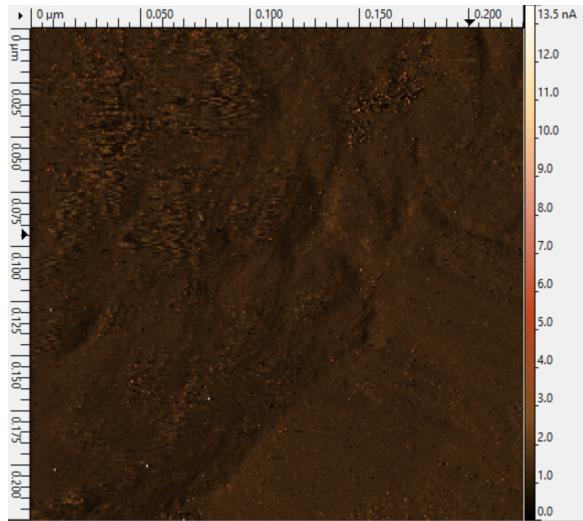


Abbildung 9: Messung für die Goldprobe mit möglicher Weise erkennbaren Elektronenwolken. Einstellgrößen waren für diese Messung: $P = 2500$, $I = 400$, $D = 0$, $\frac{P}{L} = 256$ und $\frac{T}{L} = 0.3 \text{ s}$.

Zusätzlich wurden für Gold mehrere Messungen durchgeführt mit unterschiedlichen Einstellungen von P-Gain D-Gain und I-Gain Einstellungen. Leider konnte aus den Aufnahmen keine Sinnvollen Schlüsse gezogen werden, da sie sich scheinbar unregelmäßig veränderten. Die Abbildungen sind der Vollständigkeit halber im Anhang zu finden.

3.3 Molybdändisulfid

Auch für Molybdändisulfid wurde die Nadel getestet. Hier wurde jedoch kein gute Auflösung für die Atomare Struktur gefunden. Außerdem ist wie in Abbildung 10 und 11 zu erkennen ist die Nadel vermutlich nicht gut genug gewesen. Dies lässt sich an dem eher Streifen artigen Muster erkennen.

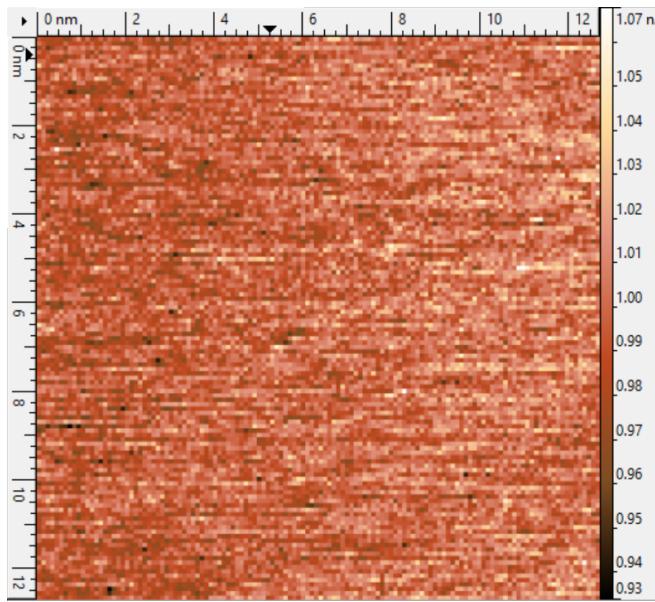


Abbildung 10: Messung von Molybdändisulfid bei 12.7 nm mit $P = 3900$, $I = 800$, $D = 0$, $\frac{P}{L} = 128$ und $\frac{T}{L} = 0.1$ s.

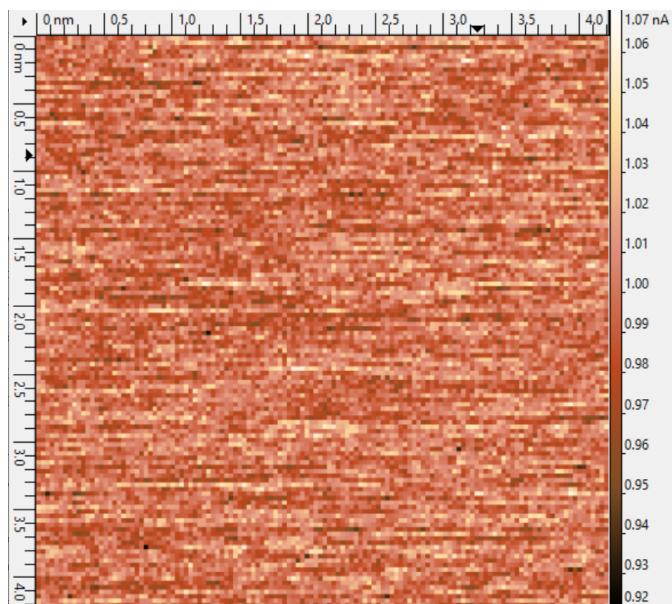


Abbildung 11: Messung von Molybdändisulfid bei 4.22 nm mit $P = 3900$, $I = 800$, $D = 0$, $\frac{P}{L} = 128$ und $\frac{T}{L} = 0.1$ s.

4 Diskussion

4.1 Aufgetretene Probleme und Mögliche Fehlergründe

Als aller erstes ist natürlich die Spitze ein Grund für Ungenauigkeiten und Fehler. Dies liegt daran das der Herstellungsprozess bei der, der Draht auf eine Spitzte mit wenigen Atomen gekürzt wird recht unzuverlässig ist und es zu großen Teilen auf Glück basiert ob man eine funktionierende Spitzte erhält.

Zusätzlich hat das Testen einer Nadel recht viel Zeit gekostet da das heranfahren oftmals mehrere Versuche gekostet hat. Hierbei konnte es zusätzlich leicht passieren dass die Spitzte an die Probe geriet und dabei unbrauchbar wurde.

Als weitere mögliches Fehlerquelle welches auftreten kann ist die Qualität der Proben. Diese können entweder verunreinigt sein oder durch Fett oder Kratzer unbrauchbar werden. Bei den hier verwendeten Proben war dies jedoch eher eine geringere Fehler Quelle da die Proben besonders die Graphit Probe relativ neu waren.

Eine weiterer Grund für schlechte Ergebnisse können die Einstellungen des z-Controllers sein, welche großen Einfluss auf die Auflösung der Messung haben. Auch die Einstellungen für Pixel/Line und Time/Line können erhebliche Auswirkungen haben.

Ein Systematischer Fehler welcher besonders bei der ersten funktionierenden Nadel Probleme bereitet hat war der Thermische Drift. Dieser ist besonders in Abbildung 7 gut an dem scheinbaren länger werden der Atome nach unten hin zu erkennen. Hierbei können schon 0.1°C zu einer Längenänderung des Probenhalters von mehreren Nanometern führen[2].

Letztlich sind noch mechanische oder elektrische Störungen als Fehlerquellen zu vermerken. Der Aufbau z.B reagiert sehr empfindlich auf Stöße wie das stoßen gegen den Tisch des Versuchsaufbaus. Elektrische Störungen könnten Theoretisch durch Teilchen entstehen welche in den Versuchsaufbau gelangen.

4.2 Ergebnisse

Die zwei für Graphit berechneten Gitterparameter sind:

$$a_{S1} = (0.295 \pm 0.011) \text{ nm}$$

$$a_{S2} = (0.2585 \pm 0.0019) \text{ nm}$$

Der erwartete Literatur Wert liegt bei, $a = 0.2456 \text{ nm}$. Wenn man diesen mit der Formel 5 vergleicht erhält man für $a_{S1} t = 4.49$ und für $a_{S2} t = 6.79$. Beide Werte sind unverträglich mit dem Literaturwert. Dies lässt sich für a_{S1} durch den Thermischen Drift erklären welcher hier die Messwerte in y Richtung stark auseinander gezogen hat. Der Grund warum der Mittelwert hier jedoch trotzdem noch besser ist wie der von a_{S2} , trotz größerer Differenz, liegt an dem großen Fehler welcher durch die die eben genannten Messreihen verursacht wurde. Aus diesen Gründen sollte der Wert von $a_{S2} = (0.2585 \pm 0.0019) \text{ nm}$ trotz schlechterem Vergleichswert der genauere sein.

$$t = \frac{|x_{\text{Messung}} - x_{\text{Literatur}}|}{\sigma_x} \quad (5)$$

Für Gold konnte eine Aufnahme gewonnen werden bei der man die erwarteten Elektronen Wolken erkennen konnte. Jedoch sind sie nicht besonders gut aufgelöst. Dies liegt vermutlich an noch nicht genug optimierten z-Controller Einstellungen und der wahrscheinlich doch nicht ganz so guten Spitzte. Diese würde auch das nicht erkennbare Molybdändisulfid so wie einen weiteren möglichen Systematischen Fehler für die Gitterstruktur bei Graphit.

5 Tabellen

Tabellenverzeichnis

| | | |
|---|---------------------|---|
| 1 | Messwerte | 5 |
|---|---------------------|---|

6 Bilder

Abbildungsverzeichnis

| | | |
|----|---|----|
| 1 | Tunneleffekt bei einer Potentialbarriere $V(x)$ [3] | 2 |
| 2 | Tunneleffekt zwischen Leiter und Spitze bei Metallen | 2 |
| 3 | Tunneleffekt zwischen Halbleiter und Metall bei positiver Spannung gegenüber der Spitze.[4] | 3 |
| 4 | Tunneleffekt zwischen Halbleiter und Metall bei negativer Spannung gegenüber der Spitze.[4] | 3 |
| 5 | Graphit | 4 |
| 6 | Beispiel für die erwartete Elektronenwolken Struktur bei Gold. | 4 |
| 7 | Messung von Graphit bei Spitze 1 | 6 |
| 8 | Messung von Graphit bei Spitze 2 | 6 |
| 9 | Messung von Gold | 7 |
| 10 | Messung von Molybdändisulfid 1 | 8 |
| 11 | Messung von Molybdändisulfid 2 | 8 |
| 12 | Parameter Änderung 1 | 11 |
| 13 | Parameter Änderung 2 | 11 |
| 14 | Parameter Änderung 3 | 12 |
| 15 | Parameter Änderung 4 | 12 |
| 16 | Parameter Änderung 5 | 13 |
| 17 | Parameter Änderung 6 | 13 |
| 18 | Parameter Änderung 7 | 14 |
| 19 | Parameter Änderung 8 | 14 |
| 20 | Parameter Änderung 9 | 15 |
| 21 | Parameter Änderung 10 | 15 |
| 22 | Parameter Änderung 11 | 16 |
| 23 | Parameter Änderung 12 | 16 |
| 24 | Parameter Änderung 13 | 17 |
| 25 | Parameter Änderung 14 | 17 |
| 26 | Labor Mitschrieb Teil 1 | 18 |
| 27 | Labor Mitschrieb Teil 2 | 19 |
| 28 | Labor Mitschrieb Teil 3 | 20 |

7 Bibliography

Literatur

- [1] *Versuchsanleitung: Fortgeschrittenen Praktikum Teil 1 Rastertunnelmikroskop.*
- [2] Operating instructions: easyscan 2 stm, May 07.
- [3] Damian Lanzenstiel Patrick Munnich Markus Österle, Andrez Gockel. Experimentalphysik iii, 2019.
- [4] Dieter Ritzmann. Einrichtung eines versuchs:rastertunnelmikroskopie für das fortgeschrittenen-praktikum 2., Februar 1994.

8 Anhang

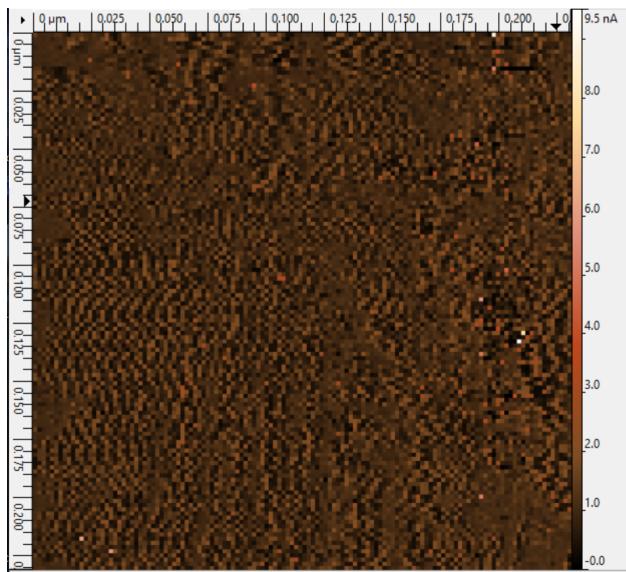


Abbildung 12: Bild von Gold bei Einstellungen des z-Controllers von: $P = 2400$, $I = 1000$, $D = 0$, $\frac{P}{L} = 128$ und $\frac{T}{L} = 0.4\text{s}$

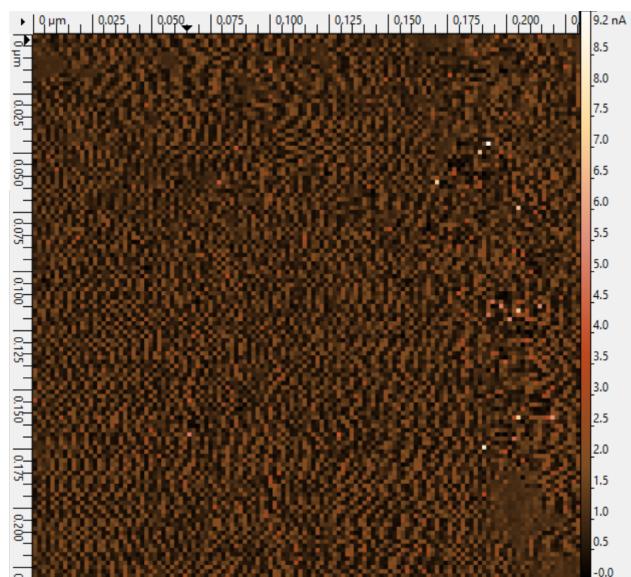


Abbildung 13: Bild von Gold bei Einstellungen des z-Controllers von: $P = 2900$, $I = 1000$, $D = 0$, $\frac{P}{L} = 128$ und $\frac{T}{L} = 0.4\text{s}$

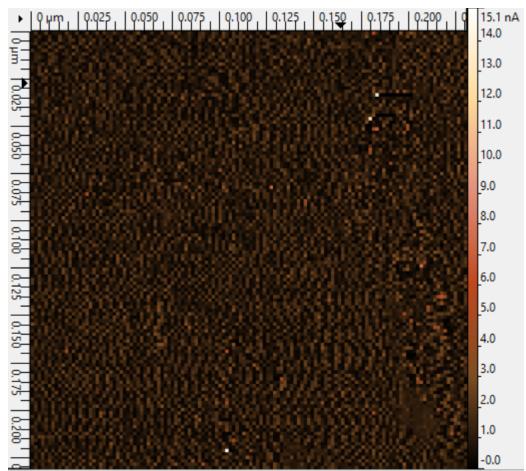


Abbildung 14: Bild von Gold bei Einstellungen des z-Controllers von: $P = 3400$, $I = 1000$, $D = 0$, $\frac{P}{L} = 128$ und $\frac{T}{L} = 0.4\text{s}$

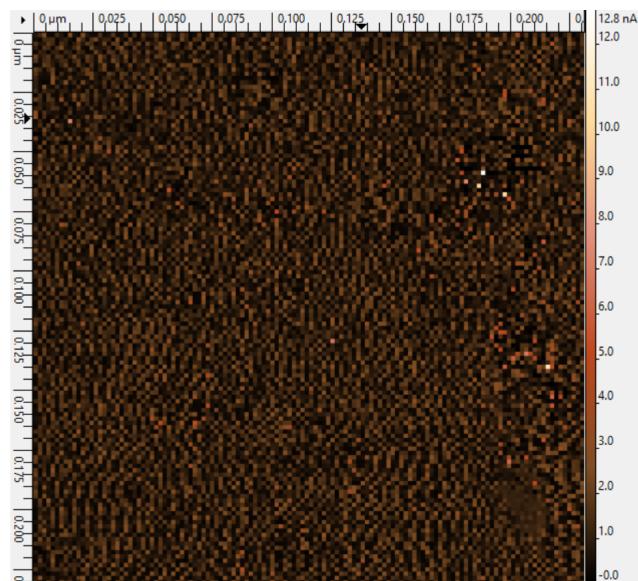


Abbildung 15: Bild von Gold bei Einstellungen des z-Controllers von: $P = 3900$, $I = 1000$, $D = 0$, $\frac{P}{L} = 128$ und $\frac{T}{L} = 0.4\text{s}$

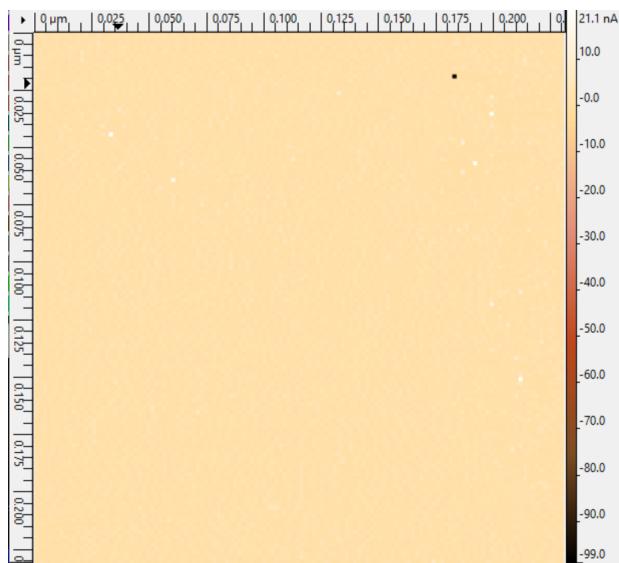


Abbildung 16: Bild von Gold bei Einstellungen des z-Controllers von: $P = 4400$, $I = 1000$, $D = 0$, $\frac{P}{L} = 128$ und $\frac{T}{L} = 0.4\text{s}$

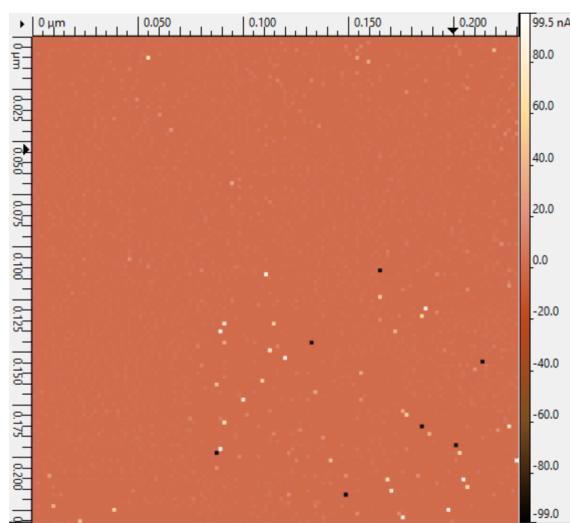


Abbildung 17: Bild von Gold bei Einstellungen des z-Controllers von: $P = 6300$, $I = 1000$, $D = 0$, $\frac{P}{L} = 128$ und $\frac{T}{L} = 0.4\text{s}$

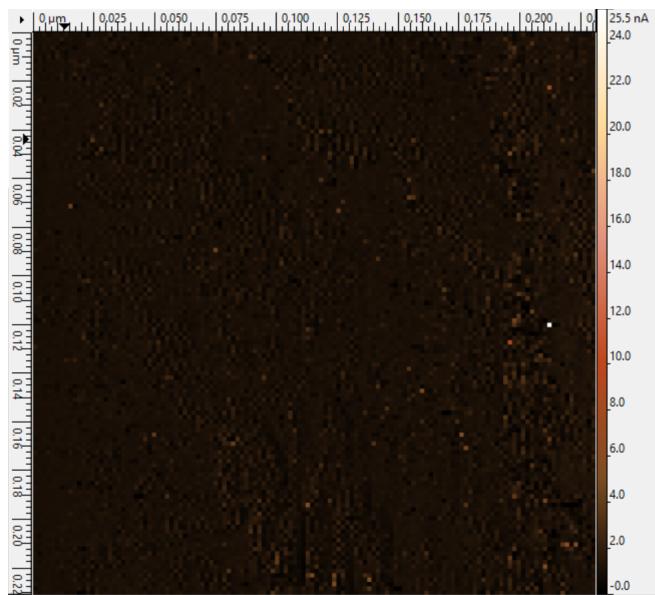


Abbildung 18: Bild von Gold bei Einstellungen des z-Controllers von: $P = 2400$, $I = 1800$, $D = 0$, $\frac{P}{L} = 128$ und $\frac{T}{L} = 0.4\text{s}$

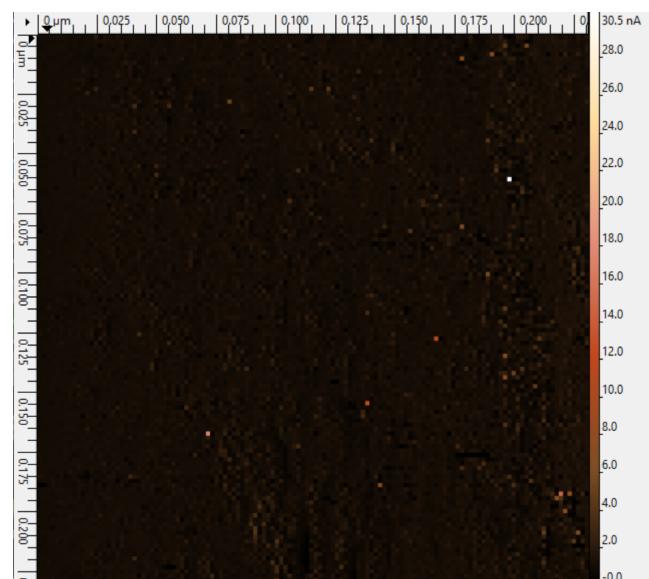


Abbildung 19: Bild von Gold bei Einstellungen des z-Controllers von: $P = 2400$, $I = 1600$, $D = 0$, $\frac{P}{L} = 128$ und $\frac{T}{L} = 0.4\text{s}$

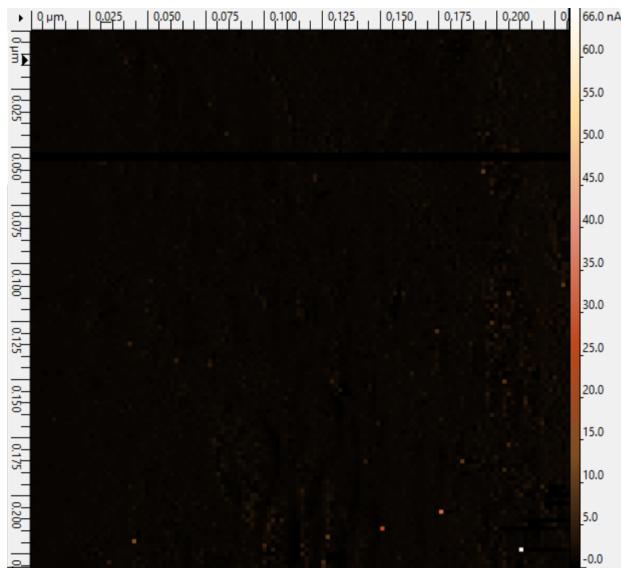


Abbildung 20: Bild von Gold bei Einstellungen des z-Controllers von: $P = 2400$, $I = 1400$, $D = 0$, $\frac{P}{L} = 128$ und $\frac{T}{L} = 0.4\text{s}$

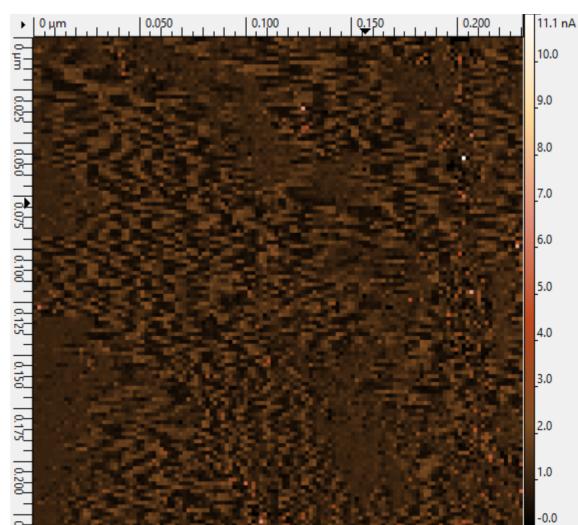


Abbildung 21: Bild von Gold bei Einstellungen des z-Controllers von: $P = 2400$, $I = 1200$, $D = 0$, $\frac{P}{L} = 128$ und $\frac{T}{L} = 0.4\text{s}$

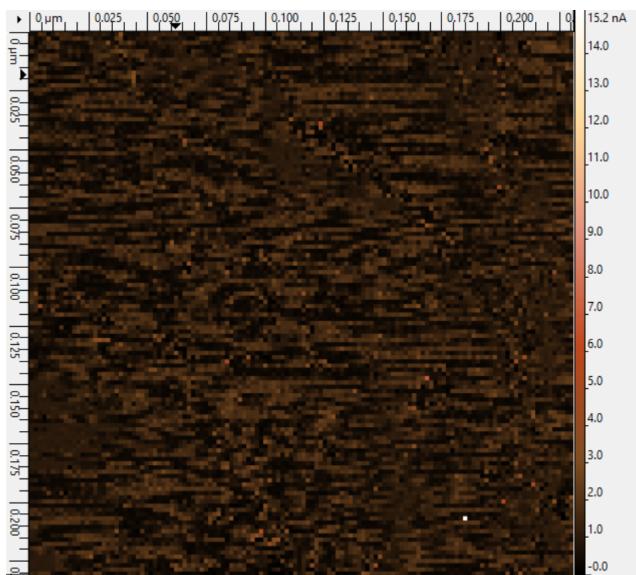


Abbildung 22: Bild von Gold bei Einstellungen des z-Controllers von: $P = 2400$, $I = 1100$, $D = 0$, $\frac{P}{L} = 128$ und $\frac{T}{L} = 0.4\text{s}$

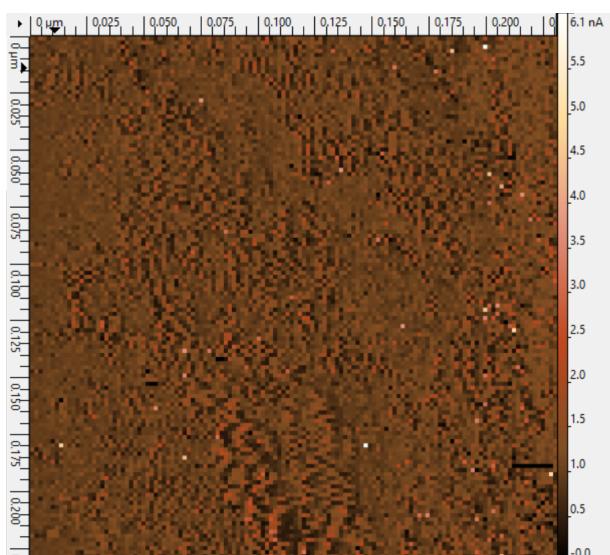


Abbildung 23: Bild von Gold bei Einstellungen des z-Controllers von: $P = 2400$, $I = 1000$, $D = 500$, $\frac{P}{L} = 128$ und $\frac{T}{L} = 0.4\text{s}$

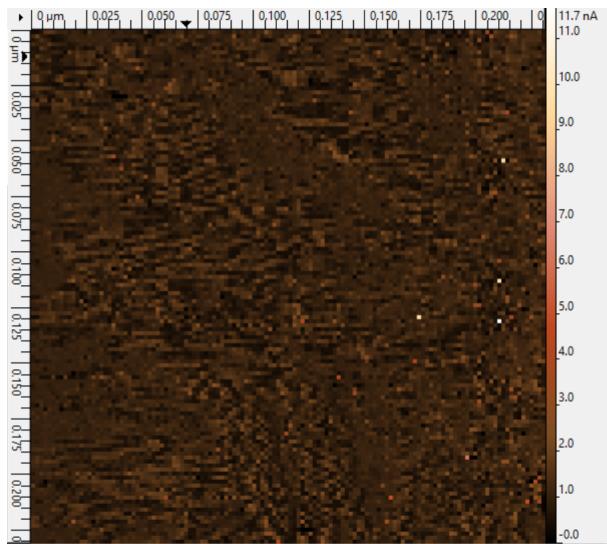


Abbildung 24: Bild von Gold bei Einstellungen des z-Controllers von: $P = 2400$, $I = 1000$, $D = 1000$, $\frac{P}{L} = 128$ und $\frac{T}{L} = 0.4\text{s}$

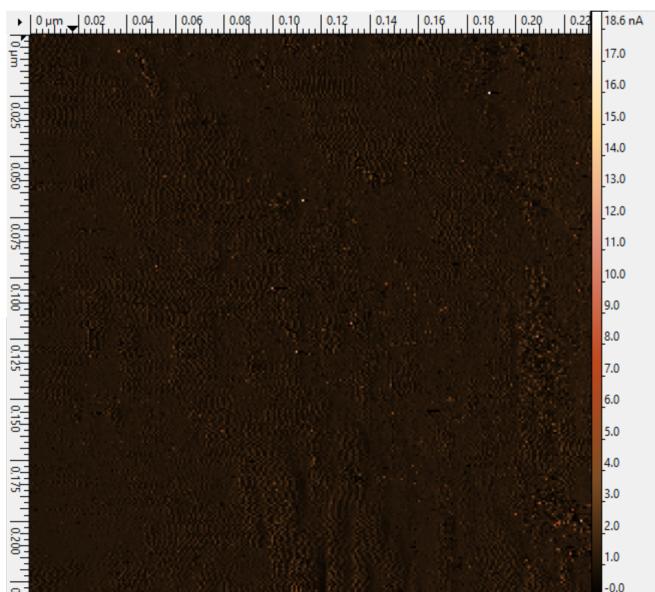


Abbildung 25: Bild von Gold bei Einstellungen des z-Controllers von: $P = 2400$, $I = 1000$, $D = 0$, $\frac{P}{L} = 256$ und $\frac{T}{L} = 0.4\text{s}$

| Versuch: Rasterfuttle | | |
|-----------------------|---|------------|
| Time | Description | |
| 10:26 | Testing different Drills for the Measurement | |
| 10:48 | Möglicherweise gute gefunden. Testen vom Zoom (Zoom 27 nm Order Range 0.1nm) | |
| 11:15 | Schönes Bild nicht reproduzierbar (Nadel geschrägt :)) Einige Nadeln noch ohne Später Bilder (wenig Rauheiten) 25 nm.nid | |
| | Nach Zoom auf 6 nm Bilder verloren -> herausnehmen -> große Strukturen erkennbar, Position von Gitter verändert -> approach -> SP. rec. erweitert | |
| 13:39 | Images for 4 nm speichern in spalte 4 | |
| | 4nm - 1. nid P-Gain: 12136 I-Gain: 10000 256 $\frac{P}{Line}$ 0,25 $\frac{Time}{Line}$ | |
| | - 2. nid P-Gain: 10000 I-Gain: 2000 256 $\frac{P}{Line}$ 0,25 $\frac{Time}{Line}$ | |
| | - 3 - 4 not succ possible similar to B | |
| | - 5. nid P: 4100 12500 256 $\frac{P}{Line}$ 0,3 $\frac{Time}{Line}$ | |
| ? | - 6. nid 2nm P4000 1200 0,1 $\frac{Time}{Line}$ 256 $\frac{P}{Line}$ | { Hardbild |
| | 2nm - 1. nid P: 4000 1.200 0,3 $\frac{Time}{Line}$ 256 $\frac{P}{Line}$ | { |
| | moving the position | |
| | 4,5nm - 01. nid P4000 1200 0,3 $\frac{Time}{Line}$ 128 $\frac{P}{Line}$ | |
| | 4,5nm - 02. nid -/- -/- | |

Abbildung 26: Labor Mitschrieb Teil 1

in 2nm-2>2nm-01.nid P: 4000 I: 200
 $0,15 \frac{I}{L}$ $128 \frac{P}{L}$

2nm-02.nid -II-

2nm-03.nid -II- $256 \frac{P}{L}$ Handybild

2nm-04.nid -II- unten nach oben

2nm-05.nid -II- $128 \frac{P}{L}$ unten nach oben

Moon Data

2nm-06.nid -II- 180° unter nach oben

2nm-07.nid -II- 180° oben nach unten

neue Nadel

2,34nm-01.nid P: 400 I: 200
 $0,15$ $128 \frac{P}{L}$ 0% verschw.
 P-Gain 4000 I-Gain 200

07/11 Nächster Tag

2,34nm-01.nid P: 2200 I: 1100
 $D: 1000$ Handybild
 $256 \frac{P}{L}$ $0,15 \frac{I}{L}$

2,34nm-02.nid P: 2200
 2 2

2,34nm-03.nid P: 2300 I: 400 D: 0
 $256 \frac{P}{L}$ $0,15 \frac{I}{L}$ onu

2,34nm-04.nid -II- & uno
 5,3
~~2,34nm-05.nid~~ -II- onu

5,3 nm-02.nid -II- onu Handy

Abbildung 27: Labor Mitschrieb Teil 2

| Data | |
|-------|--|
| 9:48 | Starting measuring Gold approach worked FullScreen.nid in folder gold |
| | P: 2500 Tip Voltage: 499,8 mV I: 400 T/L 0,35 $\frac{P}{L} 250$ |
| | 225nm - 01.nid -//- |
| | changing position |
| | 239nm - 01.nid P 2400 I 1000 D0 $\frac{T}{L} 0,45 \frac{P}{L} 128$ |
| | 231nm - 02.nid P 2900 -//- Handy |
| | 03.nid P 3400 -//- |
| | 04.nid P 3900 -//- |
| | 05.nid P 4400 -//- image errors |
| | 06.nid P 6300 -//- feels unstable |
| | 07.nid P 2400 1800 |
| | 08.nid P 2400 1600 |
| | 09.nid -//- 1400 -//- |
| | 10.nid 11200 |
| | 11.nid 11700 |
| | 12.nid P 2400 11000 D 500 |
| | 13.nid -//- D 1000 |
| | 14.nid P 2400 17000 D0 $\frac{P}{L} 250$ |
| 12:40 | Mos2 93nm - 01.nid P 3900 1800 D0 $\frac{P}{L} 128 \frac{D}{L} 9,7$ |
| | 127nm - 01.nid -//- |
| | 4,22nm - 01.nid -//- |
| | - 02.nid P 3000 1500 D 700 -//- |

Abbildung 28: Labor Mitschrieb Teil 3