

Inhaltsverzeichnis

| | |
|--|-----------|
| 1. Aufgaben | 3 |
| 2. Theoretische Grundlagen | 4 |
| 2.1. Mikroskop Typen | 4 |
| 2.1.1. Lichtmikroskop | 4 |
| 2.1.2. Elektronenmikroskop | 4 |
| 2.1.3. Feld-Emissionsmikroskop | 4 |
| 2.1.4. Akustisches Mikroskop | 4 |
| 2.1.5. Rastertunnelmikroskop (STM) | 5 |
| 2.1.6. Rasterkraftmikroskop | 6 |
| 2.2. Tunneleffekt | 6 |
| 2.2.1. Tunneleffekt bei Leitern | 7 |
| 2.2.2. Tunneleffekt bei Halbleitern | 7 |
| 2.3. Leiter (Gold) | 8 |
| 2.4. Halbmetalle (Graphit) | 8 |
| 2.5. Halbleiter (Molybdändisulfid MoS ₂) | 9 |
| 2.6. Piezo Effekt | 9 |
| 3. Aufbau | 11 |
| 4. Durchführung | 11 |
| 5. Auswertung | 12 |
| 5.1. Graphit | 13 |
| 5.2. Gold | 14 |
| 5.3. MoS ₂ | 15 |
| 6. Zusammenfassung und Diskussion | 18 |
| A. Abbildungen | 19 |
| B. Literatur | 19 |

1. Aufgaben

In diesem Versuch sollen sich die Experimentatoren mit den Prinzipien eines Rastertunnelmikroskops vertraut machen:

- Spitzen aus einem Platin-Iridium Draht ziehen.
- Die Spitzen an einer Graphit Probe testen und diese dabei vermessen um den atomaren Abstand zu bestimmen.
- Anhand einer Goldprobe zeigen, dass man bei Leitern keine atomaren Strukturen auflösen kann, sondern nur die Elektronenwolken.
- Eine MoS₂ Probe untersuchen und durch Umpolung der anliegenden Spannung zwischen den beiden Atomsorten unterscheiden.

2. Theoretische Grundlagen

Die in diesem Kapitel benutzten Formeln und Erklärungen basieren auf [Ritz], sofern keine andere Quelle angegeben ist.

2.1. Mikroskop Typen

Mikroskope ermöglichen es Strukturen, die nicht mehr vom Auge aufgelöst werden können, zu untersuchen. Da die Proben dabei von der Größe eines Haares oder einer Pflanzenzelle sein können, aber auch in der Größenordnung von Atomen, ist es naheliegend, dass es auch verschiedene Arten von Mikroskopen gibt. Im Folgenden werden ein paar Arten von Mikroskopen vorgestellt.

2.1.1. Lichtmikroskop

Bei Lichtmikroskopen wird die Auflösung durch das sichtbare Licht beschränkt. Dies bedeutet, dass die Auflösung auf ca. 0.1 bis 0.2 μm beschränkt ist, da die Auflösung durch

$$A = \frac{\lambda}{2n}$$

gegeben ist. Die Wellenlänge ist λ und der Brechungsindex des Mediums ist n . Diese Art von Mikroskopen wird z.B. in der Biologie zur Beobachtung von Zellen, Bakterien und Viren benutzt.

2.1.2. Elektronenmikroskop

Elektronen können nicht nur als Teilchen, sondern auch als Wellen mit der de Broglie Wellenlänge

$$\lambda = \frac{h}{p}$$

gesehen werden (h ist das Plank'sche Wirkungsquantum, p der Impuls des Teilchens). Für diese ist es, mit einer hoch genügen Spannung ($U = 10\,000\text{ V}$), möglich eine Wellenlänge von unter 1 \AA zu erreichen. Die Fokussierung des Elektronenstrahls geschieht mit Hilfe eines Magnetfeldes. Man unterscheidet zwischen Transmission-Elektronen-Mikroskopen und Rasterelektronenmikroskopen. Beim ersten muss die Probe im Vakuum sein, um Streuung der Elektronen an Teilchen, die nicht zur Probe gehören, möglichst zu unterbinden. Beim zweiten wird die Intensität des reflektierten Elektronenstrahls gemessen, weshalb hier nicht leitende Proben mit einer Schicht aus Gold umgeben werden müssen. Dafür hat dieser Mikroskoptyp einen stärkeren Kontrast. Die erreichbare Auflösung ist in der Größenordnung von Atomen.

2.1.3. Feld-Emissionsmikroskop

Zu den Feld-Emissionsmikroskopen gehören das Feld-Emissionsmikroskop und das Feldionen-Mikroskop. Diese machen atomare Diffusion sichtbar. Dafür nutzt sie emittierte Elektronen bzw. Ionen von einer Spitze in einem stark beschleunigten elektrischen Feld. Dadurch werden die Teilchen von der Spitze weg beschleunigt, und bilden Flecken auf einem Schirm. Der Radius der Spitze und die Teilchenwellen-Beugung beschränken die Auflösung.

2.1.4. Akustisches Mikroskop

Der Vorteil von akustischen Mikroskopen ist, dass man mit ihnen mechanische Eigenschaften von Materialien sehr gut darstellen kann, da Schallwellen auch optisch undurchlässige Materialien durchdringen können. Es ist nötig, die Probe in eine Flüssigkeit zu legen, damit die

Schallwellen übertragen werden können. Dies führt dazu, dass die Auflösung durch die Beugung der Schallwellen beschränkt wird. Ist die Flüssigkeit Wasser, so erhält man eine Auflösung von $0.2 \mu\text{m}$.

2.1.5. Rastertunnelmikroskop (STM)

Dies ist der Mikroskop-Typ, welchen wir im Folgenden verwenden werden. 1986 erhielten seine Erfinder Heinrich Rohrer und Gerd Binnig den Nobelpreis für Physik [Lei]. Seine Funktionsweise basiert auf dem Tunneleffekt, der in Unterabschnitt 2.2 näher erläutert wird. Abbildung 1 veranschaulicht den Aufbau eines solchen Mikroskops.

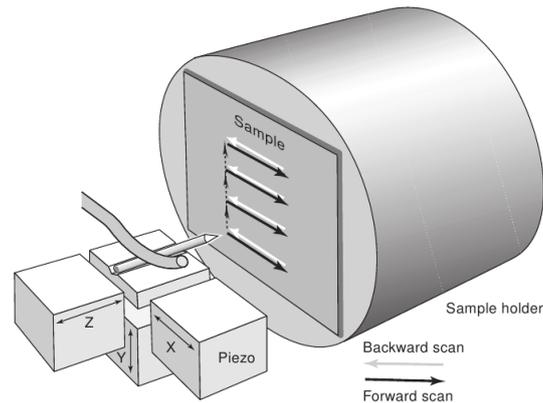


Abb. 1: Schematisches Bild eines STM [Nan].

Dabei wird ein angespitzter Draht (wir verwenden einen Platin-Iridium Draht) über die Probe bewegt. Die Spitze des Drahtes darf, um eine gute Auflösung zu bekommen, dabei nur ein Atom groß sein. Diese Spitze wird mit Piezo-Kristallen (siehe Unterabschnitt 2.6) bewegt, um die Probe ab zu fahren. Dabei tunneln Elektronen zwischen der Probe und der Spitze. Eine Abstandsänderung von 1 \AA bewirkt dabei eine Verzehnfachung des Tunnelstroms. Man unterscheidet verschiedene Betriebsmodi.

Beim Constant Height Mode wird der Abstand zwischen Probe und Spitze konstant gehalten (siehe Abbildung 2).

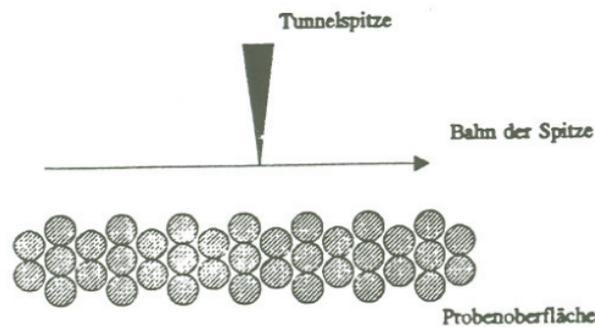


Abb. 2: Constant Height Mode [Ritz].

Dies erlaubt ein recht schnelles Abfahren der Probe. Es ist allerdings darauf zu achten, dass die Probe keine zu großen Höhenunterschiede hat, da es sonst passieren kann, dass die Spitze die Probe berührt, was beim STM nie passieren sollte. Was man also misst, sind verschiedene Transmissionsströme bei verschiedenen Höhen der Probe.

Ein anderer Modus ist der Constant Current Mode. Bei ihm folgt die Spitze den Konturen der Probe, weshalb der Transmissionsstrom immer gleich groß ist (siehe Abbildung 3).

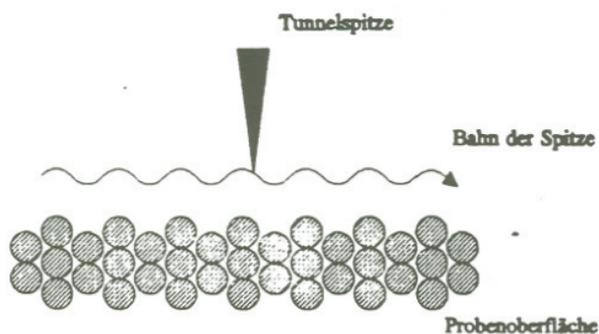


Abb. 3: Constant Current Mode [Ritz].

Die Variation der Höhe der Spitze wird durch eine Rückkopplung erreicht. Der Vorteil dieser Methode gegenüber dem Constant Height Mode ist, dass die Spitze eher nicht beim abfahren der Probe gegen diese stößt. Dafür dauern die Messungen länger, was zu einer stärkeren thermischen Anregung der Probe führen kann.

Weiterhin kann mit einem STM Spektroskopie betrieben werden, sowie die Austrittsarbeit gemessen werden.

2.1.6. Rasterkraftmikroskop

Ein ähnliches Mikroskop, wie das STM, ist das Rasterkraftmikroskop. Bei diesem wird der Abstand zwischen Spitze und Probe auf den inneratomaren Abstand reduziert. Dadurch befindet sich die Probe im abstoßenden Potential der Kerne. Durch Messung der Position der Spitze bekommt man ein Bild der Oberfläche. Der große Vorteil dieser Methode gegenüber dem STM ist, dass auch nicht leitende Objekte untersucht werden können.

2.2. Tunneleffekt

Der Tunneleffekt beschreibt einen quantenmechanischen Effekt, bei dem ein Teilchen eine endlich hohe Potentialbarriere überwinden kann, obwohl seine Energie geringer als die Barriere ist. Dazu geht man davon aus, dass Elektronen stehende Wellen in einem Potential bilden. In einer Potentialbarriere fällt die Energie des Elektrons exponentiell ab, wobei die Übergänge stetig und differenzierbar sind. Dies ist in Abbildung 4 zu sehen.

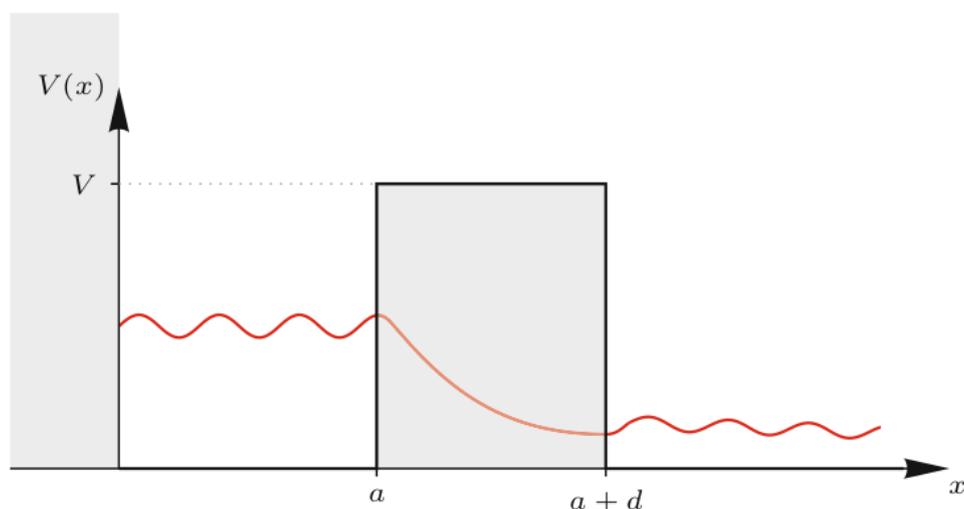


Abb. 4: Tunneleffekt an Potentialbarriere [Bar, Kapitel 26.2, S.858].

Damit hängt die Wahrscheinlichkeit, dass das Elektron tunnelt, von der Dicke der Barriere und der Energie des Elektrons ab. In den folgenden Abschnitten werden wir den Tunneleffekt bei Leitern und Halbleitern näher betrachten.

2.2.1. Tunneleffekt bei Leitern

Befindet sich eine Metallspitze in einer Entfernung von ca. 1 \AA zu einer Metallprobe, so können Elektronen von der Probe zur Spitze tunnelt (siehe Abbildung 5). Die Potentialbarriere wird dabei von der schlecht leitenden Luft zwischen Probe und Spitze gebildet.

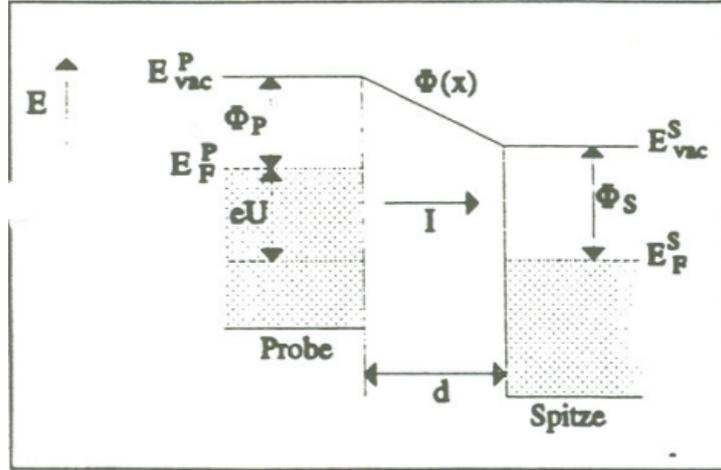


Abb. 5: Potentialbarriere zwischen Probe und Spitze [Ritz].

Der Tunnelstrom hängt dabei von der Dicke d der Tunnelbarriere und der effektiven Potentialhöhe Φ ab. Es gilt für $eU \ll \Phi$ und $sU \ll E_F$

$$I \propto U \cdot \exp\left(-\sqrt{\frac{2m\Phi}{\hbar}} d\right).$$

Auf Grund der geringen angelegten Spannung, können bei diesem Prozess nur Elektronen teilnehmen, die eine Energie nahe der Fermi-Energie besitzen. Weil es nur eine schwache Wechselwirkung zwischen Probe und Spitze gibt, wird der Tunnelstrom hier in der Störungstheorie in erster Ordnung betrachtet. Solange man kein externes Feld anlegt, enthält dies den Tunnelstrom in beide Richtungen. Betrachtet man eine ideale punktförmige Spitze, so misst man die lokale Zustandsdichte des Fermi-Niveaus an der Stelle, an der sich die Spitze befindet. Da in Wirklichkeit die Spitze eine Ausdehnung hat, nimmt man eine kugelförmige Spitze mit Radius R an. Befindet sich diese am Ort \vec{r}_0 , so kann der Tunnelstrom mit

$$I \propto U \exp(-2k(R+d)) \rho(\vec{r}_0, E_F)$$

berechnet werden. Mit der Ausdehnung lässt sich das Auflösungsvermögen mit

$$L \propto \sqrt{R+d}$$

bestimmen.

2.2.2. Tunneleffekt bei Halbleitern

Der Tunneleffekt mit Halbleitern hat einige Unterschiede zu dem bei Leitern. Dies liegt daran, dass das Fermi-Niveau bei diesen zwischen dem Valenz- und dem Leitungsband liegt und man

daher höhere Energien benötigt, um ein Elektron von einem Band in das andere zu bekommen. Wenn man eine Tunnelspannung $U > 0$ zwischen Halbleiter und der Spitze hat, tunneln Elektronen aus der Spitze in unbesetzte Zustände des Leitungsbandes in der Probe. Wenn die Spannung $U < 0$ ist, so ergibt sich ein Strom in die andere Richtung, von den besetzten Zuständen des Valenzbandes in die Spitze [Ritz]. Auf Grund der höheren Bandlücken-Spannung von Halbleitern gegenüber Metallen, sind nicht nur die Zustände am Fermi-Niveau, sondern auch die aus dem Energiebereich $[E_F, E_F + eU]$ am Tunneleffekt beteiligt.

2.3. Leiter (Gold)

In unserem Experiment werden wir unter anderem Gold untersuchen. Gold ist ein Leiter. Bei diesen können die Elektronen im Leiterband (eine Unterscheidung zum Valenzband gibt es nicht) nicht einem Atom zugeordnet werden, da sie frei sind. Dies macht es unmöglich atomare Strukturen aufzulösen. Stattdessen können Elektronenwolken beobachtet werden.

2.4. Halbmetalle (Graphit)

Graphit zählt zu den Halbmetallen. Halbmetalle sind Elemente, die sowohl Eigenschaften von Metallen, als auch von nicht-Metallen besitzen. Graphit besteht zum Beispiel aus übereinander liegenden Schichten aus sechseckig angeordneten Atomen. Diese Anordnung ist in Abbildung 6 dargestellt.

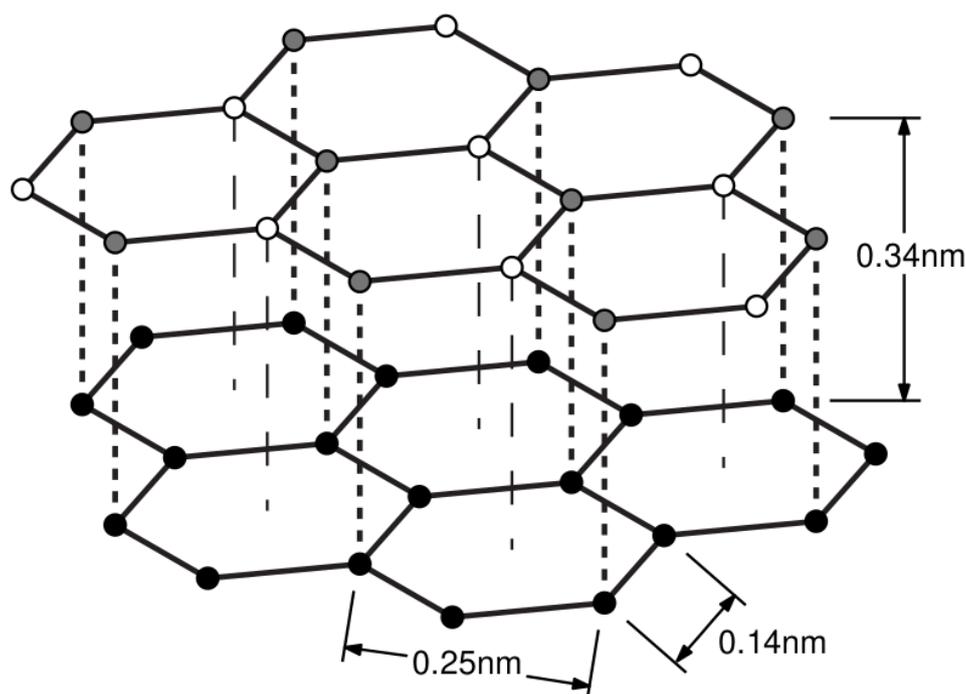


Abb. 6: Schichtstruktur von Graphit [Ritz].

Man erkennt in der oberen Lage, dass es Atome gibt, die direkt über anderen liegen, und welche, die keinen direkten Nachbarn in der Lage darunter haben. Erstere heißen α - und die Zweiten β -Atome. Auf Grund der größeren Nähe der α -Atome zu ihren Nachbarn, binden diese Elektronen fester an sich, weshalb diese Atome schwerer mit dem Rastertunnelmikroskop zu sehen sind. Parallel zu den Schichten können sich Elektronen frei bewegen, weshalb Graphit in diese Richtung leitend ist. Zwischen den Schichten können jedoch keine Elektronen wechseln. Dies ist auch der Grund, warum es möglich ist, im Gegensatz zu Metallen eine Oberflächenstruktur aufzulösen.

2.5. Halbleiter (Molybdändisulfid MoS_2)

Halbleiter unterscheiden sich von Metallen dadurch, dass es eine Bandlücke zwischen Valenz- und Leitungsband gibt. Um Elektronen über diese Lücke zu bekommen, muss man ihnen Energie zuführen, da die Fermikante zwischen den Bändern liegt. Aus diesem Grund besitzen die Atome Elektronen, die ihnen zugeordnet werden können, was es ermöglicht die Oberflächenstruktur aufzulösen. Die Struktur ist in Abbildung 7 zu sehen.

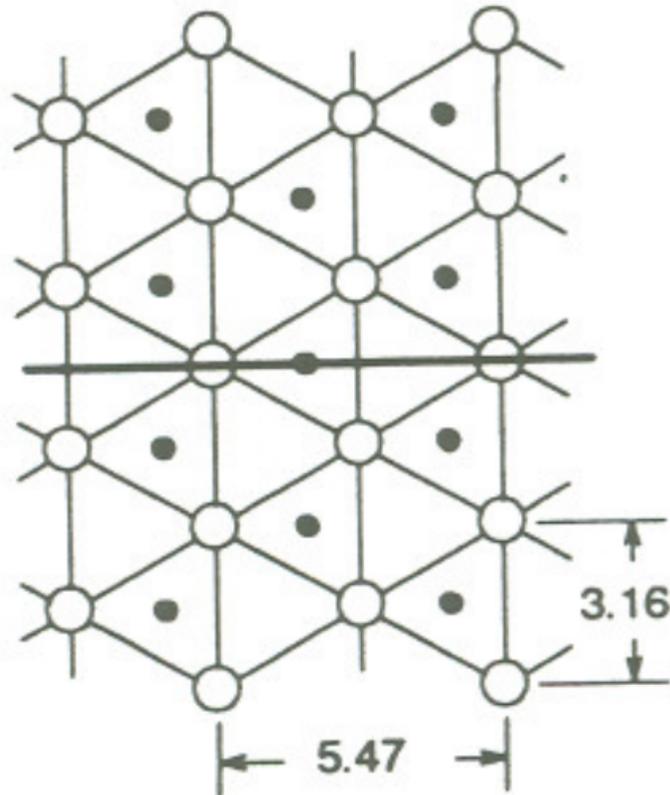


Abb. 7: Struktur von MoS_2 , Punkte: Mo, Kreise: S [Ritz].

Dabei liegen die Mo-Atome tiefer, als die S-Atome. Wodurch eine Schichtstruktur existiert, bei der sich Lagen von Molybdän und Schwefel abwechseln. Weil das eine Element als Elektronen-Akzeptor und das andere als Donator fungiert, hängt der im Mikroskop auflösbare Atomtyp von der Polung der Spannung zwischen Spitze und Probe ab.

2.6. Piezo Effekt

Der Piezo Effekt ermöglicht es, durch das Anlegen einer Spannung Kristalle mit bestimmter Gitterstruktur temporär zu verformen. Dies ist möglich, da diese Kristalle in ihrem Inneren ein permanentes elektrisches Feld besitzen. Wird nun von außen eine Spannung angelegt, so führt dies zu einer Neuausrichtung der Gitterstruktur und damit zu einer Verformung des Kristalls (siehe Abbildung 8).

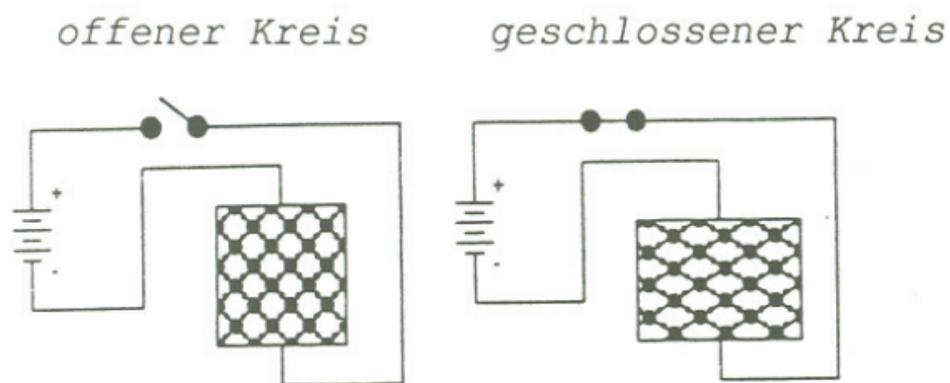


Abb. 8: Piezo Effekt eines Kristalls [Ritz].

Dies kann genutzt werden, um die Spitze eines Rastertunnelmikroskops mit einer Genauigkeit von weniger als einem \AA zu bewegen.

3. Aufbau

In diesem Versuch wird das Rastertunnelmikroskop Easyscan 2 der Firma Nanosurf verwendet (zu sehen in Abbildung 9). Es besteht aus einem gegen Vibration gedämpften Kopf in dem Spitze und Probe angebracht werden, einer Steuereinheit, die Spannung und Strom anlegt und, je nach Betriebsmodus diese rückkoppelt. Die Steuereinheit ist an einen PC angeschlossen, an dem sich mit der Software Easyscan 2 der Abstand von Probe zu Spitze, die anliegenden Ströme & Spannungen und Betriebsmodi einstellen und die Daten auslesen und in Echtzeit als Plot darstellen lässt.



Abb. 9: Versuchsaufbau nach [Ritz].

4. Durchführung

Es stehen eine Graphit, Gold und MoS_2 Probe zum vermessen zur Verfügung. Als Spitze wird ein Platin-Iridium Draht benutzt. Dieser muss in kleine (ca. 1 cm) Stücke geschnitten werden, mit einer Zange gehalten werden und mit der Kneifzange am anderen Ende gehalten werden und dann entzwei gezogen werden (nicht schneiden/abdrücken). Mit etwas Glück erhält man eine Spitze, die aus *einem* Atom besteht. Hat man dies geschafft, spannt man die Spitze in den Kopf ein. Die Probe wird an einen fusselreifen Metallzylinder magnetisch befestigt. Dieser Zylinder wird im Kopf auf die Halterung gelegt. Von Hand wird die Probe vorsichtig nahe an die Spitze geschoben. Mittels einer Lupe in der Abdeckung des Kopfs lässt sich das relativ gut bewerkstelligen. Mit dem Messprogramm fährt man die Probe noch näher heran, bis man die automatische Annäherung anstellen kann. Dafür muss man den Tunnelstrom und die Spannung die an der Spitze anliegt auswählen. Das Programm fährt die Spitze nun so Nah an die Probe, bis der eingestellte Tunnelstrom gemessen wird. Danach drückt man auf Start und die Nadel fährt einen einstellbaren Bereich ab.

Da es nur bei Graphit einigermaßen einfach ist, die Struktur erkennen, sollte man jede neue Nadel erst an dieser Probe testen.

5. Auswertung

Mittels des Programms Gwyddion lassen sich die aufgenommenen .nid Dateien (Abbildung 10) auswerten. Zuerst wird ein Filter über die Daten gelegt, welcher die Daten durch Subtraktion der Mittelwertebene nivelliert (Abbildung 11). Als nächstes lassen wir einen weiteren Filter drüber laufen, welcher horizontale Fehlerzeilen korrigiert (Abbildung 12).

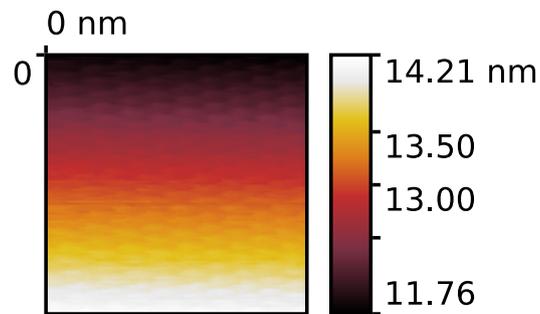


Abb. 10: Aufgenommenes Bild ohne Filter.

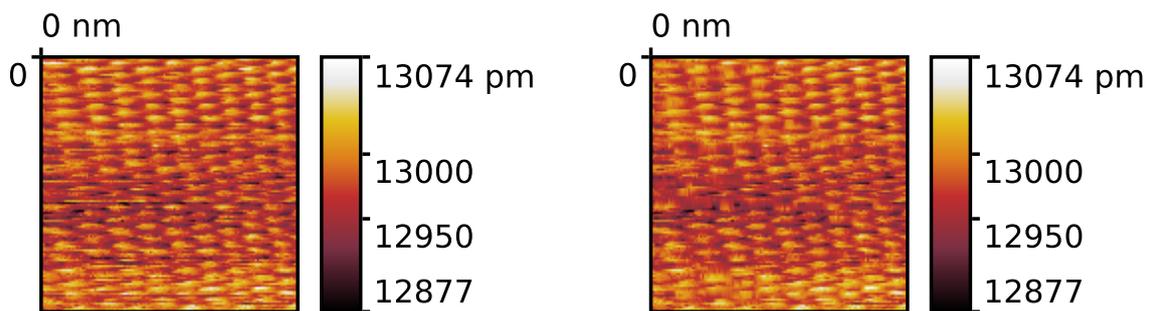


Abb. 11: Aufgenommenes Bild mit Mittelwertebenen Filter.

Abb. 12: Aufgenommenes Bild mit horizontaler Fehlerzeilen Korrektur.

5.1. Graphit

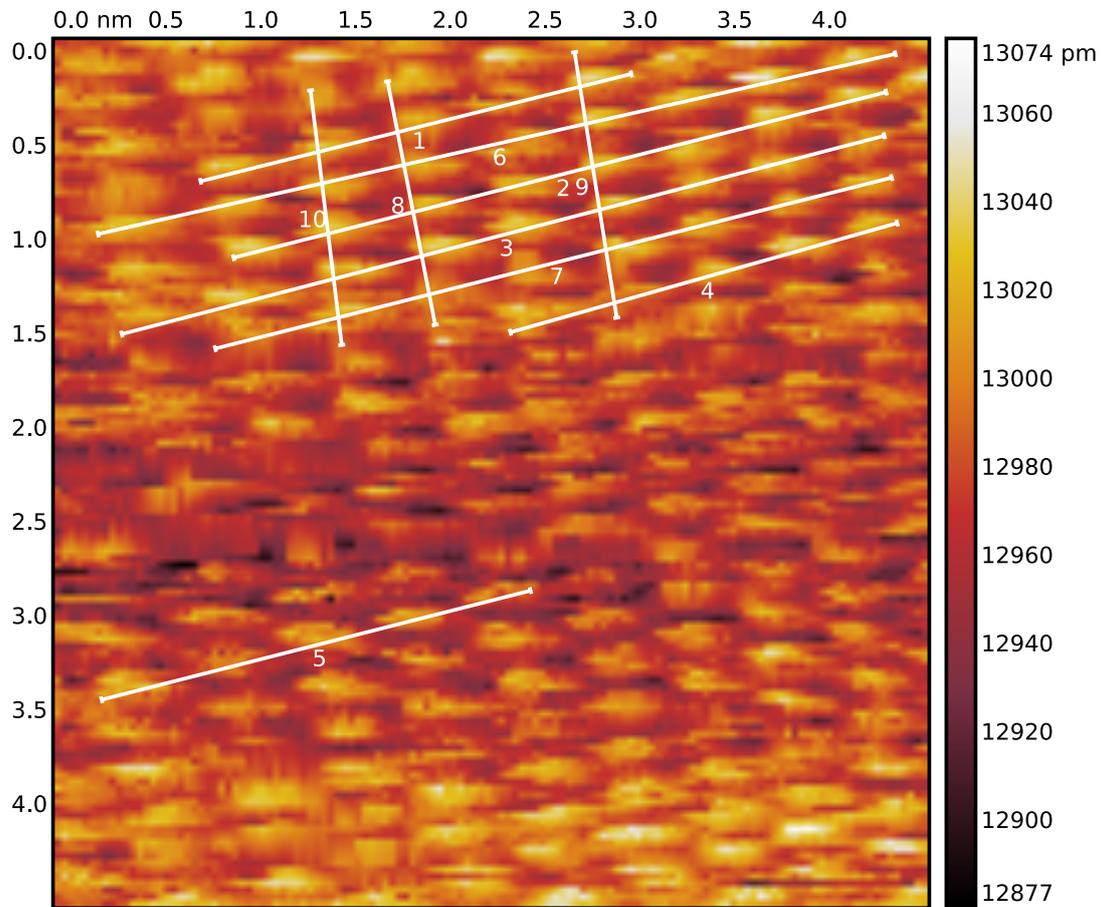


Abb. 13: Benutzte Messdaten Datei mit eingezeichneten Linien an denen gemessen wurde.

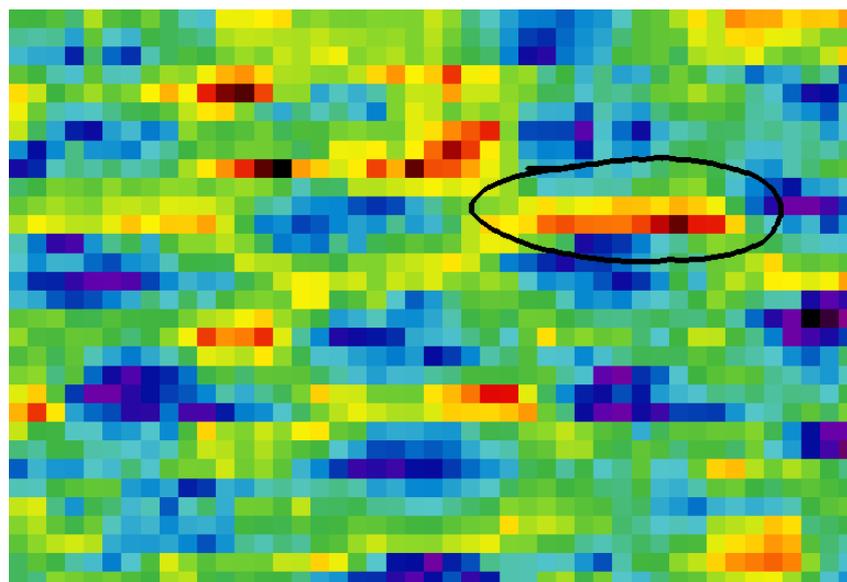


Abb. 14: Ausschnitt von Abbildung 13 mit feinerer Farbdarstellung.

Mit dem Programm lässt sich eine gerade Strecke abmessen (Abbildung 13). Dabei zählten wir, wie viele Atome wir dabei abmessen und teilten die Strecke durch diesen Wert. Diesen Vorgang

wiederholten wir mehrmals um die Werte danach zu mitteln.

$$\begin{array}{cccccc} d_1 = 0.233 \text{ nm} & d_2 = 0.235 \text{ nm} & d_3 = 0.223 \text{ nm} & d_4 = 0.213 \text{ nm} & d_5 = 0.235 \text{ nm} \\ d_6 = 0.241 \text{ nm} & d_7 = 0.231 \text{ nm} & d_8 = 0.222 \text{ nm} & d_9 = 0.237 \text{ nm} & d_{10} = 0.225 \text{ nm} \end{array}$$

Bei Abbildung 13 ist zu beachten, dass ein heller Fleck nicht ein, sondern zwei Atome darstellt. Dies ist aus Abbildung 14 zu erkennen. Hier wurde eine feinere Farbauflösung gewählt, mit der erkennbar ist, dass ein Peak in Wirklichkeit aus zwei Peaks besteht. Ebenfalls lässt sich die sechseck Struktur relativ gut erkennen.

Als Ablesefehler wurden 0.007 nm gewählt. Dieser ist deutlich größer, als die statistische Schwankung der Abstände um den Mittelwert, weswegen diese insignifikant sind und weggelassen werden. Wir erhalten als mittleren Abstand der α -Atome

$$d_{\text{Mittel}} = (0.230 \pm 0.007) \text{ nm}.$$

5.2. Gold

Bei Gold erwarten wir aufgrund der delokalisierten Elektronen keine atomare Auflösung. Die grobe Oberfläche sollte trotzdem darstellbar sein.

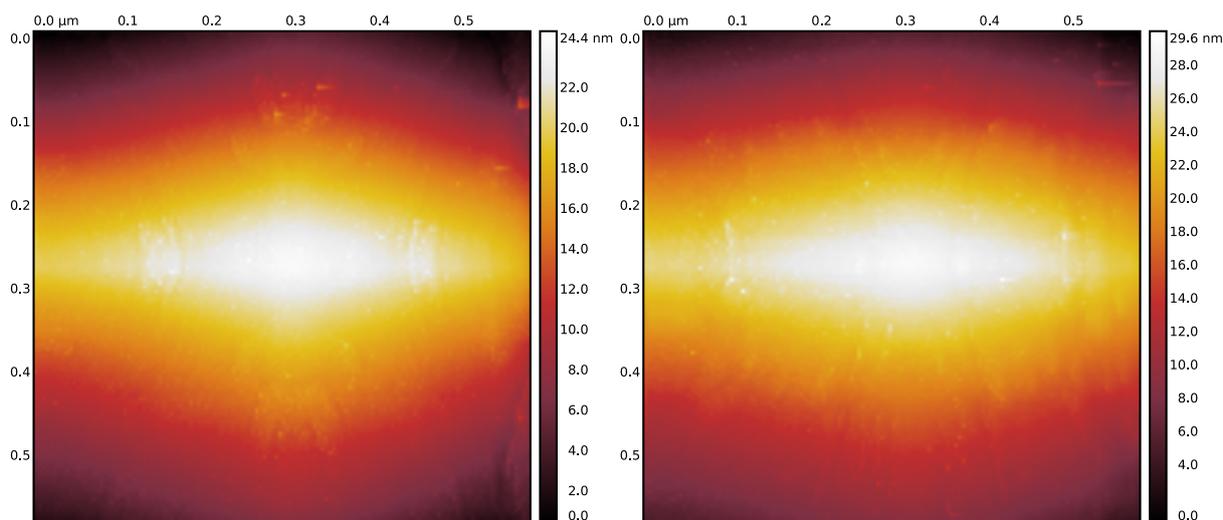


Abb. 15: Oberfläche der Goldprobe in einem $0.59 \mu\text{m}^2$ großen Bereich.

Abb. 16: Wie Abb. 15, mit einer anderen Nadel und an anderer Stelle der Probe.

Anhand von den Abbildungen 15 und 16 lässt sich erkennen, dass die Oberfläche unserer Goldprobe überall relativ gleich glatt ist. Als nächstes haben wir Bilder in kleineren Bereichen aufgenommen.

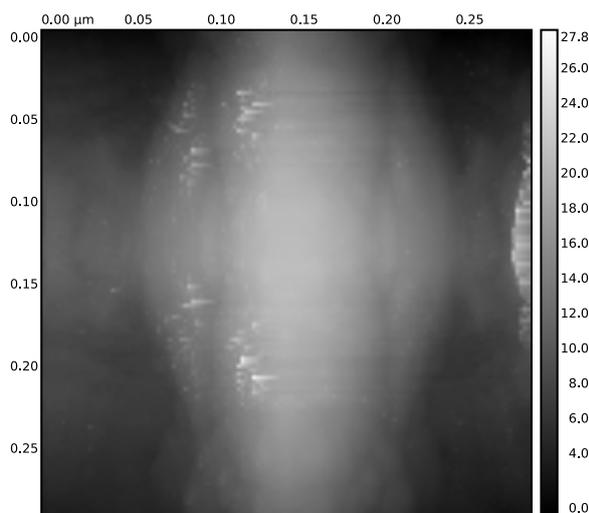


Abb. 17: Oberfläche der Goldprobe in einem 296 nm^2 großen Bereich.

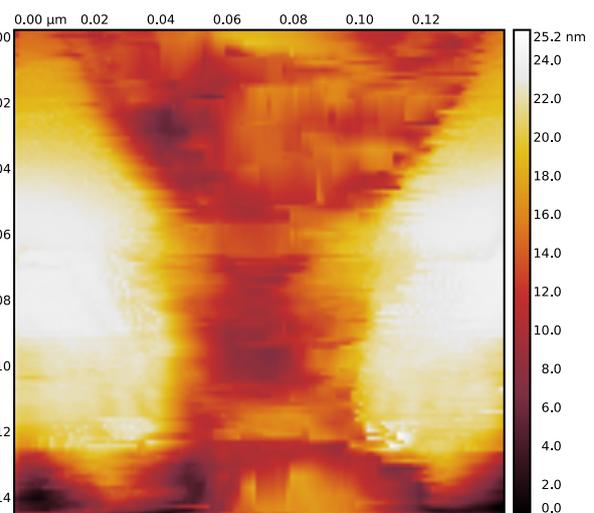


Abb. 18: Oberfläche der Goldprobe in einem 148 nm^2 großen Bereich.

In Abbildung 17 lässt sich die Wolkenartige Struktur der Elektronenwolken erkennen. In Abbildung 18 ebenfalls, aber hier war die verwendete Spitze schlechter und/oder es gab andere Störeffekte, wie zum Beispiel Vibration des Aufbaus.

Gehen wir noch Näher heran (siehe Abbildung 19) erkennen wir eine sehr glatte Oberfläche. In Abbildung 19 ist zwar ein Höhengradient zu erkennen, allerdings ist der Höhenunterschied ca. 1.5 nm und es könnte der Rand einer Elektronenwolke sein. Generell ist es aber keine periodische Struktur.

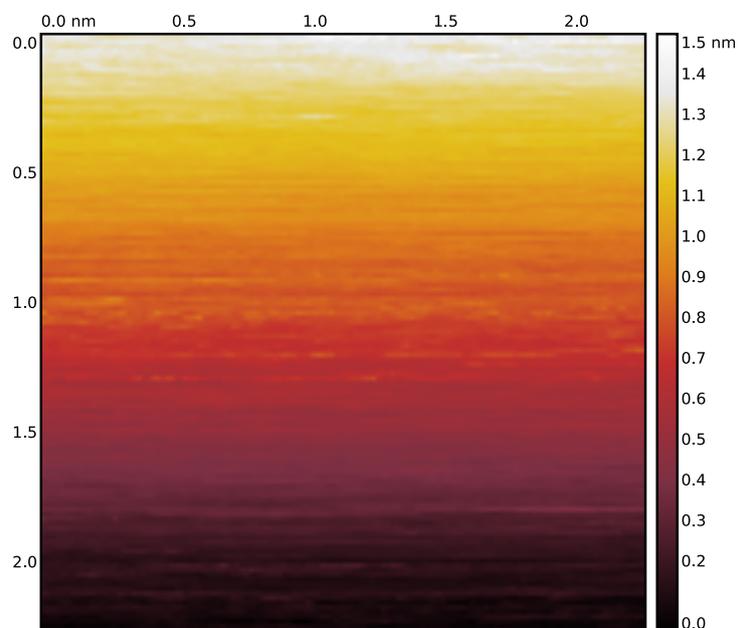


Abb. 19: Oberfläche der Goldprobe in einem 2.31 nm^2 großen Bereich.

5.3. MoS₂

In den folgenden Grafiken (Abbildungen 20 bis 25) lässt sich erkennen, dass es uns nicht gelang eine ordentliche Spitze für die Vermessung von MoS₂ zu ziehen. Anhand von Abbildung 20 und

Abbildung 21 sieht man, dass die Probe eine sehr unebene Oberfläche hatte (dies war schon mit bloßem Auge zu erkennen), da wir komplett unterschiedliche Bilder mit der gleichen Nadel, und nur einer anderen Position der Probe erhalten haben. In Abbildung 23 könnte man denken eine periodische Struktur gemessen zu haben, die sogar eine Gitterkonstante von ca. 0.22 nm ergeben würde, was relativ Nahe am Literaturwert [Ritz, Kap. 4.3 ,S.40] von 0.316 nm ist. Allerdings ist dies reiner Zufall. Solche periodischen Strukturen tauchten immer wieder auf, auch bei deutlich größeren Bereichen, wo man dann eine deutlich größere Gitterkonstante erhalten hätte. Diese Strukturen stammen wahrscheinlich von einer sehr schlechten Spitze und oder Vibrationen des Experiments.

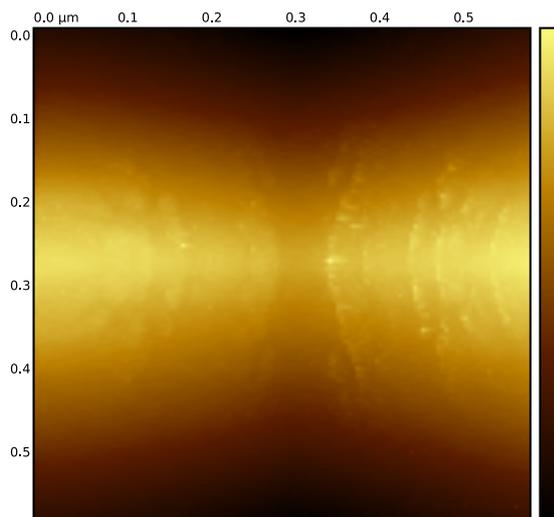


Abb. 20: Oberfläche der MoS₂ Probe in einem 0.59 µm² großen Bereich.

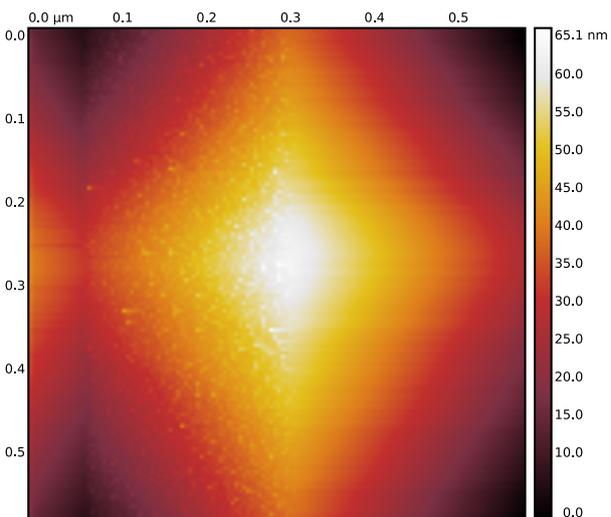


Abb. 21: Oberfläche der MoS₂ Probe in einem 0.59 µm² großen Bereich.

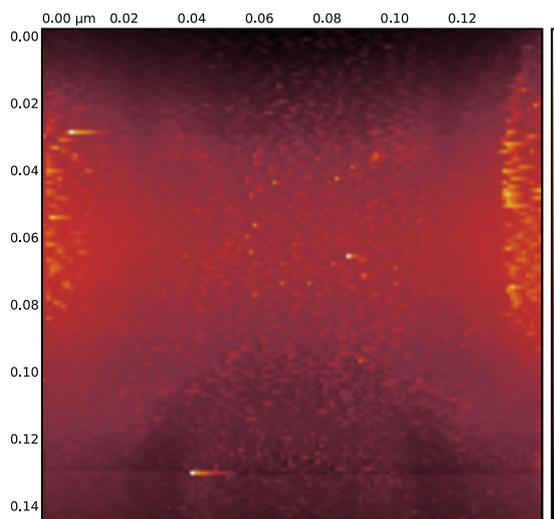


Abb. 22: Oberfläche der MoS₂ Probe in einem 148 nm² großen Bereich.

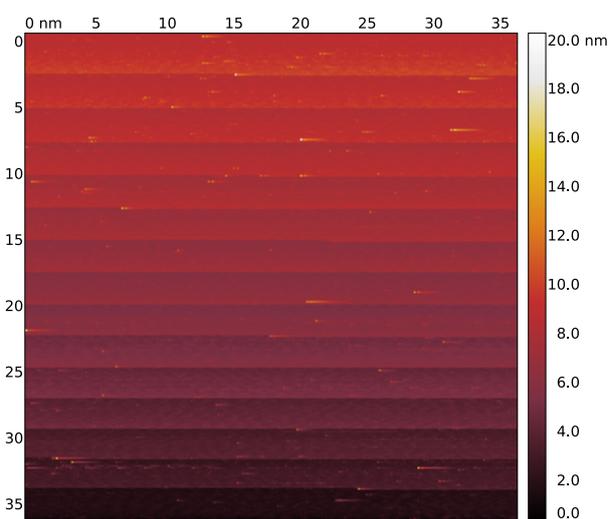


Abb. 23: Oberfläche der MoS₂ Probe in einem 37 nm² großen Bereich.

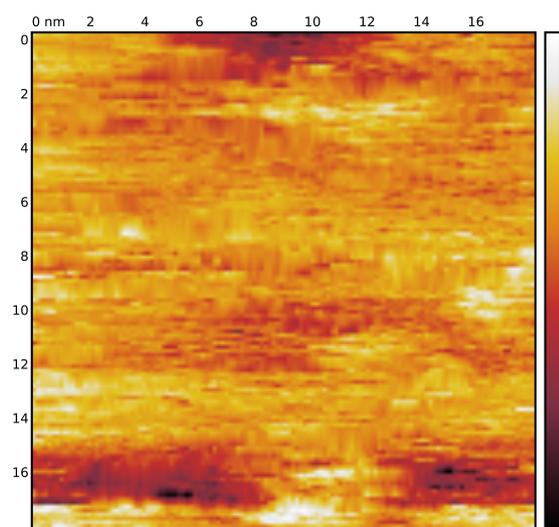


Abb. 24: Oberfläche der MoS₂ Probe in einem 18.5 nm² großen Bereich.

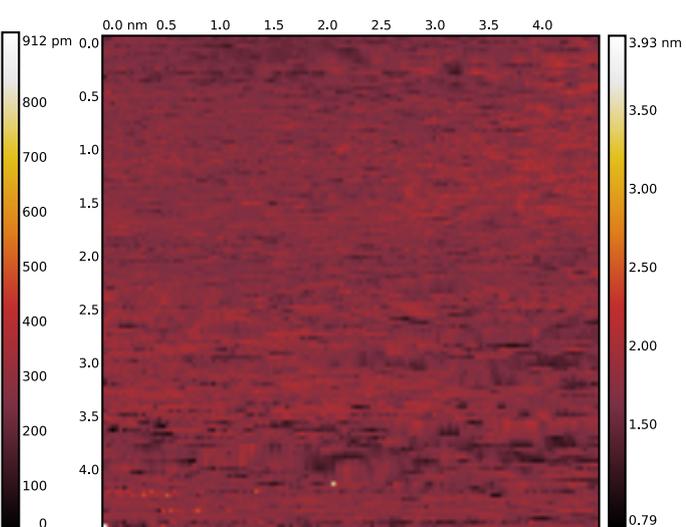


Abb. 25: Oberfläche der MoS₂ Probe in einem 4.6 nm² großen Bereich.

6. Zusammenfassung und Diskussion

Für die Graphit Probe erhielten wir einen Atom Abstand von

$$d_{\text{Mittel}} = (0.230 \pm 0.007) \text{ nm.}$$

Als Literaturwert [Ritz] ist 0.246 nm angegeben. Wir sehen, dass wir in einer 3σ Umgebung vom Literatur Wert sind. Dies und der relative Fehler von 3.0% zeigt, dass wir eine relativ genaue Messung haben.

Als größten Fehler ist die Spitze zu benennen. Bei unserer Graphit Messung hatte unsere wohl eher zwei Atome an der Spitze, da zwei Atome als ein Peak dargestellt wurden (siehe Abbildung 13). Dies konnte nur durch einen noch kleineren Ausschnitt (Abbildung 14) dargestellt werden. Ansonsten hatte man immer wieder horizontale Striche, die durch das ganze Bild gingen, was durch Erschütterungen oder zu lautes reden ausgelöst wurden.

Bei der Gold Messung haben wir wie erwartet keine atomaren Strukturen auflösen können. Allerdings konnten wir die Elektronenwolken darstellen (siehe Abbildung 17).

Bei der MoS_2 Probe haben wir es nicht geschafft die atomare Struktur darzustellen, da wir keine spitz genuge Spitze ziehen konnten. Allerdings konnten wir die sehr unebene Oberflächenstruktur auflösen (siehe Abbildung 20 und Abbildung 21).

A. Abbildungen

| | | |
|-----|---|----|
| 1. | Schematisches Bild eines STM [Nan]. | 5 |
| 2. | Constant Height Mode [Ritz]. | 5 |
| 3. | Constant Current Mode [Ritz]. | 6 |
| 4. | Tunneleffekt an Potentialbarriere [Bar, Kapitel 26.2, S.858]. | 6 |
| 5. | Potentialbarriere zwischen Probe und Spitze [Ritz]. | 7 |
| 6. | Schichtstruktur von Graphit [Ritz]. | 8 |
| 7. | Struktur von MoS ₂ , Punkte: Mo, Kreise: S [Ritz]. | 9 |
| 8. | Piezo Effekt eines Kristalls [Ritz]. | 10 |
| 9. | Versuchsaufbau nach [Ritz]. | 11 |
| 10. | Aufgenommenes Bild ohne Filter. | 12 |
| 11. | Aufgenommenes Bild mit Mittelwertebenen Filter. | 12 |
| 12. | Aufgenommenes Bild mit horizontaler Fehlerzeilen Korrektur. | 12 |
| 13. | Benutzte Messdaten Datei mit eingezeichneten Linien an denen gemessen wurde. | 13 |
| 14. | Ausschnitt von Abbildung 13 mit feinerer Farbdarstellung. | 13 |
| 15. | Oberfläche der Goldprobe in einem 0.59 μm^2 großen Bereich. | 14 |
| 16. | Wie Abb. 15, mit einer anderen Nadel und an anderer Stelle der Probe. | 14 |
| 17. | Oberfläche der Goldprobe in einem 296 nm^2 großen Bereich. | 15 |
| 18. | Oberfläche der Goldprobe in einem 148 nm^2 großen Bereich. | 15 |
| 19. | Oberfläche der Goldprobe in einem 2.31 nm^2 großen Bereich. | 15 |
| 20. | Oberfläche der MoS ₂ Probe in einem 0.59 μm^2 großen Bereich. | 16 |
| 21. | Oberfläche der MoS ₂ Probe in einem 0.59 μm^2 großen Bereich. | 16 |
| 22. | Oberfläche der MoS ₂ Probe in einem 148 nm^2 großen Bereich. | 16 |
| 23. | Oberfläche der MoS ₂ Probe in einem 37 nm^2 großen Bereich. | 16 |
| 24. | Oberfläche der MoS ₂ Probe in einem 18.5 nm^2 großen Bereich. | 17 |
| 25. | Oberfläche der MoS ₂ Probe in einem 4.6 nm^2 großen Bereich. | 17 |

B. Literatur

[Bar] M. Bartelmann, *Theoretische Physik*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2015

[Ritz] Dieter Ritzmann, *Einrichtung eines Versuchs: Rastertunnelmikroskopie für das Fortgeschrittenen-Praktikum 2*, Staatsexamensarbeit, Physikalisches Institut, Fakultät für Mathematik und Physik, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, Februar 1994

[Lei] Annette Lein, *Das Rastertunnelmikroskop von Gerd Binnig und Heinrich Rohrer*, in: Deutsches Museum, 2018, <https://www.deutsches-museum.de/sammlungen/meisterwerke/meisterwerke-ii/rastertunnelmikroskop/>, besucht am 12.9.2018

[Nan] Nanosurf AG: *Operating Instructions EasyScan2 STM, Version 1.6*, Liestal, Switzerland, 2007