



# Inhaltsverzeichnis

<b>Inhaltsverzeichnis</b>	<b>3</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>4</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>4</b>
<b>1 Theoretische Grundlagen</b>	<b>5</b>
1.1 Tunneleffekt . . . . .	5
1.2 Rastertunnelmikroskopie . . . . .	5
1.3 Verwendete Materialien . . . . .	6
1.3.1 Graphit . . . . .	6
1.3.2 Gold . . . . .	7
1.3.3 Molybdänsulfid . . . . .	7
<b>2 Aufbau und Durchführung</b>	<b>8</b>
2.1 Aufbau . . . . .	8
2.2 Durchführung . . . . .	9
<b>3 Auswertung</b>	<b>10</b>
3.1 Graphit . . . . .	10
3.2 Gold . . . . .	12
3.3 Molybdänsulfid . . . . .	13
<b>4 Diskussion</b>	<b>17</b>
4.1 Graphit . . . . .	17
4.2 Gold . . . . .	17
4.3 Molybdänsulfid . . . . .	17
<b>A Anhang</b>	<b>17</b>
A.1 Laborheft . . . . .	18
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>19</b>

## Abbildungsverzeichnis

1	Schematische Darstellung des quantenmechanischen Tunneleffektes. . . . .	5
2	Schematische Struktur von Graphit. Mit durchgezogenen Linien sind kovalente Bindungen dargestellt, während Van-der-Waals-Kräfte durch gestrichelte Linien dargestellt sind. . . . .	7
3	Foto des Versuchsaufbaus [3]. . . . .	8
4	Verschieden große Aufnahmen von Graphit. . . . .	10
5	Filtern der Aufnahme durch Fourier-Transformation. . . . .	11
6	Messungen der Gitterkonstante. . . . .	12
7	Aufnahmen mit unterschiedlichen Einstellungen für die Liniengeschwindigkeit. . . . .	13
8	Vergleich von vorwärts und rückwärts abgefahrenen Aufnahmen. Zusätzlich noch eine Aufnahme mit gedrehter Scanrichtung. . . . .	14
9	Messungen mit unterschiedlichen Gain-Einstellungen. . . . .	15
10	Unterschiedlich große Aufnahmen von Molybdänsulfid mit positiver und negativer Spannung. . . . .	16

## Tabellenverzeichnis

1	Symbole, die in diesem Versuchsprotokoll verwendet wurden. . . . .	4
2	Die gemessenen Abstände und daraus errechneten Gitterkonstanten. . . . .	11

In Tabelle 1 ist eine Übersicht über alle in diesem Versuchsprotokoll verwendeten Symbole gegeben.

Größensymbol	Bedeutung
$a$	Potentialbreite
$d$	Länge der in der Auswertung gemessenen Strecken
$E$	Energie
$G$	Gitterkonstante von Graphit
$\hbar$	Plancksches Wirkungsquantum
$I$	Tunnelstrom
$m$	Masse des Elektrons
$N$	Anzahl an Minima innerhalb einer gemessenen Linie
$P$	Tunnelwahrscheinlichkeit
$U$	Spannung
$V$	Potential
$s_x$	Unsicherheit von $x$

Tabelle 1: Symbole, die in diesem Versuchsprotokoll verwendet wurden.

# 1 Theoretische Grundlagen

## 1.1 Tunneleffekt

Der Tunneleffekt ist ein quantenmechanischer Effekt, der an Potentialbarrieren im mikroskopischen Bereich auftritt. Trifft ein Elektron mit Energie  $E$  auf eine Potentialbarriere  $V_0 > E$ , so wird das Elektron nach klassischer Anschauung reflektiert.

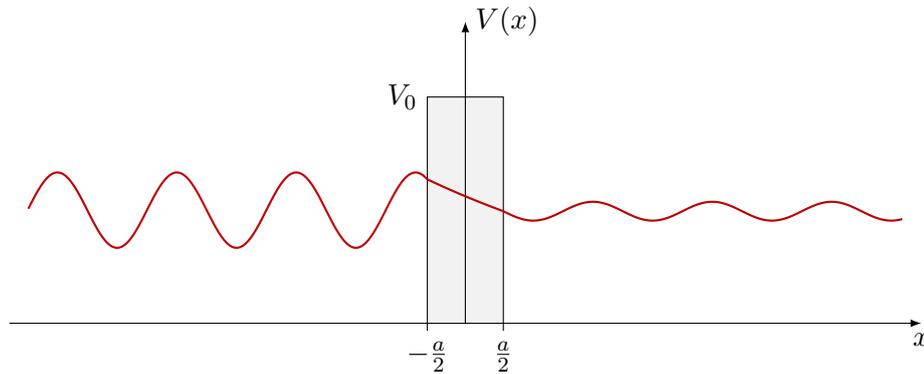


Abbildung 1: Schematische Darstellung des quantenmechanischen Tunneleffektes.

Betrachtet man das Elektron nun aus Sicht der Quantenmechanik, so wird dessen Wellenfunktion durch eine stehende Welle beschrieben (links in Abb. 1). Im Gegensatz zur klassischen Mechanik besteht an der Barriere eine nicht-verschwindende Transmissionswahrscheinlichkeit: die Wellenfunktion des Elektrons wird innerhalb der Barriere durch einen exponentiellen Abfall beschrieben (s. Abb. 1 Mitte). Nach Passieren der Barriere nimmt die Wellenfunktion des Elektrons wieder die Form einer stehenden Welle an. Die Wahrscheinlichkeit, dass das Elektron die Barriere passiert, wird Tunnelwahrscheinlichkeit genannt und beträgt

$$P = \exp\left\{-2a \frac{\sqrt{2m(V_0 - E)}}{\hbar}\right\}. \quad (1)$$

Legt man nun zwischen zwei leitende Materialien, die durch eine Luft bzw. Vakuumschicht voneinander getrennt sind, eine Spannung  $U$  an, so lässt sich ein sog. Tunnelstrom  $I$  beobachten, der proportional zur Spannung und Transmissionswahrscheinlichkeit ist:

$$I \propto U \cdot \exp\left\{-2a \frac{\sqrt{2m(V_0 - E)}}{\hbar}\right\} \quad (2)$$

Der Tunnelstrom fällt also mit zunehmender Barrierenbreite  $a$  exponentiell ab.

## 1.2 Rastertunnelmikroskopie

Die Rastertunnelmikroskopie nutzt den soeben skizzierten quantenmechanischen Tunneleffekt aus, um den Potentialverlauf an Oberflächen auf Nanometerebene auf-

zulösen. Prinzipiell wird dabei eine Sonde verwendet, die eine dünne, (idealerweise) einatomige Spitze bis auf ca. 1 Å an die Probe nähert. Wird nun eine Tunnelspannung von 1 mV bis zu 1 V zwischen Spitze und Oberfläche angelegt und der Tunnelstrom gemessen, so kann man dank Gleichung (2) durch langsames Abrastern der Probe den Potentialverlauf an der Oberfläche bestimmen.

Grundsätzlich unterscheidet man bei dem Betrieb eines Rastertunnelmikroskops zwei Modi: Bei dem sogenannten „Constant Height Mode“ wird die Probe nicht orthogonal zur zu vermessenden Oberfläche bewegt und die Höhe somit konstant gehalten. Ist nun der Oberflächenverlauf uneben, so vermutlich auch das Potential und man kann durch den sich verändernden Tunnelstrom auf das Potential rückschließen. Da keine konstante Nachjustierung des Abstandes vonnöten ist, ist diese Art der Oberflächenvermessung dem anderen Betriebsmodus von der Abbildungszeit her überlegen. Verläuft jedoch die Oberfläche sehr unregelmäßig, kann es vorkommen, dass es bei der Vermessung der Oberfläche zur Kollision mit der Sonde kommt. Anders ist dies beim sogenannten „Constant Current Mode“: Dort wird der Abstand zur Oberfläche durch einen Regelkreis ständig nachjustiert, sodass der Tunnelstrom konstant bleibt. Dies verringert zwar die Kollisionsgefahr deutlich, die Abbildungsgeschwindigkeit ist allerdings nun auch durch den Regelkreis begrenzt. Dementsprechend wird der erste Betriebsmodus vor allem bei der Auflösung zeitlicher Prozesse, wie beispielsweise bei thermischen Bewegungen, verwendet, während hingegen die zweite Methode Verwendung bei präzisionsorientierten Messungen findet.

### 1.3 Verwendete Materialien

In unserem Experiment werden mehrere Proben mit dem Rastertunnelmikroskop untersucht.

#### 1.3.1 Graphit

Die erste Probe ist der Halbleiter Graphit, der aus Kohlenstoffatomen besteht, die in Schichten angeordnet sind. Innerhalb der Schichten formt sich eine wabenförmige Struktur, die in Abbildung 2 skizziert ist. Innerhalb der Schichten formen die Kohlenstoffatome kovalente Bindungen, sodass Elektronen sich relativ frei zwischen den Atomen bewegen können. Zwischen den Schichten interagieren die Atome lediglich über Van-der-Waals-Wechselwirkungen, weswegen die Elektronen an ihre zugehörige Schicht gebunden ist und nicht zu einer anderen wechseln kann. Da zwei benachbarte Schichten nicht genau aufeinander liegen, sondern leicht verschoben sind, lassen sich zwei verschiedene Atomarten unterscheiden:  $\beta$ -Atome liegen über direkt über anderen Atomen und zeichnen sich dadurch aus, dass ihre Elektronen aufgrunddessen stärker gebunden sind.  $\alpha$ -Atome hingegen liegen dagegen nicht direkt über anderen Atomen, weswegen die Elektronen dieser weniger stark gebunden sind. Bei der Untersuchung von Graphit mit einem Rastertunnelmikroskop werden wir hauptsächlich die  $\beta$ -Atome beobachten können, die als dreieckiges Muster wahrnehmbar sind.

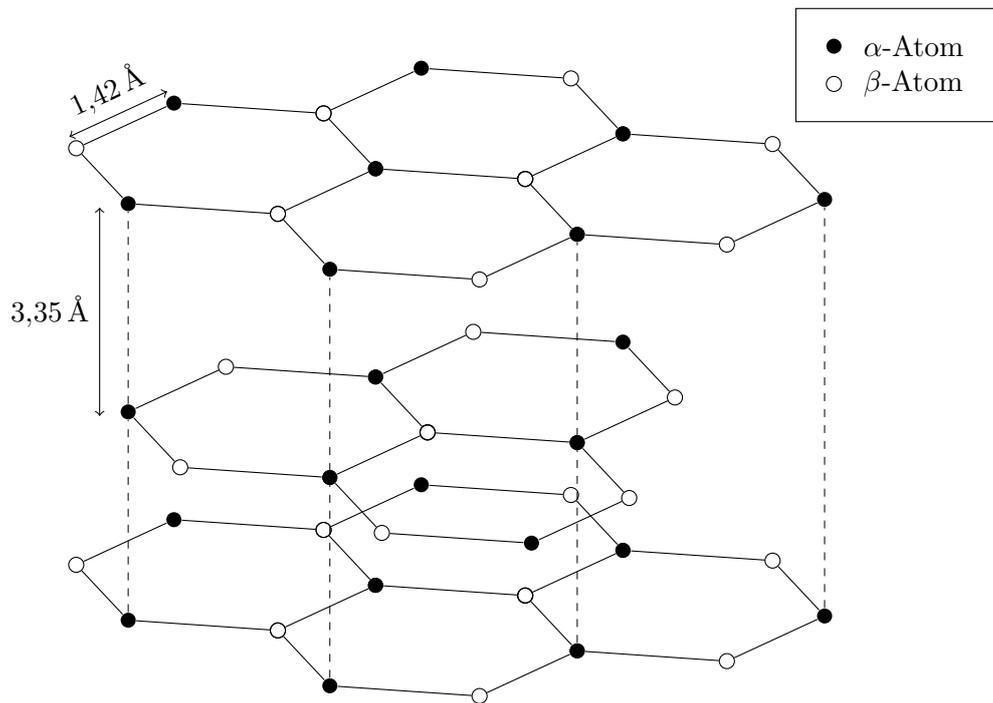


Abbildung 2: Schematische Struktur von Graphit. Mit durchgezogenen Linien sind kovalente Bindungen dargestellt, während Van-der-Waals-Kräfte durch gestrichelte Linien dargestellt sind.

### 1.3.2 Gold

Im Gegensatz zu Graphit ist Gold ein Leiter, was bedeutet, dass die Elektronen des Materials sich nicht auf einzelne Atome beschränken. Stattdessen sind diese in Gruppen auffindbar, die auch Elektronenwolken genannt werden. Da sich innerhalb eines Leiters Ladungen weitestgehend ungehindert fortbewegen können, ist das Potential dementsprechend glatt. Es ist daher unwahrscheinlich, mit unserem Rastertunnelmikroskop feinere Strukturen als die Elektronenwolken wahrzunehmen.

### 1.3.3 Molybdänsulfid

Zuletzt soll Molybdänsulfid als Vertreter der Gruppe der Halbleiter untersucht werden. Im Bändermodell unterscheiden sich Halbleiter von Leitern dadurch, dass ihr Valenz- und Leitungsband eine energetische<sup>1</sup> Bandlücke aufweisen. Die Elektronen in einem unangetasteten Halbleiter sind zumeist im Valenzband aufzufinden. Rele-

<sup>1</sup>Im Allgemeinen definiert man die Bandlückenenergie als die Energie, die benötigt wird, um ein Elektron vom Leitungs- ins Valenzband zu befördern; da i. A. auch ein Impulsübertrag benötigt wird, ist die Definition der Bandlückenenergie als reiner Bänderabstand nicht ausreichend.

vanz der Bänder für das Rastertunnelmikroskop besteht in dem Einfluss der Polarität der Spannung, die zwischen Spitze und Probe angelegt wird: Ist das Potential der Spitze negativ, tunneln Elektronen von der Spitze in das Halbleitervalenzband, während bei einem positiven Spitzenpotential die Elektronen vom Leiterband in die Spitze tunneln. Da zusätzlich bei Molybdänsulfid die Leitungs- und Valenzbänder bei unterschiedlichen Atomarten liegen, erwarten wir bei unterschiedlichen Spitzenpolaritäten stark unterschiedliche Strukturen.

## 2 Aufbau und Durchführung

In den folgenden zwei Abschnitten sei kurz der Aufbau des Versuches und anschließend seine Durchführung aufgeführt.

### 2.1 Aufbau

Der Versuchsaufbau besteht aus dem Rastertunnelmikroskop „Easyscan 2“ von der Firma Nanosurf (siehe Abb. 3), das an einen Auswertungscomputer angeschlossen ist. Das Mikroskop selber besteht aus einer Steuereinheit (links in der Abbildung), welche mit der Messeinheit (rechts) verbunden ist. In die Messeinheit lassen sich auf einer dafür vorgesehenen Halterung montierte Proben – nämlich Graphit, Gold und Molybdänsulfid – einsetzen. Zusätzlich stehen Platin-Iridium-Draht, mehrere Pinzetten und ein Seitenschneider zur Präparation der Sondenspitzen sowie Ethanol, Papiertücher und Tesafilm zur Reinigung der Präparate zur Verfügung. In der



Abbildung 3: Foto des Versuchsaufbaus [3].

Abbildung nicht dargestellt ist ein von innen mit Schaumstoff verkleideter Behälter,

der über den Versuchsaufbau gestülpt ist, um die Messung von Schall und anderen störenden Einflüssen abzuschirmen.

## 2.2 Durchführung

Der erste Versuchsteil bestand darin, den Platin-Iridium-Draht unter Zuhilfenahme eines Seitenschneiders anzuspitzen. Dabei wurden jeweils ca. 5 mm bis 7 mm Drahtlänge abgeschnitten und mit einer Pinzette festgehalten. Das andere Drahtende wurde daraufhin gewinkelt in den Seitenschneider eingespannt und dieser schnell entlang des Drahtes von diesem Drahtende weggezogen. Daraufhin wurde die Drahtspitze vorsichtig in den Messkopf eingesetzt, eine Graphitprobe in die Probenhalterung eingespannt und diese dann auf wenige Millimeter zum Messkopf genähert. Der Abstand der Probe zur Spitze konnte unter Zuhilfenahme eines in der Messeinheit eingebauten Elektromotors, der mit dem das Rastertunnelmikroskop regulierende Programm gesteuert wurde, weiter verringert werden. Die letzte Abstandseinstellung geschah automatisch über das Programm, wobei wir zuvor die isolierende Box über die Apparatur platzierten, um die Feinjustage der Spitze nicht unnötig zu gefährden.

Die Anfertigung einer messtauglichen Spitze recht stark vom Glück abhängt, verbrachten wir einige Zeit damit, Messspitzen herzustellen, die das Rastertunnelmikroskop prompt in die Probe hineinfuhr oder – was aber deutlich seltener der Fall war – Bilder von sehr geringer Qualität lieferte.

Als uns die Anfertigung einer guten Messspitze gelang, begannen wir mit der genaueren Vermessung von Graphit, wobei wir unterschiedliche Aufnahmen im Bereich von 2,5 nm bis 500 nm Kantenlänge anfertigten. Auch variierten wir Linienauflösung und Messzeit pro Linie.

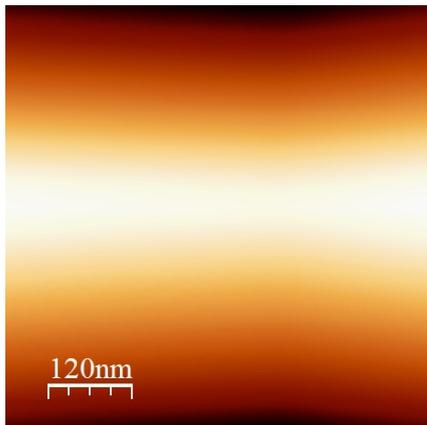
Nachdem wir die Vermessung von Graphit beendeten, wechselten wir zur Goldprobe. Dort fiel es uns deutlich schwerer, einzelne Strukturen auszumessen. Trotzdem nahmen wir verschiedene Messungen in einem Größenbereich von 0,2  $\mu\text{m}$  bis 0,3  $\mu\text{m}$  Kantenlänge auf und veränderten dabei auch Linienauflösung und Messzeit. Anschließend nahmen wir weitere Messungen auf, wobei die Rotation der Rasterebene sowie die Einstellungen der Piezokontrolleinheit änderten.

Schließlich versuchten wir uns an der Aufnahme von Molybdänsulfid. Unsere ersten Versuche waren dabei allerdings nicht von allzu hohem Erfolg, da die automatische Steuereinheit oft unsere Messspitze in die Oberfläche der Probe fuhr. Als uns schließlich die Annäherung gelang, nahmen wir Bilder im Bereich von 5 nm bis 600 nm Kantenlänge jeweils bei negativer und positiver Spitzenspannung auf. Danach beendeten wir die Messung.

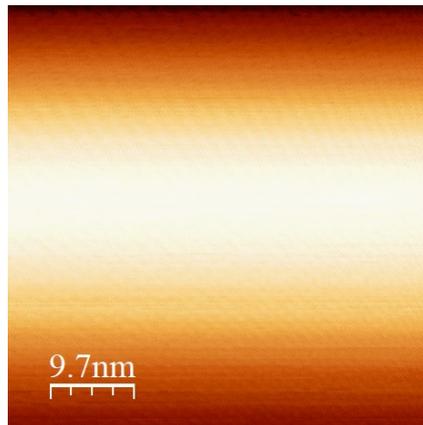
### 3 Auswertung

#### 3.1 Graphit

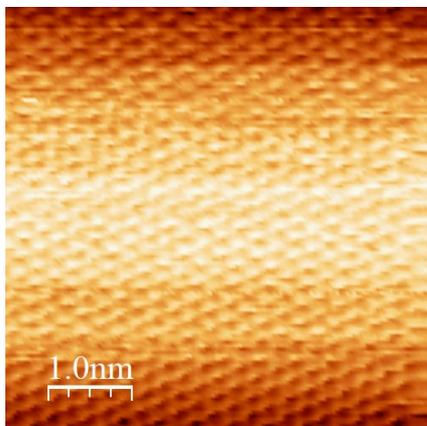
Die hier gezeigten Bildern von Graphit sind alle mit der selben Spitze entstanden; der Spitzenstrom war auf 1 nA und die Spannung auf 54 mV eingestellt. Die in Abbildung 4 dargestellten Bilder zeigen verschieden große Ausschnitte der Graphitprobe. Für Abb. 4(a) und (c) wurde eine Linie in 0,4 s und mit 128 Punkten pro Linie aufgenommen. Bei Abb. 4 (b) und (d) wurde eine Linie in 0,8 s mit 256 Punkten pro Linie aufgenommen. Die Aufnahme in Abb. 4(c) wurde mit dem Programm WSxM [1]



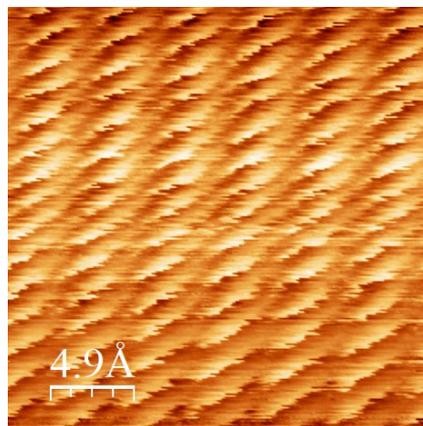
(a) Seitenlänge von 500 nm.



(b) Seitenlänge von 49 nm.



(c) Seitenlänge von 6 nm.



(d) Seitenlänge von 2,5 nm.

Abbildung 4: Verschieden große Aufnahmen von Graphit.

bearbeitet, um die Atomabstände besser bestimmen zu können. Im speziellen wurde die Aufnahme Fourier transformiert, gefiltert und wieder zurücktransformiert. Dieser Prozess ist in Abb. 5 am Beispiel von Graphit zu sehen. Das nach der Bearbeitung

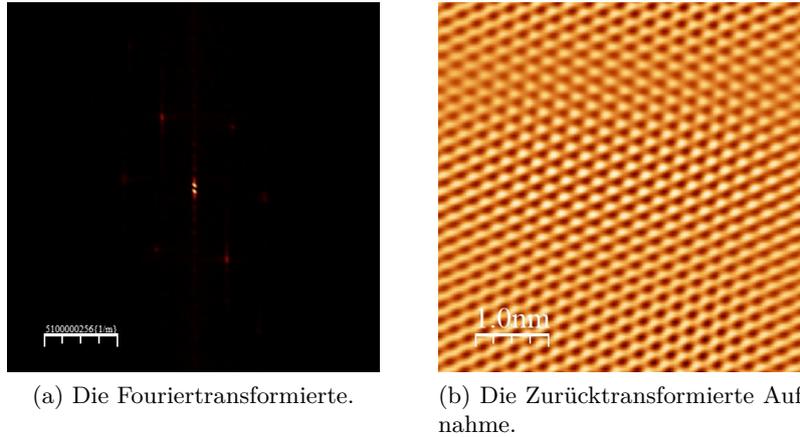


Abbildung 5: Filtern der Aufnahme durch Fourier-Transformation.

$d/\text{nm}$	$N$	$G/\text{nm}$
$1,84 \pm 0,09$	8	$0,230 \pm 0,011$
$1,78 \pm 0,09$	7	$0,254 \pm 0,013$
$1,64 \pm 0,08$	7	$0,234 \pm 0,011$
$1,80 \pm 0,09$	8	$0,225 \pm 0,011$
$1,79 \pm 0,09$	8	$0,224 \pm 0,011$
$1,53 \pm 0,08$	6	$0,256 \pm 0,013$

Tabelle 2: Die gemessenen Abstände und daraus errechneten Gitterkonstanten.

mit WSxM erhaltene Bild wurde, wie in Abb. 6 gezeigt, vermessen. Die Gitterkonstante von Graphit kann dann berechnet werden, indem der Abstand zweier Maxima durch die Anzahl der Minima in diesem Bereich geteilt wird:

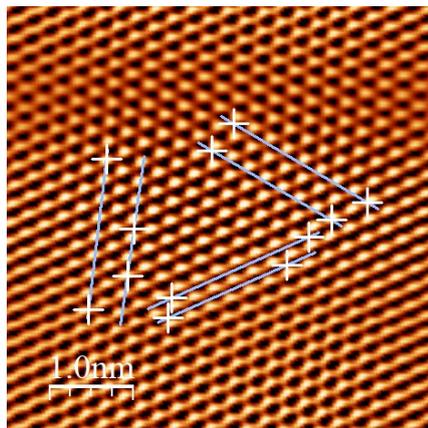
$$G = \frac{d}{N}. \quad (3)$$

Die so bestimmten Gitterkonstanten sind in Tabelle 2 zu sehen, wobei der Fehler auf die Abstände auf 5% geschätzt wurde. Anschließend wurde aus den Werten den einzelnen Gitterkonstanten der Mittelwert berechnet:

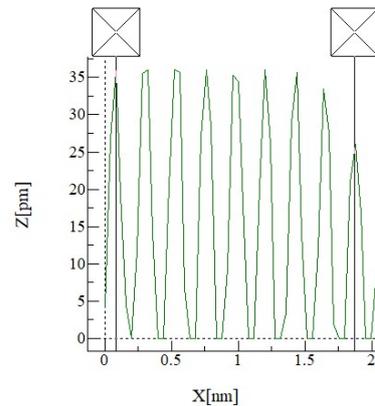
$$\bar{G} = \frac{1}{6} \sum G = 0,237 \text{ nm} = 2,37 \text{ \AA} \quad (4)$$

Der Fehler berechnet sich zu

$$s_{\bar{G}} = \sqrt{\frac{1}{5} \sum (G_i - \bar{G})^2} = 0,14 \text{ \AA}. \quad (5)$$



(a) Zum Messen genutztes Bild, mit den gemessenen Linien eingezeichnet.

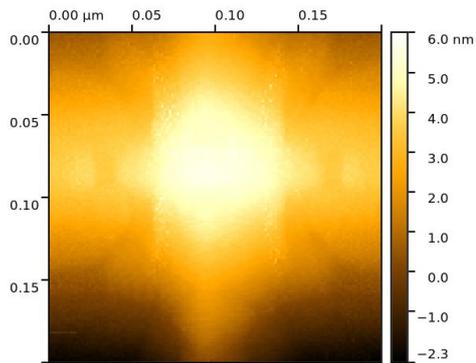


(b) Höhenprofil zu einer der eingezeichneten Linien.

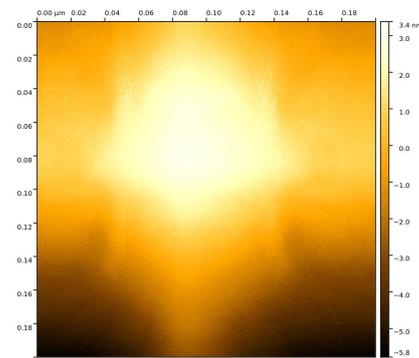
Abbildung 6: Messungen der Gitterkonstante.

### 3.2 Gold

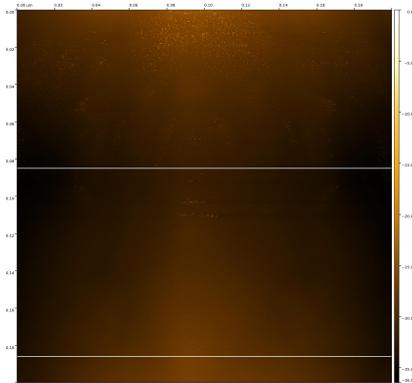
Bei der Vermessung von Gold konnte gesehen werden, dass wie zu erwarten die atomare Struktur nicht aufgelöst werden konnte. Jedoch wurden mit Gold unterschiedliche Einstellungen des Rastertunnelmikroskops untersucht. In Abbildung 7 sind drei verschiedene Aufnahmen des gleichen Bereichs der Probe mit unterschiedlicher Geschwindigkeit und Genauigkeit in der eine Linie abgefahren worden. Es ist zu erkennen, dass je mehr Zeit und Punkte pro Linie eingestellt wurden, die Höhe der aufgenommenen Struktur immer weiter abnimmt und immer stärker in die Tiefe geht. Der im ersten Bild zu sehende Peak in der Mitte ist im zweiten Bild schon wesentlich schwächer, betrachtet man die unterschiedlichen Skalen mit denen beide Bilder aufgetragen sind. Im dritten Bild ist in der Mitte gar kein Peak mehr zu sehen. In Abb. 8 sind Aufnahmen gezeigt, bei denen das Abfahren in Vorwärts- und Rückwärtsrichtung verglichen werden kann. Wie man sehen kann, gibt es kaum einen sichtbaren Unterschied zwischen der vorwärts und der rückwärts abgefahren Aufnahme. Vergleicht man Abb. 8(a) mit Abb. 8(c) ist gut zu sehen, dass durch die rotierte Scanrichtung auch das aufgenommene Bild um  $90^\circ$  rotiert, aber ansonsten den gleichen Inhalt zeigt. In Abb. 9 sind Aufnahmen mit unterschiedlichen Gain-Einstellungen zu sehen. Die ersten beiden Bilder zeigen, dass sowohl ein Erhöhen des D-gain von 0 auf 500, als auch ein Verringern vom I-gain von 10 000 auf 1000 keinen starken Einfluss auf die erhaltenen Bilder hat. Erhöht man jedoch den I-gain von 1000 auf 10 000 oder den D-gain auf 5000, entsprechen die Bilder, die man erhält, überhaupt nicht mehr der als eher homogenen Verteilung von Gold.



(a) Aufnahme mit 0,4 s und 128 Punkte pro Linie.



(b) Aufnahme mit 0,8 s und 256 Punkte pro Linie.

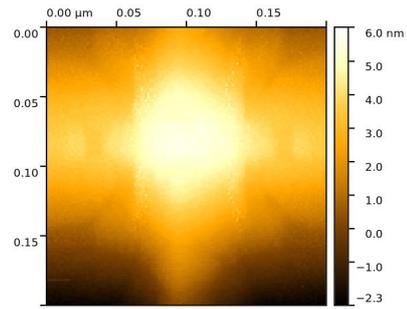


(c) Aufnahme mit 1,6 s und 512 Punkte pro Linie.

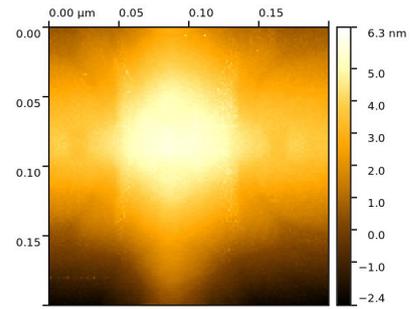
Abbildung 7: Aufnahmen mit unterschiedlichen Einstellungen für die Liniengeschwindigkeit.

### 3.3 Molybdänsulfid

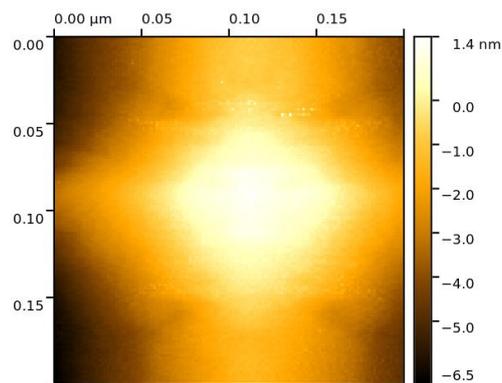
Die Molybdänsulfid Probe wurde sowohl mit einer Spannung von 54 mV als auch mit einer Spannung von  $-54$  mV vermessen. Dabei wurde eine Linie immer in 0,8 s abgefahren und 256 Punkte pro Linie aufgenommen. Eine Auswahl der gemachten Bilder ist in Abb. 10 zusehen. Mit der genutzten Spitze konnten keine für die Erkennung der Atomstruktur von Molybdänsulfid ausreichende Auflösung erzielt werden. Als Unterschied zwischen positiv und negativ angelegter Spannung kann erkannt werden, dass bei der positiven Spannung eine Art Peak zu sehen ist und bei der negativen Spannung eher viele kleinere Unregelmäßigkeiten zu sehen sind. Allerdings können diese Unterschiede auch dadurch entstanden sein, dass die beiden näheren Messungen nicht exakt den selben Ausschnitt der Molybdänsulfidprobe zeigen.



(a) Aufnahme mit 0,4s und 128 Punkte pro Linie, vorwärts abgefahren.

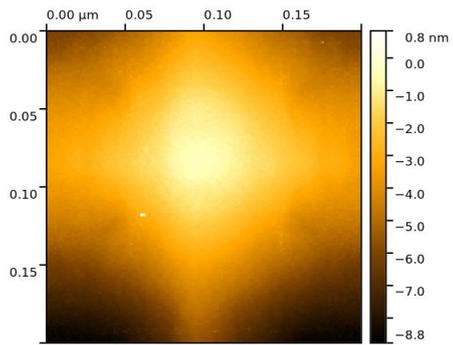


(b) Aufnahme mit 0,4s und 128 Punkte pro Linie, rückwärts abgefahren.

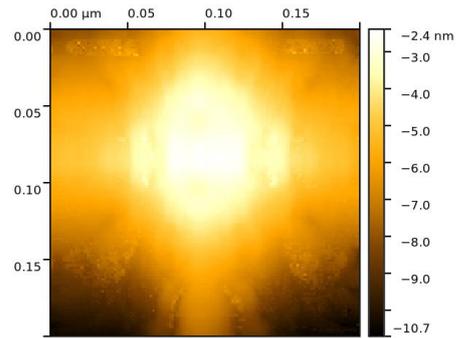


(c) Aufnahme mit 0,4s und 128 Punkte pro Linie, mit um  $90^\circ$  gedrehter Scanrichtung.

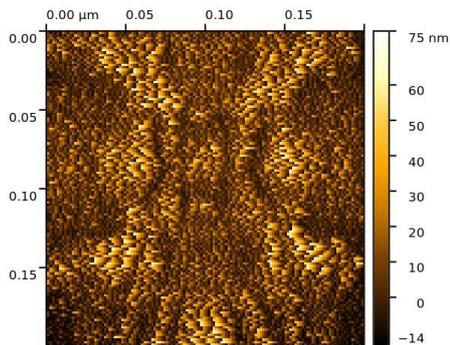
Abbildung 8: Vergleich von vorwärts und rückwärts abgefahrenen Aufnahmen. Zusätzlich noch eine Aufnahme mit gedrehter Scanrichtung.



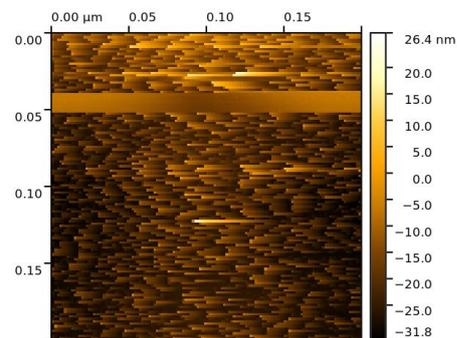
(a) P-gain= 10 000, I-gain= 1000, D-gain= 500.



(b) P-gain= 1000, I-gain= 1000, D-gain= 500.

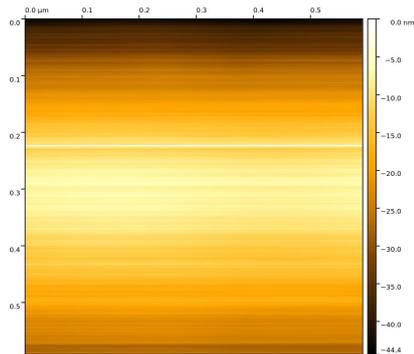


(c) P-gain= 1000, I-gain= 10 000, D-gain= 500.

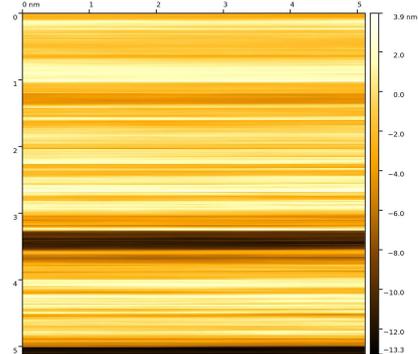


(d) P-gain= 10 000, I-gain= 1000, D-gain= 5000.

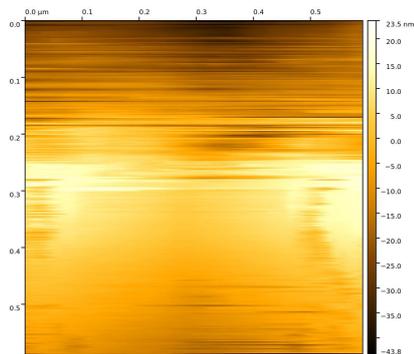
Abbildung 9: Messungen mit unterschiedlichen Gain-Einstellungen.



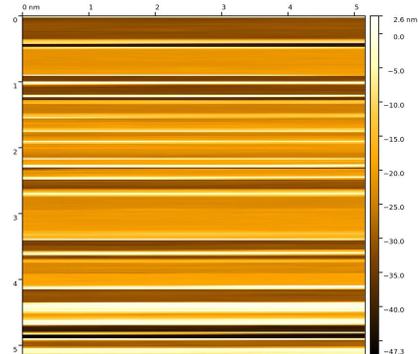
(a) Aufnahme mit positiver Spannung mit einer Seitenlänge von  $0,59 \mu\text{m}$ .



(b) Aufnahme mit positiver Spannung mit einer Seitenlänge von  $5,1 \text{ nm}$ .



(c) Aufnahme mit negativer Spannung mit einer Seitenlänge von  $0,59 \mu\text{m}$ .



(d) Aufnahme mit negativer Spannung mit einer Seitenlänge von  $5,2 \text{ nm}$ .

Abbildung 10: Unterschiedlich große Aufnahmen von Molybdänsulfid mit positiver und negativer Spannung.

## 4 Diskussion

### 4.1 Graphit

Die Gitterkonstante von Graphit konnte zu

$$\bar{G} = (2,37 \pm 0,14) \text{ \AA}$$

bestimmt werden. Der Literaturwert ist  $G_{\text{Literatur}} = 2,456 \text{ \AA}$  [2] und liegt damit in der  $1\sigma$ -Umgebung des durch den Versuchs bestimmten Wertes. Die Graphitstruktur konnte bei den im Versuch aufgenommen Bildern erkannt werden, wenn auch noch nicht perfekt, was darauf schließen lässt, dass die Spitze noch nicht einatomig war. Dies zeigt jedoch, wie gut sich mit dem Rastertunnelmikroskop atomare Strukturen analysieren lassen, da trotz der fern von perfekten Spitze ein recht guter Wert für die Gitterkonstante bestimmt wurde.

### 4.2 Gold

Die Spitze war leider nicht spitz genug, als dass wirklich gute Bilder von Gold gemacht werden konnten. Jedoch konnten die Einstellungen des Rastertunnelmikroskops getestet werden. Es zeigte sich das mit einer Optimierung der einstellbaren Parametern die Qualität der Bilder verbessern könnte, jedoch sind die Grundeinstellung der benutzten Software schon recht gut.

### 4.3 Molybdänsulfid

Die Struktur von Molybdänsulfid konnte in diesem Versuch nicht aufgelöst werden. Dies liegt jedoch nicht ausschließlich an der Qualität der genutzten Spitze, sondern auch an der Qualität der Molybdänsulfidprobe die vorlag. Da die Struktur nicht ausreichend aufgelöst werden konnte, konnte auch kein wirklicher Vergleich zwischen positiver und negativer angelegter Spannung gemacht werden.

## A Anhang

A.1 Laborheft

**Rastertunnel** 16.09.2019

13:35 Uhr: Nach dem Essen liefert 1nA Set Point, 10000 P-Gain, 1000 I-Gain und 17.09.2019  
 OD-Gain ~~von~~ akzeptable Ergebnisse

nach-m-essen ~~mittl~~ - 128 ppl,  $\sim 6nm$  (0,4s)  
 nach-m-essen-grausaufnahme - 128 ppl,  $\sim 500nm$  (0,4s)  
 nach-m-essen-fein-mittel - 256 ppl, 0,8s  $\sim 49nm$   
 nach-m-essen-ozean - 256 ppl, 0,8s  $\sim 4,9nm$   
 nach-m-essen-ozean-dicht - 256 ppl, 0,8s  $\sim 2,5nm$

14:15 Uhr

gold die erste (verwaschelt)	- 128 ppl, 0,4s	$\sim 0,3\mu m$			
gold die zweite	- 256 ppl, 0,8s	$\sim 0,3\mu m$			
gold 3	- 128 ppl, 0,4s	- 200nm	1nA	10000	1000 0
gold 4	- 128 ppl, 0,4s	- 200nm		"	
gold 5	- 256 ppl, 0,8s	- 200nm		"	
gold 6	- 128 ppl, 0,4s	- 200nm, rotation: 90°		"	
gold 7	- 128 ppl, 0,4s	- 200nm		"	500
gold 8			1nA	1000	1000 500
gold 9			1nA	1000	4000 500
gold 10			1nA	1000	0 500
gold 11			1nA	10000	1000 5000
gold 12	- 512 ppl, 1,6s	- 200nm	1nA	10000	1000 0

16:00 Uhr mos ~~1~~ (keine Topografie, aber tip current), 425 nm

16:32 Uhr mos 2 (man sieht was)

mos 3	- 0,59 $\mu m$	0,8s	256 ppl	} Positive Spannung
mos 4	- 49 nm	0,8s	256 ppl	
mos 5	- 5,1 nm	0,8s	256 ppl	
mos 6	- 0,59 $\mu m$	0,8s	256 ppl	} Negative Spannung
mos 7	- 51 nm	0,8s	256 ppl	
mos 8	- 5,2 nm	0,8s	256 ppl	

S. M.

## Literaturverzeichnis

- [1] I. HORCAS, R. FERNANDEZ, J.M. GOMEZ-RODRIGUEZ, J. COLCHERO, J. GOMEZ-HERRERO, A. M. BARO: *WSxM 5.0*
- [2] RITZMANN, Dieter: *Einrichtung eines Versuchs:Rastertunnelmikroskopie für das Fortgeschrittenen-Praktikum 2.* 1994
- [3] S. ROTTINGER, M. K.: *Versuchsanleitungen Fortgeschrittenen Praktikum Teil I – Rastertunnelmikroskop.* 2013