

Experiment I001 - Rastertunnelmikroskop (STM)

Robin Hoffmann*, Arik Bürkle†, Valentin Ertl‡

10. Juni 2025

Kurzfassung

In diesem Experiment wird ein Rastertunnelmikroskop (STM) verwendet, um die atomare Struktur von HOPG und Titan-Nanopartikeln zu betrachten. Dabei zeigen wir, dass das HOPG einen Gitterabstand von $0,1280(7)$ nm hat und die betrachteten Nanopartikel einen Radius von $5,0(4)$ nm besitzen. Auf Grundlage dieser Informationen berechnen wir, dass diese Nanopartikel aus $33(8) \cdot 10^3$ Titanatomen bestehen.

*robin.hoffmann@student.uibk.ac.at

†arik.buerkle@student.uibk.ac.at

‡valentin.ertl@student.uibk.ac.at

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung	1
2 Theorie	2
2.1 Tunneleffekt von Elektronen	2
2.2 Rastertunnelmikroskopie	2
2.3 Highly Ordered Pyrolytic Graphite (HOPG)	3
3 Versuchsaufbau und -durchführung	4
3.1 Versuchsaufbau	4
3.2 Magnetronspattern	4
3.3 Versuchsdurchführung	6
4 Experimentelle Ergebnisse	7
4.1 Gitterstruktur HOPG	7
4.2 Titan Nanopartikel	15
5 Diskussion	15
6 Danksagung	16

1 Einleitung

Das Rastertunnelmikroskop (STM) ist ein bahnbrechendes Instrument in der Nanotechnologie und Materialwissenschaft, das erstmals 1981 von Gerd Binnig und Heinrich Rohrer entwickelt wurde. Für ihre Pionierarbeit erhielten sie 1986 den Nobelpreis für Physik. Das STM ermöglicht die Untersuchung und Manipulation von Oberflächen auf atomarer Ebene und hat zahlreiche Anwendungen in der Wissenschaft und Technik revolutioniert [1]. Die Funktionsweise des STMs basiert auf dem quantenmechanischen Tunneleffekt, einem quantenmechanischen Phänomen, das auftritt, wenn ein Elektron durch eine dünne, ansonsten undurchdringliche Potentialbarriere tunnelt". In einem STM wird eine scharfe Metallspitze extrem nahe an eine leitende oder halbleitende Oberfläche gebracht, wobei der Abstand nur wenige Atomdurchmesser beträgt. Wenn eine kleine Spannung zwischen der Spitze und der Oberfläche angelegt wird, kann ein Tunnelstrom fließen, obwohl die beiden nicht in direktem Kontakt stehen. Der Tunnelstrom ist extrem empfindlich gegenüber dem Abstand zwischen der Spitze und der Oberfläche, was dem STM eine bemerkenswerte räumliche Auflösung verleiht. Eine Änderung des Abstandes um einen einzigen Atomdurchmesser kann den Tunnelstrom um Größenordnungen verändern. Diese Abhängigkeit ermöglicht es dem STM, atomare Strukturen mit hoher Präzision abzubilden. Es gibt drei grundlegende Betriebsmodi: Konstante Höhe, konstanter Strom und spektroskopischer Modus. Die ersten beiden Modi sind Bildgebungsmodi zur Erstellung einer Oberflächentopografiekarte. In der Betriebsart mit konstanter Höhe wird die Spitze in einer Ebene über der Oberfläche abgetastet und der Tunnelstrom als Funktion der anderen beiden Raumrichtungen aufgezeichnet. Das Bild wird so dargestellt, dass die hellsten Regionen diejenigen sind, in denen der Tunnelstrom am größten ist. Diese Methode ist jedoch nur für flache Proben auf atomarer Ebene anwendbar, da andernfalls ein hohes Risiko darin besteht, dass die Spitze mit Erhöhungen auf der Probenoberfläche kollidiert. Bei der Konstantstrommethode wird die Spitzenhöhe vom Computer eingestellt, um einen konstanten Tunnelstrom aufrechtzuerhalten. Wenn die Spitze die Oberfläche abtastet, wird die Höhe der Spitze gemessen und je weiter die Spitze entfernt ist, desto heller erscheint der betreffende Bereich auf dem Bild. Diese Betriebsart ist bei Weitem die am häufigsten verwendete. Der Konstantstrommodus hat einen viel größeren Dynamikbereich, was ihn zur üblichen Wahl für den STM-Betrieb macht. Im spektroskopischen Modus kann man durch Variation der Potentialdifferenz zwischen Spitze und Probe sowohl Spektren als auch den differentiellen Leitwert messen [2]. Das STM hat eine Vielzahl von Anwendungen wie beispielsweise in der Nanotechnologie, wo STM-Techniken verwendet werden, um atomare und molekulare Strukturen zu manipulieren, was den Bau von nanoskaligen Geräten und Materialien ermöglicht. Außerdem trägt das STM in der Festkörperphysik durch die Untersuchung der elektronischen Eigenschaften von Oberflächen und nanostrukturierten Materialien zum Verständnis von Phänomenen wie Supraleitung, Halbleitereigenschaften und Oberflächenrekonstruktionen bei. Doch auch in der Chemie wird das Rastertunnelmikroskop verwendet, um beispielsweise chemische Reaktionen auf Oberflächen zu beobachten und zu kontrollieren, was wichtig für die Katalyseforschung und die Entwicklung neuer Materialien ist [1]. Wie man sieht ist das STM, kombiniert mit seiner Fähigkeit, extrem feine Details auf Oberflächen darzustellen, ein unverzichtbares Werkzeug in vielen Bereichen der Wissenschaft und Technik.

2 Theorie

In diesem Kapitel wird der Elektronentunneleffekt erklärt, welcher die Grundlage für das Raster-tunnelmikroskop (STM) darstellt. Dieser Abschnitt befasst sich zunächst mit dem quantenmechanischen Tunnelprozess, anschließend mit dem Tunnelstrom und schließlich damit, wie diese Eigenschaften als Mikroskop verwendet werden können.

2.1 Tunneleffekt von Elektronen

Der Tunneleffekt beschreibt, wie Teilchen eine Potentialbarriere durchqueren können, ohne das Potential zu überschreiten. Der Effekt ist rein quantenmechanischer Natur und kann über die Schrödinger-Gleichung mittels der Wellenfunktion des Elektrons erklärt werden. Dabei ist die Wellenfunktion innerhalb der Potentialbarriere nicht null, sondern wird durch einen exponentiellen Abfall beschrieben. Endet die Barriere nach einer Strecke s , ist die Amplitude der Wellenfunktion hinter der Barriere nicht null, sodass das Teilchen auch hinter der Barriere existieren kann. Dieses Phänomen ist in Abbildung 1 dargestellt. Der Transmissionskoeffizient T beschreibt das

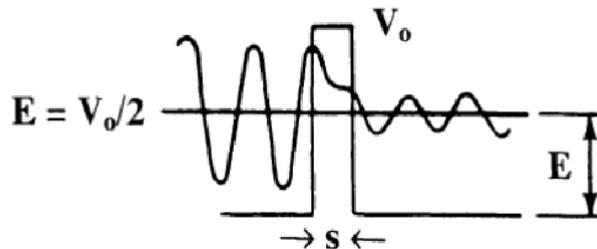


Abbildung 1: Wellenfunktion mit Potentialbarriere [2]

Verhältnis der Wahrscheinlichkeiten, dass sich das Teilchen vor und nach der Barriere aufhält, und damit auch die Rate, mit welcher Elektronen die Barriere durchtunneln.

$$T = \left| \frac{F}{A} \right|^2 \sim e^{-s} \quad (1)$$

Gleichung 1 zeigt die Abhängigkeit des Transmissionskoeffizienten von den Amplituden der Wellenfunktionen. Dabei ist A die Amplitude der Wellenfunktion vor der Barriere und F die Amplitude nach der Barriere. Die Transmission ist exponentiell abhängig von der Länge s der Barriere.

2.2 Rastertunnelmikroskopie

Den Tunneleffekt kann man nutzen, um Abstände zwischen zwei Leitern zu bestimmen. Dazu wird eine Nadel sehr nahe an eine leitende Oberfläche gebracht, sodass die Elektronen von der Nadel zur Oberfläche tunneln können. Dadurch kann ein Stromfluss entstehen, auch bei Spannungen, die so klein sind, dass das Potential nicht überwunden werden kann. Der Stromfluss ist dabei exponentiell vom Abstand der Nadel abhängig, wodurch ein sehr genaues Messinstrument für Abstände in atomarer Größenordnung entsteht. Diese Eigenschaft kann genutzt werden,

um die Oberfläche eines Leiters mit einer Spitzen-Nadel abzutasten, wie in Abbildung 2 dargestellt. Dabei kann der entstehende Tunnelstrom durch Gleichung 2 beschrieben werden.

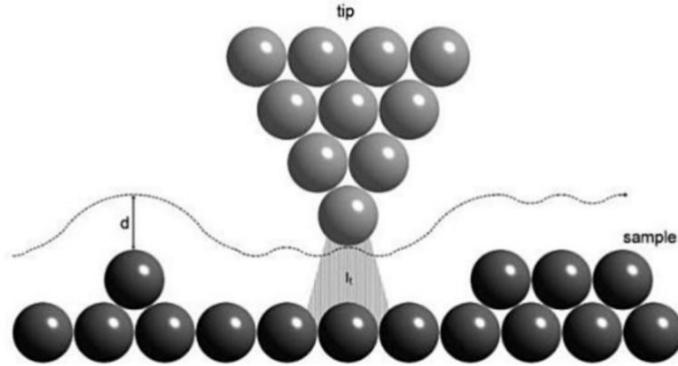


Abbildung 2: Schematische Darstellung der STM-Spitze und der Probe auf atomarer Ebene. [2]

$$I \sim c_1 U_1 e^{c_2 s \sqrt{\phi}} \quad (2)$$

Dabei beschreibt U_1 die angelegte Spannung zwischen der Oberfläche und der Nadel, s den Abstand zwischen der Nadel und dem nächsten Teilchen, und $\phi = \frac{1}{2}(\phi_n + \phi_p)$ die effektive Arbeit, die aufgebracht werden muss, um die Barriere zu überwinden. Dabei sind ϕ_n und ϕ_p die benötigte Arbeit für die Nadel und die Probe. Durch abtasten der Oberfläche in einem Raster kann die atomare Struktur an der Oberfläche aufgenommen werden.

2.3 Highly Ordered Pyrolytic Graphite (HOPG)

In diesem Versuch wird die Struktur von Graphit näher untersucht. Graphit ist ein leitfähiges Material, das aus Kohlenstoffatomen besteht. Es ist aus Schichten von hexagonalen Ebenenstrukturen aufgebaut, wie in Abb. 3 dargestellt. Dabei sind zwei übereinanderliegende Schichten leicht zueinander versetzt, wodurch nur drei der sechs Atome pro Hexagon einen direkt darunterliegenden Nachbarn haben. Dieser Nachbar sorgt dafür, dass die benötigte Arbeit, um das Vakuum zu überwinden, größer wird. Im Rasterelektronenmikroskop führt dies dazu, dass drei der sechs Atome leicht heller erscheinen, aufgrund der unterschiedlichen Zustandsdichte.

Im Graphit haben die einzelnen Atome einen Abstand von 0,14 nm, und die Längen der Gittervektoren, also Abstand der Atome im gleichschenkligen Dreieck, beträgt 0,25 nm. Der Abstand zwischen zwei Schichten beträgt 0,34 nm.

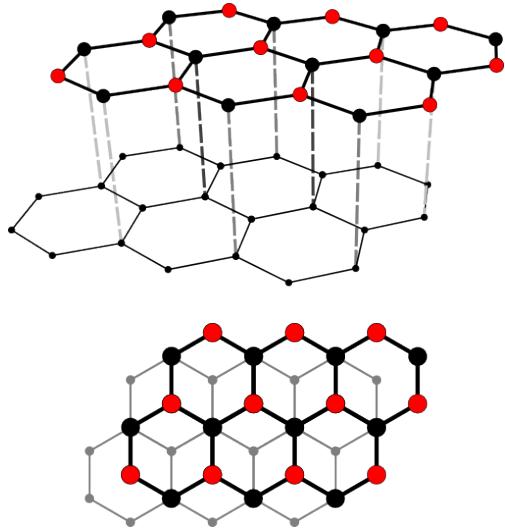


Abbildung 3: Schematische Aufbau der Gitterstruktur von Graphit [3]

3 Versuchsaufbau und -durchführung

Die folgenden Textabschnitte veranschaulichen den Versuchsaufbau und erläutern die genaue Datenaufzeichnung und Durchführung des Experiments.

3.1 Versuchsaufbau

Der Versuchsaufbau besteht im Wesentlichen aus einem Computer, der mit dem Mikroskop verbunden ist und die Auswertungssoftware nanosurf® bereitstellt, sowie dem für diesen Versuch verwendeten Naio-Rastertunnelmikroskop (siehe Abbildung 4) mit der verwendeten Graphitprobe (HOPG-Probe). Ein typisches STM besteht aus mehreren Schlüsselkomponenten: einer sehr feinen und scharfen Metallspitze für höchste Auflösung, einem piezomechanischen Scanner, der die Spitze in winzigen Schritten über die Oberfläche bewegt und die Topographie der Probe (in diesem Fall Graphit) mit atomarer Auflösung abbildet. Die Probe wird auf einem leitfähigen Substrat montiert und stabil fixiert, um Vibratoren und thermische Drifts zu minimieren. Elektronische Systeme steuern die Spannung zwischen Spitze und Probe, messen den Tunnelstrom und justieren den Abstand der Spitze zur Probe basierend auf dem gemessenen Strom, um ein konstantes Stromniveau aufrechtzuerhalten. Mechanische und akustische Isolationssysteme reduzieren zusätzlich Vibratoren, die die Messungen beeinträchtigen könnten [4].

3.2 Magnetronputtern

Im zweiten Teil des Versuchs sollen Titan-Nanopartikel auf der Oberfläche aufgebracht werden. Hierfür wird ein Magnetron verwendet, um die Oberfläche mit Nanopartikeln zu versehen. Im folgenden Abschnitt wird das Magnetronputtern näher erklärt.

Das Prinzip des Magnetronputterns basiert auf der Erzeugung dünner Schichten durch physikalische Abscheidung von Material auf einem Substrat. In einer typischen Anordnung einer DC-Magnetronquelle zur Dünnschichtpräparation, wie sie in Abbildung 5 schematisch dargestellt ist, werden Argonatome durch Elektronen, die den magnetischen Feldlinien folgen, ionisiert. Diese



Abbildung 4: Bild des verwendeten Rastertunnelmikroskops. In der Einkerbung der orangenen Deckfläche befindet sich die Probe und die Spitze. Bildquelle: [2]

ionisierten Argonatome werden dann durch ein angelegtes elektrisches Feld beschleunigt und treffen auf das Targetmaterial, das auf einem negativen Bias gehalten wird. Durch die kinetische Energie der aufprallenden Argonionen werden neutrale Atome sowie negativ geladene Ionen aus dem Targetmaterial herausgeschlagen, ein Prozess, der als Sputtern bezeichnet wird. Die herausgeschlagenen Teilchen bewegen sich dann durch das Vakuum und setzen sich auf dem Substrat ab, wodurch eine dünne Schicht entsteht. Negativ geladene Ionen können in Inhomogenitäten des elektrischen Feldes eingefangen werden und über Gasaggregation zu Clustern und Nanopartikeln wachsen, die schließlich ebenfalls auf dem Substrat landen.

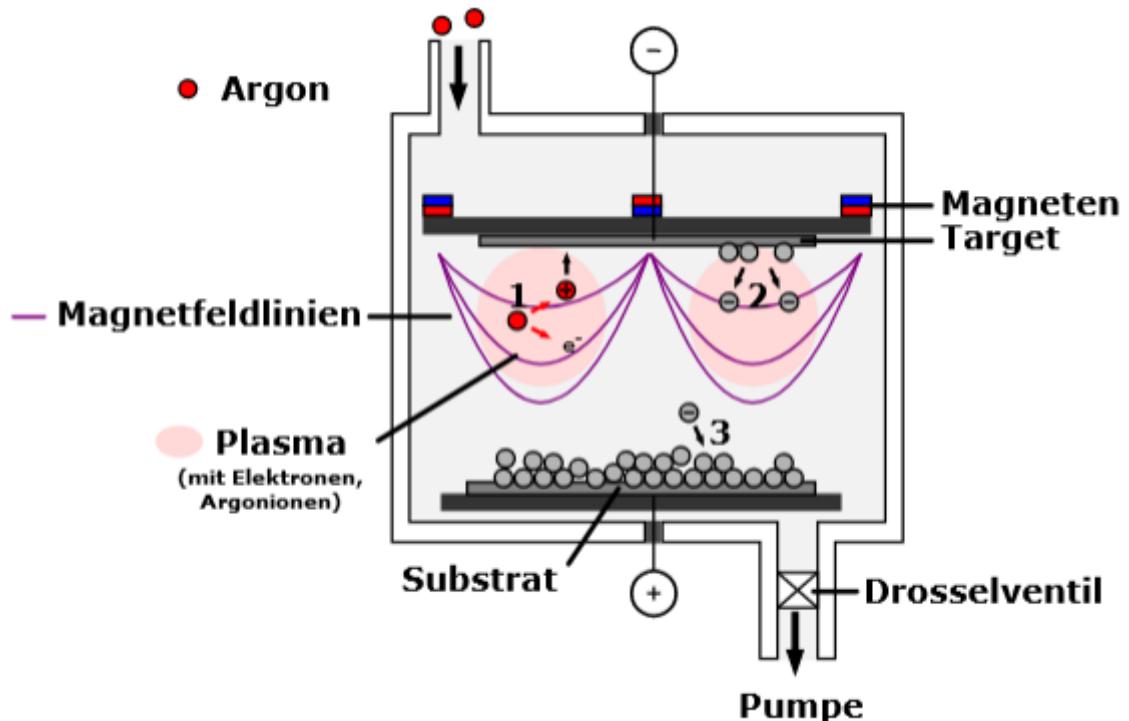


Abbildung 5: Schematische Darstellung eines DC-Magnetrons [2]

3.3 Versuchsdurchführung

Die Durchführung des Experiments kann in einzelne Schritte unterteilt werden. Zu Beginn gilt es, aus einem Draht eine möglichst spitze bzw. scharfe Abtastspitze zu erstellen. Dazu muss man zu Beginn erstmal alle verwendeten Materialien gründlich säubern und schneidet dann vom Draht ein ca. 8 mm langes Stück ab. Von diesem Drahtstück knippst man dann möglichst schräg ein Ende ab, um eine gut verwendbare Spitz zu erhalten. Als nächstes montiert man die Spitz im Naio-STM. Dazu führt man sie mit einer Pinsette von der Seite unter die dafür vorgesehene Halterung im STM ein. Das Erstellen einer verwendbaren Spitz ist der schwierigste Teil in der Durchführung des Experiments und kann durchaus Geduld verlangen. Als nächstes wird die verwendete Graphitprobe vorbereitet. Das Ziel ist es eine möglichst glatte und schmutzfreie Graphitoberfläche zu haben. Dazu zieht man die Oberfläche der Probe mit einem Stück Klebeband ab. Wenn noch Unebenheiten zu erkennen sind können diese ebenfalls mit dem Klebeband entfernt werden. Die fertig vorbereitete Probe kann dann auf der Probenhalterung montiert werden und in die dafür vorgesehene Einkerbung im STM (siehe Abbildung 4) eingesetzt werden. Die Spitz und die Graphitprobe, welche man natürlich nie mit den bloßen Fingern berühren sollte befinden sich nun in einem Abstand von ca. 2-3 mm gegenüberliegend in der Einkerbung des STMs. Alle Vorbereitungen sind nun abgeschlossen und die ersten Bilder können aufgenommen werden. Nachdem die Software auf dem Computer geöffnet wurde, muss man die Spitz möglichst nah manuell per Mausklicks an die Graphitoberfläche annähern. Dann kann man den Button "automatic Approach" klicken. Wenn der Punkt im unteren Bildrand der Software rot leuchtet, hat man mit der Spitz die Graphitoberfläche gerammt und möglicherweise Schäden angerichtet. Man muss dann eine neue Spitz erstellen und von vorne beginnen. Bei einem orangenen Punkt befindet man sich mit der Spitz noch zu weit von der Probe entfernt, weshalb kein Tunnelstrom fließen kann. Nur der grün leuchtende Punkt bedeutet, dass man sich im richtigen Abstand zur Probe befindet und der Tunnelstrom fließt, weshalb das STM seine Arbeit beginnen kann. Das Bild wird nun automatisch erstellt. Man kann die Scan-Range und die Scangeschwindigkeit jederzeit anpassen, indem man den Scannvorgang mit dem SStop-Button unterbricht. Der erste Teil des Experiments, die Aufnahme mehrerer Bilder der Graphitoberfläche mit dem Naio-Rastertunnelmikroskop ist nun abgeschlossen. Ziel dieses Teils ist es dann mit den besten Bildern der HOPG-Oberfläche den Abstand der Graphitatome über etwa 10 Atome zu messen, um einen besseren Durchschnittsabstand zu erhalten. Außerdem wird versucht eine Stufe in der Graphitoberfläche zu finden und die Stufenhöhe zu bestimmen. Die gemessenen Werte werden dann mit den Literaturwerten verglichen.

Im Zweiten Teil des Versuchs geht es darum, durch Magnetronzerstäubung kleine Nanopartikel auf der Graphitoberfläche zu erzeugen und von diesen dann ebenfalls mehrere Aufnahmen mit dem STM zu erstellen. Die Nanopartikel werden im Labor mithilfe eines Magnetrons im DC Sputterbetrieb auf der Pobenoberfläche erzeugt. Auf die genaue Prozedur wird hier nicht eingegangen. Die Graphitoberfläche mit den Nanopartikeln wird nun wieder in das Naio-STM eingeführt und es werden mehrere Bilder erstellt. Ziel ist es dann, aus den Aufnahmen die durchschnittliche Partikelgröße zu bestimmen. Dazu wird die Auswertungssoftware "Gwyddion" verwendet, was detailliert in 4 erklärt wird. [2]

4 Experimentelle Ergebnisse

In diesem Abschnitt werden die aufgenommenen Daten dargestellt und ausgewertet. Im ersten Teil wird die Struktur von HOPG analysiert, die Abstände zwischen den Atomen werden ermittelt und eine Stufe zwischen den Schichten wird betrachtet. Im zweiten Teil werden Titan-Nanopartikel betrachtet und deren Größe wird bestimmt.

4.1 Gitterstruktur HOPG

Wie in Kapitel 2.3 besprochen, besitzt Graphit eine hexagonale Gitterstruktur, die mittels eines STM aufgelöst werden kann. In Abbildung 6 ist eine Aufnahme von HOPG zu sehen, bei der die hellen Punkte die Atome darstellen, die nicht mit der unteren Schicht verbunden sind. Hilfreich sind Gitterlinien zwischen diesen Atomen eingezeichnet, die eine dreieckige Gitterstruktur bilden und entlang der Gittervektoren verlaufen. Um den Gitterabstand der Atome zu bestimmen, werden in jede Gitterrichtung möglichst viele Linien eingezeichnet, die jeweils 10 Gitterabstände betragen. Dies ist in Abbildung 9 zu sehen. Dadurch wurde ein Gitterabstand von $d_1 = 0,1205(13)$ nm in Richtung 1 (näher zu waagerecht), $d_2 = 0,1285(14)$ nm in Richtung 2 (von rechts oben nach links unten) und $d_3 = 0,1349(12)$ nm in Richtung 3 (von links unten nach rechts oben) bestimmt. Der Fehler der Messung ergibt sich primär aus zwei Größen: Zum einen der Standardabweichung von allen Messwerten und zum anderen aus der Ausdehnung der Atome. Wie in Abbildung 13 dargestellt, haben die Atome eine gewisse Ausdehnung, die beim Abmessen der Abstände dazu führt, dass der Mittelpunkt der Atome nicht exakt ermittelt werden kann. Dabei entsprechen die eingezeichneten Linien etwa 2 Standardabweichungen vom Durchmesser. Die entstehenden Gitterabstände sollten bei einem perfekten Bild alle gleich sein, jedoch kann es durch Licht, Wärme oder Vibrationen zu einem Drift der Nadel kommen, weshalb die Abstände in die einzelnen Richtungen etwas unterschiedlich sind. Der gemittelte Gitterabstand beträgt somit $0,1280(7)$ nm. Dieses Ergebnis weicht von dem Literaturwert von $0,25$ nm [3] um einen Faktor 2 ab. Da auf dem Bild die Gitterstruktur sehr gut erkennbar ist und somit eine falsche Abschätzung der Gitterstruktur nahezu ausgeschlossen werden kann, kommen wir zu dem Schluss, dass das STM sehr wahrscheinlich falsch kalibriert sein muss.

Neben der Gitterstruktur des HOPG können auch Stufen zwischen den Schichten analysiert werden. Dazu wird der Scanbereich auf 300 nm vergrößert. In Abbildung 15 sind Sprünge im Höhenprofil erkennbar. Messungen der Höhenunterschiede ergaben für den Sprung in Abbildung 15 eine Höhe von $h_1 = 0,30(7)$ nm, für den Sprung in Abbildung 16 eine Höhe von $h_2 = 0,38(7)$ nm, für den oberen Sprung in Abbildung 17 eine Höhe von $h_{31} = 0,32(7)$ nm und für den unteren Sprung $h_{32} = 0,22(7)$ nm, sowie für die Eckstelle in Abbildung 18 eine Höhe von $h_4 = 0,48(7)$ nm. Die Höhenunterschiede wurden für diese Messungen mithilfe eines Geodreiecks aus dem Höhenprofil ausgelesen. Der Fehler beschreibt die Unsicherheiten der Höhenunterschiede, wobei ein Fehler von $\delta h = 0,05$ nm für jede Messung angenommen wurde. Der Ablesefehler ist zwar kleiner, jedoch kann nicht genau bestimmt werden, bei welcher Höhe der Sprung genau beginnt, da das Höhenprofil kleine Schwankungen aufweist.

Die ersten zwei Sprünge stimmen mit dem Literaturwert des Abstands zwischen zwei Schichten

von 0,335 nm überein [3]. Für die dritte Sprungstelle stimmen die einzelnen Höhen nicht mit dem Schichtabstand überein, jedoch wenn man diese als Doppelsprung betrachtet, passt die Höhe mit dem Literaturwert zusammen. Die Eckstelle zwischen den beiden Kanten zeigt eine Höhe, die nicht dem Schichtabstand entspricht, was wahrscheinlich auf die komplexe Struktur an dieser Ecke zurückzuführen ist. Eine nähere Betrachtung wäre notwendig, um ein besseres Verständnis zu erlangen.

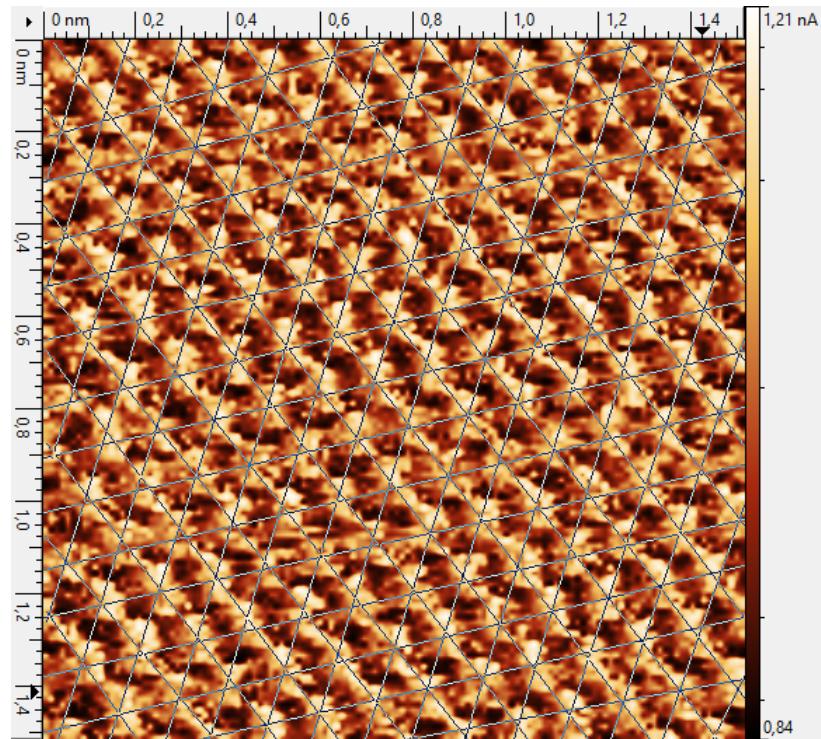


Abbildung 6: Aufnahme der Graphit-Struktur mit eingezeichneten Strukturlinien zur besseren Visualisierung des Musters.

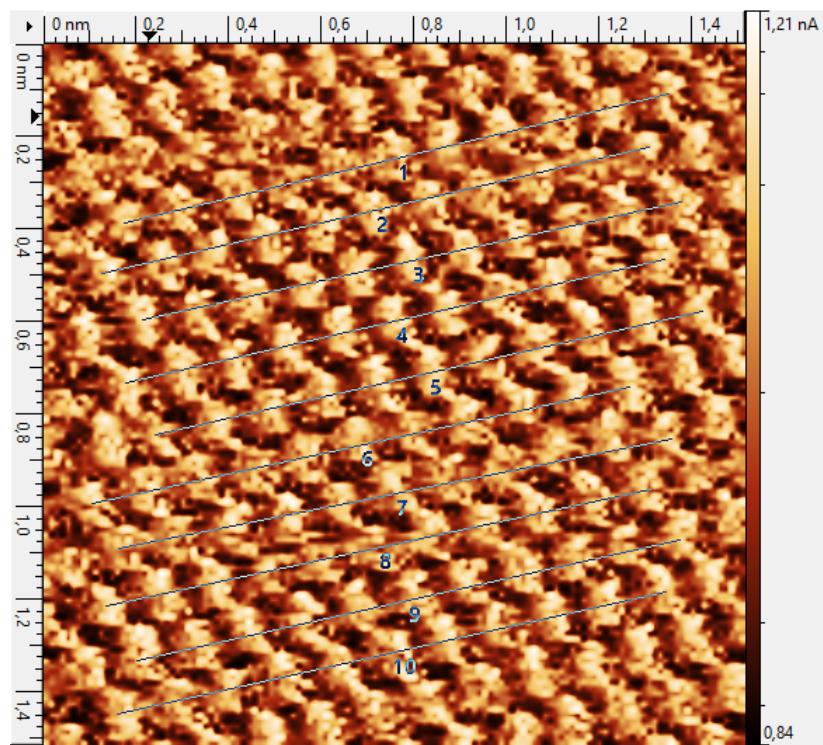


Abbildung 7: Messung der Teilchengröße in Richtung 1. Es wurden 10 Messungen getätigt (mit 1-10 markiert), bei denen jeweils über 10 Atomabstände gemessen wurde. Die Messergebnisse können im Screenshot der Ausgabedaten in Abbildung 8 betrachtet werden.

n	Δx [nm]	Δy [nm]	φ [Grad]	R [nm]	Δz [pA]
1	1,176	-0,279	13,3	1,209	-46,3
2	1,183	-0,273	13,0	1,214	31,4
3	1,164	-0,255	12,3	1,192	-56,3
4	1,164	-0,267	12,9	1,195	-4,2
5	1,183	-0,267	12,7	1,212	26,6
6	1,161	-0,252	12,2	1,188	23,2
7	1,195	-0,237	11,2	1,218	41,8
8	1,176	-0,252	12,1	1,203	-62,9
9	1,173	-0,261	12,5	1,202	8,0
10	1,186	-0,264	12,5	1,215	10,8

Abbildung 8: Screenshot der Ausgabedaten der Messung aus 7. Die Spalte 'R[nm]' gibt die Länge der Messlinie an und ist für die weitere Auswertung relevant. Die Spalte ' Δz [pA]' gibt den Höhenunterschied über die Stromstärke an.

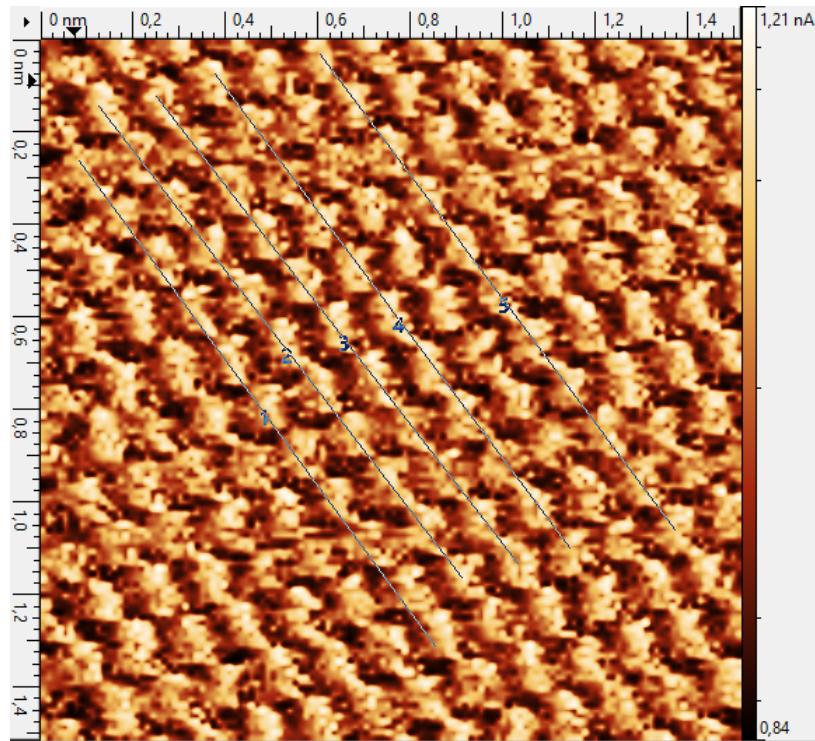


Abbildung 9: Messung der Teilchengröße in Richtung 2. Es wurden 5 Messungen getätigt (mit 1-5 markiert), bei denen jeweils über 10 Atomabstände gemessen wurde. Die Messergebnisse können im Screenshot der Ausgabedaten in Abbildung 10 betrachtet werden.

n	Δx [nm]	Δy [nm]	φ [Grad]	R [nm]	Δz [pA]
1	0,770	1,049	-53,7	1,301	-42,0
2	0,785	1,019	-52,4	1,286	30,3
3	0,782	1,010	-52,2	1,277	-30,1
4	0,767	1,025	-53,2	1,280	-12,7
5	0,767	1,028	-53,3	1,283	4,1

Abbildung 10: Screenshot der Ausgabedaten der Messung aus 9. Die Spalte 'R[nm]' gibt die Länge der Messlinie an und ist für die weitere Auswertung relevant. Die Spalte ' Δz [pA]' gibt den Höhenunterschied über die Stromstärke an.

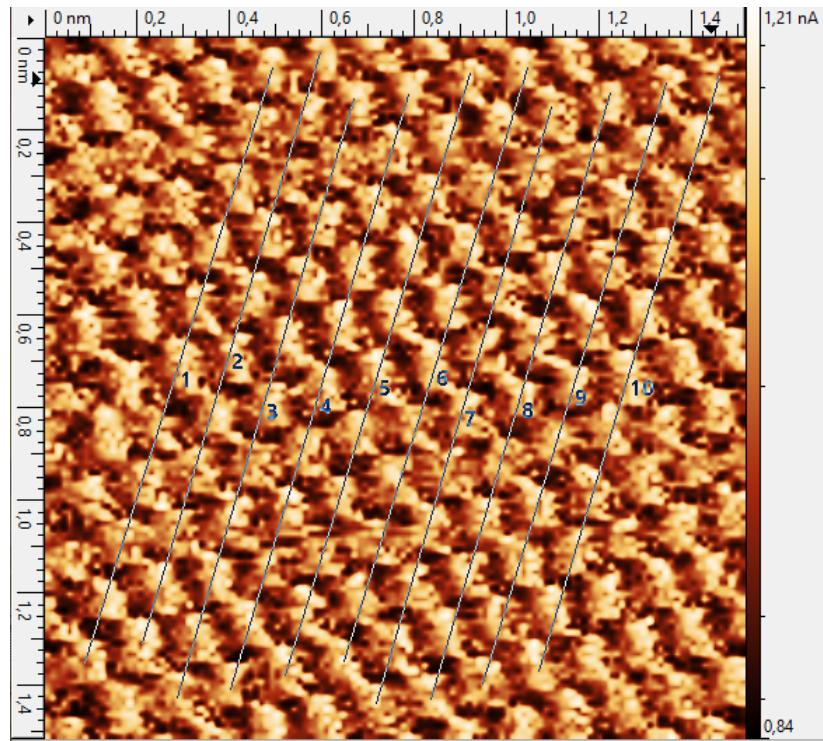


Abbildung 11: Messung der Teilchengröße in Richtung 3. Es wurden 10 Messungen getätigt (mit 1-5 markiert), bei denen jeweils über 10 Atomabstände gemessen wurde. Die Messergebnisse können im Screenshot der Ausgabedaten in Abbildung 12 betrachtet werden.

n	Δx [nm]	Δy [nm]	φ [Grad]	R [nm]	Δz [pA]
1	-0,406	1,286	-107,5	1,348	-49,2
2	-0,385	1,277	-106,8	1,333	-26,6
3	-0,382	1,295	-106,4	1,350	2,5
4	-0,385	1,286	-106,7	1,342	-11,7
5	-0,400	1,301	-107,1	1,361	-40,8
6	-0,397	1,283	-107,2	1,343	93,6
7	-0,379	1,289	-106,4	1,343	53,4
8	-0,388	1,310	-106,5	1,366	-11,0
9	-0,397	1,298	-107,0	1,357	-10,2
10	-0,391	1,286	-106,9	1,344	52,0

Abbildung 12: Screenshot der Ausgabedaten der Messung aus 11. Die Spalte 'R[nm]' gibt die Länge der Messlinie an und ist für die weitere Auswertung relevant. Die Spalte ' Δz [pA]' gibt den Höhenunterschied über die Stromstärke an.

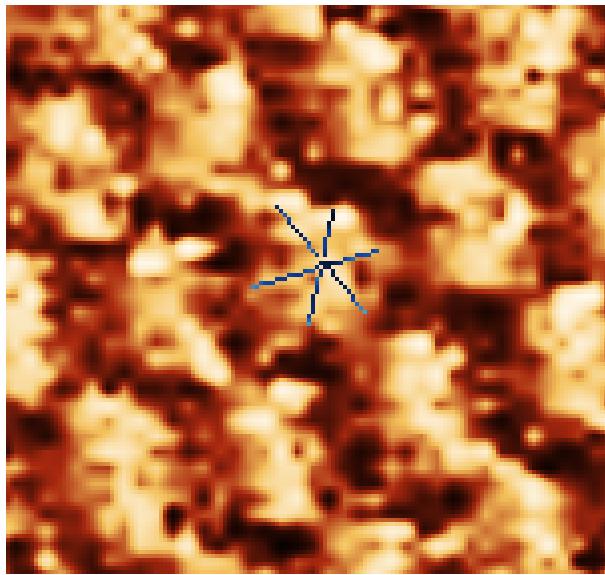


Abbildung 13: Messung des Fehlers der Teilchengröße, hierzu wurde die Größe eines einzelnen hellen Punktes bestimmt. Die Abbildung zeigt einen quadratischen Bildausschnitt mit Seitenlängen von 0,3 nm. Die Messergebnisse können im Screenshot der Ausgabedaten in Abbildung 14 betrachtet werden.

n	Δx [nm]	Δy [nm]	φ [Grad]	R [nm]	Δz [pA]
1	0,094	-0,027	16,2	0,098	20,8
2	-0,067	-0,079	130,2	0,103	68,5
3	0,018	-0,085	77,9	0,087	76,7

Abbildung 14: Ausgabedaten der Messung aus 13. Die Spalte 'R[nm]' gibt die Länge der Messlinie an und ist für die weitere Auswertung relevant. Die Spalte ' Δz [pA]' gibt den Höhenunterschied über die Stromstärke an.

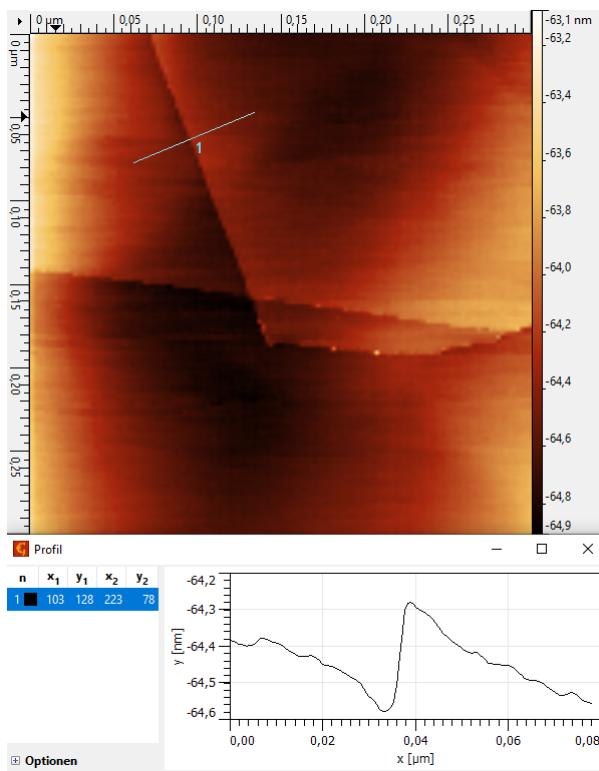


Abbildung 15: Messung einer Kante in der Graphitstruktur. Die Messlinie ist hierbei mit 1 gekennzeichnet. Unten ist der Höhenverlauf der Messlinie angegeben.

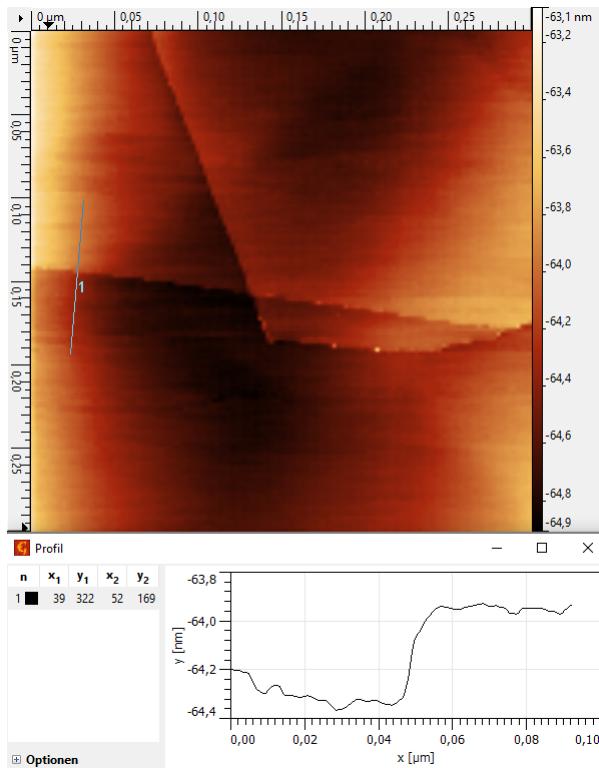


Abbildung 16: Messung einer Kante in der Graphitstruktur. Die Messlinie ist hierbei mit 1 gekennzeichnet. Unten ist der Höhenverlauf der Messlinie angegeben.

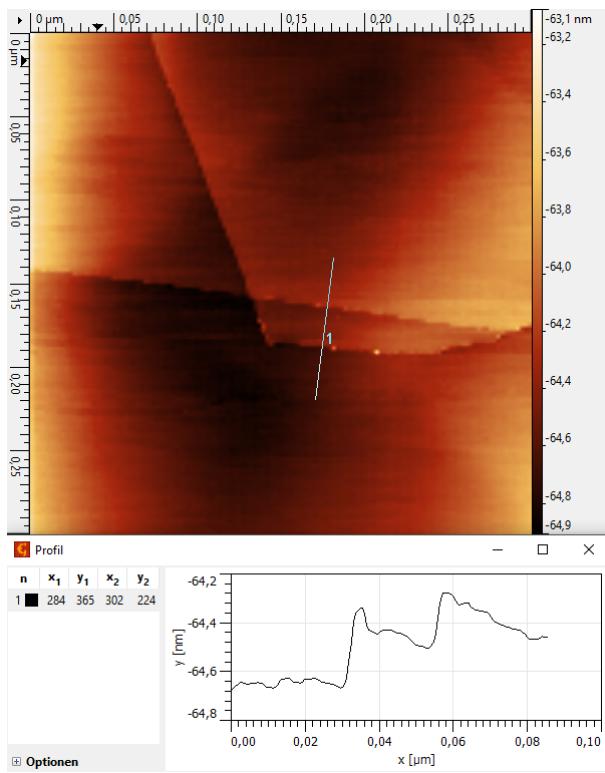


Abbildung 17: Messung einer Kante in der Graphitstruktur. Die Messlinie ist hierbei mit 1 gekennzeichnet. Unten ist der Höhenverlauf der Messlinie angegeben.

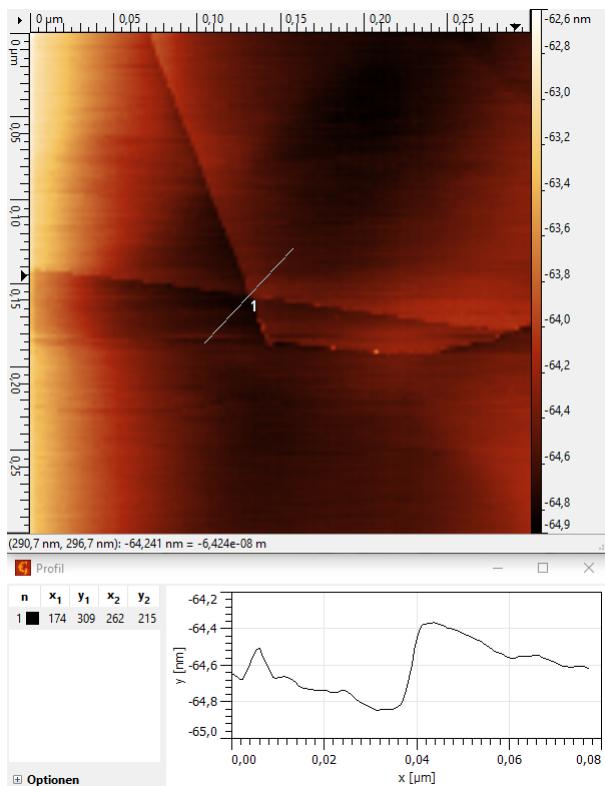


Abbildung 18: Messung einer Kante in der Graphitstruktur. Die Messlinie ist hierbei mit 1 gekennzeichnet. Unten ist der Höhenverlauf der Messlinie angegeben.

4.2 Titan Nanopartikel

Nachdem die Nanopartikel auf der Graphitoberfläche abgelagert wurden, wurden sie mittels des STM wieder betrachtet. Diese sind in Abbildung 19 zu erkennen. Im Bild ist zu sehen, dass die Nanopartikel ellipsoidförmig sind. Es wären runde Nanopartikel zu erwarten, doch durch Drift kann eine Richtung länger gezogen werden. Zur Bestimmung der Größe wurde der Durchmesser in zwei Richtungen bestimmt. Dabei wurde darauf geachtet, dass die beiden Richtungen möglichst rechtwinklig zueinander sind, um Driftcharakteristiken auf ein Minimum zu reduzieren. Durch das Ausmessen von 10 Nanopartikeln kamen wir auf einen durchschnittlichen Radius von $r_{NP} = 5,0(4)$ nm, wobei der Fehler der Standardabweichung entspricht. Es wurde keine Methode gefunden, um den Fehler der manuell ausgemessenen Durchmesser quantitativ auszuwerten, weshalb dieser nicht im Ergebnis berücksichtigt wurde.

Aus dem Atomradius von Titan von $r_{\text{Titan}} = 0,14$ nm ergibt sich unter der Annahme von kugelförmigen Nanopartikeln, dass jedes Nanopartikel aus $N = 33(8) \cdot 10^3$ Atomen bestehen muss. Dabei wurde berücksichtigt, dass Kugeln das Volumen nicht vollständig ausfüllen können.

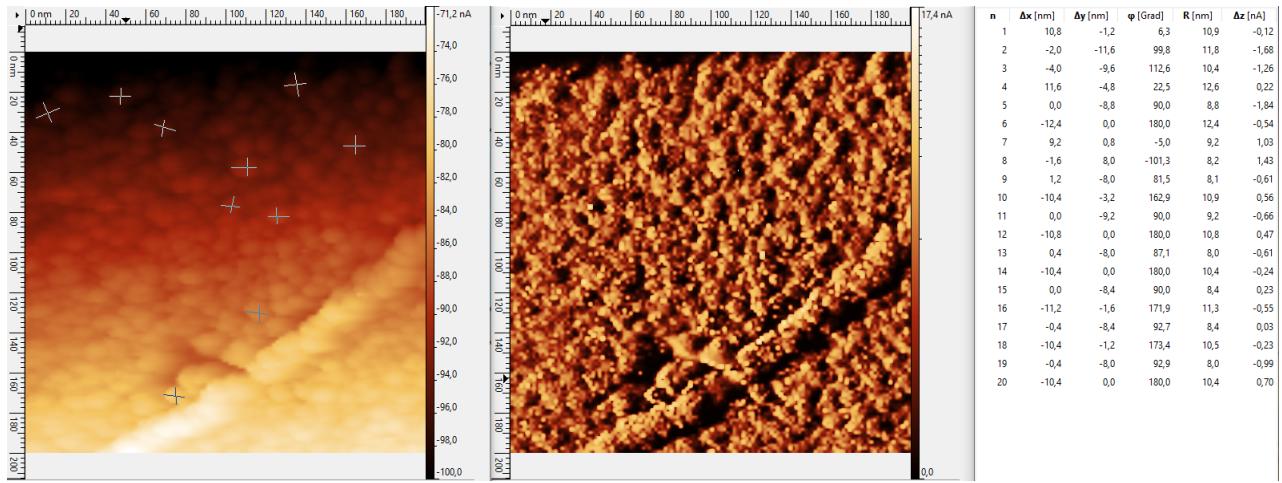


Abbildung 19: Messung der Titan-Nanopartikel auf der Graphitoberfläche. Es sind zwei verschiedene Aufnahmen desselben Bildausschnitts zu sehen, wobei sich die linke besser eignet, um die Messung der Nanopartikel anzustellen. Die Messlinien sind als Kreuze in der Aufnahme zu erkennen. Die Messwerte können in der Tabelle rechts betrachtet werden. Die Spalte 'R[nm]' gibt die Länge der Messlinie an und ist für die weitere Auswertung relevant. Die Spalte ' Δz [pA]' gibt den Höhenunterschied über die Stromstärke an.

5 Diskussion

Zusammengefasst konnte in diesem Experiment durch die Nutzung eines STM das Gitter einer HOPG-Oberfläche und Nanopartikel direkt visuell aufgelöst werden. Dabei haben wir gelernt, wie man ein solches STM bedienen kann und eine Möglichkeit zur Herstellung von Titan-Nanopartikeln kennengelernt. Durch Auswertung der entstehenden Bilder konnte für das HOPG eine Gittervektorlänge von $d = 0,1280(7)$ nm bestimmt werden. Diese weicht um einen Faktor von etwa 2 von der Literaturlänge ab, was wir durch einen Kalibrierungsfehler erklärt haben. Durch das STM war es auch möglich, Sprünge in Schichten zu erkennen, was die Schichtstruktur des

HOPG sehr gut visualisiert hat. Durch den Versuch haben wir auch gelernt, wie man Nanopartikel mittels eines Magnetrons herstellen kann, und konnten diese mittels des STM analysieren. Dabei fanden wir eine unkorrigierte Partikelgröße von $r = 5,0(4)$ nm, wodurch wir berechnet haben, dass ein Nanopartikel aus $33(8) \cdot 10^3$ Titanatomen besteht. Eine Spektroskopieanalyse war uns leider nicht möglich, da wir trotz intensiver Recherche keine Methodik in der Auswertungssoftware gefunden haben, um den Datensatz zu analysieren.

6 Danksagung

Wir möchten uns herzlich bei Franzi bedanken, die uns bei der Durchführung des Versuchs unterstützt hat und uns ein klares Bild von der Gitterstruktur und den Nanopartikeln zur Verfügung gestellt hat, was zu einer verbesserten Auswertung beigetragen hat. Ihre Bilder wurden für die Auswertung verwendet, da in unserem eigenen Bild die einzelnen Atome der Gitterstruktur nicht erkennbar waren, was eine genaue Bestimmung des Abstands unmöglich machte. Ebenso waren in unserem Bild nur drei Nanopartikel deutlich zu erkennen, was zu einer unzureichenden Auswertung geführt hätte. Nochmals vielen Dank von der Gruppe A.

Literatur

- [1] Wikipedia. *Rastertunnelmikroskop*. Online; Status 04.04.24. Abgerufen am 31.05.2024. URL: <https://de.wikipedia.org/wiki/Rastertunnelmikroskop#Geschichte>.
 - [2] U. Innsbruck. *FP1 Versuch I001: Rastertunnelmikroskop (STM)*. Skript; Status SS2024. Abgerufen am 31.05.24.
 - [3] Wikipedia. *Graphit*. Online; Status 17.04.24. Abgerufen am 02.06.2024. URL: <https://de.wikipedia.org/wiki/Graphit>.
 - [4] E.-L. P. Zürich. *Das Raster-Tunnelmikroskop*. Online; Status unbekannt. Abgerufen am 31.05.2024. URL: [https://ethz.ch/content/dam/ethz/special-interest/dual/educeth-dam/documents/Unterrichtsmaterialien/physik/Raster-Tunnel-Mikroskop%20\(Leitprogramm\)/kapitel1.pdf](https://ethz.ch/content/dam/ethz/special-interest/dual/educeth-dam/documents/Unterrichtsmaterialien/physik/Raster-Tunnel-Mikroskop%20(Leitprogramm)/kapitel1.pdf).

Erklärung

Hiermit bestätigen wir, dass der vorliegende Bericht unabhängig verfasst wurde und dass alle erforderlichen Quellen und Referenzen angegeben wurden.

Arik Bürkle 02.06.2024
Student 1 Datum

Robin Hoffmann 02.06.2024
Student 2 Datum

V. G.

Valentin Ertl
Student 3

Arbeitsaufwand

Arik Bürkle

Vorbereitung:4h

Versuch:3h

Bericht:9h

Robin Hoffmann

Vorbereitung:2h

Versuch:3h

Bericht:10h

Valentin Ertl

Vorbereitung:4h

Versuch:3h

Bericht:8h