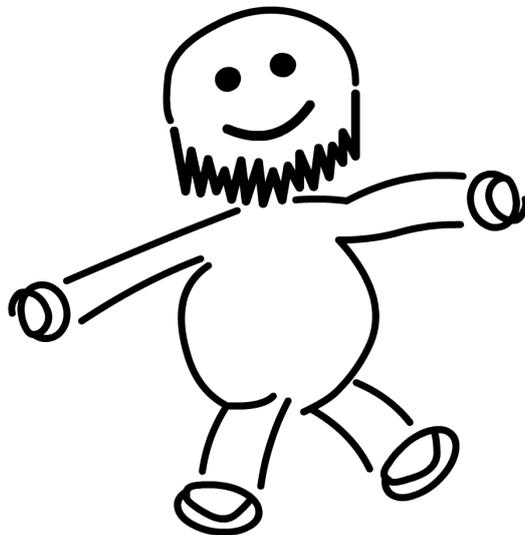


Physikalisches Praktikum für Fortgeschrittene

Versuch C2

Untersuchungsmethoden der Nanotechnologie: Oberflächenanalyse mit Hilfe der Rasterkraftmikroskopie

Wintersemester 2006 / 2007



Name:	Daniel Scholz
Mitarbeiter:	Hauke Rohmeyer
E-Mail:	physik@mehr-davon.de
Gruppe:	56
Assistent:	Jan Müller
Durchgeführt am:	24. Oktober 2006
Protokoll abgeben:	7. November 2006

Vorbereitung: ___ Versuch: ___ Protokoll: ___

Testiert: _____ Note: _____

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	3
2	Theorie	3
2.1	Das Rasterkraftmikroskop	3
2.2	Potentialfeld zwischen Spitze und Probe	5
2.3	Grenzen der Auflösung	6
2.4	Der Regelkreis	7
2.5	Eichung durch Bestimmung einer bekannten Gitterkonstanten	8
2.6	Rauhigkeit von Oberflächen	8
2.7	Wachstum dünner Metallschichten	9
3	Versuchsdurchführung	12
4	Auswertung	12
4.1	Eichung	12
4.2	Messung	15
5	Diskussion	18
6	Anhang	18

1 Einleitung

Seit der Entwicklung der Rastertunnelmikroskopie wurden viele Rastersondenmikroskope entwickelt, die alle ein gemeinsames Prinzip haben, nämlich das Abtasten einer Oberfläche mit einer sehr dünnen Spitze, die dabei eine physikalische Größe wie Tunnelstrom, Kapazität oder – wie in unserem Versuch – die Kraft je nach Modus misst.

Die um 1985 entwickelte Rasterkraftmikroskopie nutzt als Messgröße die Kraft zwischen Spitze und Probe, die eine Schwingung der abtastenden Spitze verändert. Dies erlaubt Aufnahmen von Oberflächen mit einer Auflösung im nm Bereich. Der Vorteil gegenüber der Rastertunnelmikroskopie besteht darin, dass mit einem Rasterkraftmikroskop nicht nur leitende, sondern auch organische Materialien wie Zellen untersucht werden können.

Ziel des Versuches ist das Kennenlernen der Rasterkraftmikroskopie. Dazu untersuchen wir unter anderem die Oberflächenrauigkeit und die Korngröße von Goldfilmen mit unterschiedlichen Wachstumstemperaturen sowie die Terrassenweite einer GaAs-Spaltprobe.

2 Theorie

2.1 Das Rasterkraftmikroskop

Eine atomar scharfe Spitze, die an einer dünnen Blattfeder, der *Cantilever* angebracht ist, wird in einem sehr geringen Abstand von der Probe rasterartig über deren Oberfläche geführt. Die sehr kleinen Bewegungen in xyz -Richtung werden mittels piezoelektrischer Keramiken gesteuert. Durch den geringen Abstand zur Probe, befindet sich die Messspitze in dem repulsiven oder attraktiven Potential der Probenoberfläche (siehe unten), so dass aufgrund der sehr kleinen Federkonstante D des Cantilevers ($D = 0,1 - 1,0 \text{ Nm}^{-2}$) eine Auslenkung stattfindet. Diese Auslenkung wird über eine Laserreflektion an der Spitze gemessen und an eine Regeleinheit weitergegeben. Ziel ist es, die Spitze auf einer Raumfläche konstanter Kraft zu halten. Dies bedeutet, dass die mit der Regeleinheit verbundenen Piezoelemente den Abstand Oberfläche–Spitze so verändern müssen, dass wieder die konstante Kraft wirkt. Diese durch elektrische Spannungen ausgeführten Höhenkorrekturen werden von einer Auswerteelektronik registriert. Spezielle Software erlaubt später eine Karte mit einer konstanten Kraftfläche anzugeben.

Ein großer Nachteil von Rastertunnelmikroskopen ist wie in der Einleitung schon angesprochen, dass nur leitende Proben untersucht werden können. Nichtleiter müssen hier mit einer leitenden Substanz beschichtet werden.

Das Rasterkraftmikroskop, kurz **AFM** vom englischen *atomic force micros-*

cope, umgeht dieses Problem, indem als Messgröße nicht ein Tunnelstrom, sondern eine Kraft zwischen Abtastspitze und Probe ausgenutzt wird. In Abbildung 1 ist die Funktionsweise eines AFM dargestellt.

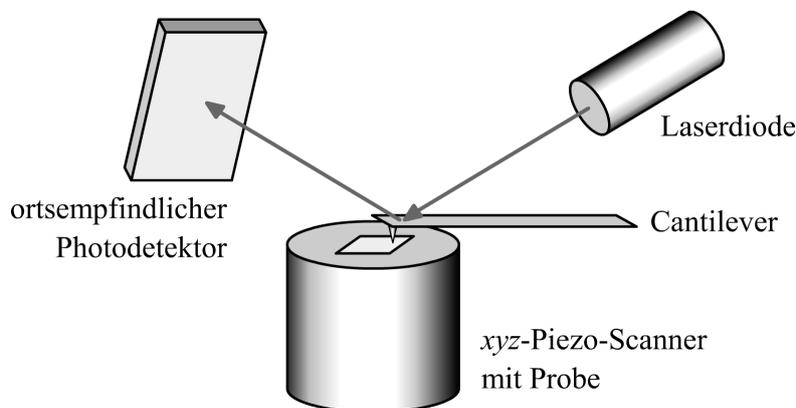


Abbildung 1: Schematischer Aufbau eines Rasterkraftmikroskops.

Eine sehr feine atomare Spitze, die an einer dünnen Blattfeder, der **Cantilever** angebracht ist, wird in einem sehr geringen Abstand von der Probe rasterartig in xy -Richtung über deren Oberfläche geführt. Damit befindet sich die Spitze im attraktiven oder repulsiven Wechselwirkungsbereich der obersten Atomsschichten der Probe, siehe hierzu Abschnitt 2.2. Durch Kraftereinwirkung wird die Spitze ausgelenkt und schwingt mit der Frequenz

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{D}{m}}, \quad (1)$$

dabei ist m die Masse der schwingenden Spitze und D die Federkonstante des Cantilevers. Die Frequenz f_0 sollte dabei möglichst groß sein, damit Amplitudenverstärkung aus Schwingungen aus der Umgebung vermieden werden. Dies wird nach Gleichung (1) durch eine sehr kleine Federkonstante D erreicht. Die Größenordnung dieser Konstanten ist ungefähr $D = 0,1 - 1,0 \text{ Nm}^{-2}$, womit die Spitze auch empfindlich auf Kraftänderungen reagieren kann. Die Auslenkung des Cantilevers wird durch einen Laserstrahl kontrolliert, der auf einen lichtempfindlichen Detektor gemessen wird und diese Größe an einen Regelkreis weitergibt, siehe hierzu Abschnitt 2.4. Der Regelkreis steuert den Abstand zwischen Probe und Spitze, so dass ein Höhenprofil konstanter Elektronendichte abgefahren wird, indem der Piezo-Scanner den Abstand reguliert.

Für die Abtastung stehen am Gerät drei Möglichkeiten Einstellungen zur Verfügung:

- (1) **Contact Mode.** Die Spitze wird auf die Oberfläche aufgesetzt, so dass sich die Cantilever verbiegt. Es wird in die Regelelektronik ein bestimmter Sollwert dieser Verbiegung eingegeben. andert sich nun die

Kraft auf die Feder während der Messung, so ändert sich die Verbiegung der Feder, was registriert wird und dann über die Regelelektronik durch Absenken oder Hochfahren der Spitze ausgeglichen wird, so dass sich wieder der vorher eingestellte Sollwert der Verbiegung ergibt.

Das Problem bei diesem Messverfahren besteht darin, dass es besonders unter Atmosphärenbedingung zu Abbildungsfehlern durch Verunreinigungen kommen kann. Außerdem besteht die Gefahr durch den ständigen Kontakt, dass es bei nicht leitenden Proben zu elektrostatischen Aufladungen kommt, die wiederum eine Kraft ausüben und damit die Messungen verfälschen könnten.

- (2) ***Non-Contact Mode.*** Die Cantilever wird durch einen kleinen Piezokristall zu Schwingungen angeregt. Ohne die Oberfläche zu berühren wird die Spitze über die Oberfläche geführt. Verändert sich währenddessen die Wechselwirkung zwischen Probe und Spitze, so wirkt sich dies auf die Schwingungen der Spitze aus. Es kommt zu einer Frequenzänderung. Diese Änderung kann gut registriert und später zu Auswertungszwecken herangezogen werden.

Der Vorteil dieses Verfahrens besteht darin, dass die Schwingung einerseits und das Berühren der Oberfläche andererseits, die die Messungen empfindlich stören würden, durchdringen können, um so die Oberfläche abzuklopfen.

- (3) ***Tapping Mode.*** Die Cantilever wird auch in diesem Modus über einen Piezokristall zu Resonanzschwingungen angeregt. Die Spitze wird so weit an die Probenoberfläche herangefahren, dass die Spitze kurz vor dem Umkehrpunkt der Schwingung auf die Oberfläche schlägt, was natürlich zu Veränderungen, verglichen mit der Resonanzfrequenz, in der Schwingungsamplitude und -frequenz führt. Über einen dieser beiden Parameter kann nun ein konstanter Abstand zwischen Spitze und Oberfläche eingestellt werden.

In unserem Versuch werden wir stets den Tapping Mode verwenden.

2.2 Potentialfeld zwischen Spitze und Probe

Für das Potentialfeld an der Oberfläche der Probe nehmen wir das ***Lennard-Jones-Potential***

$$\Phi(r) = \frac{a}{r^{12}} - \frac{b}{r^6} \quad (2)$$

an, dabei sind a und b zwei Konstanten. Damit kann der Arbeitsbereich von Tapping und Non-Contact Mode beschrieben werden, siehe Abbildung 2. Der Tapping Mode arbeitet im stark repulsiven Bereich des Potentials, also in dem Bereich, in dem das abstoßende Hard-Core-Potential der Kerne stark

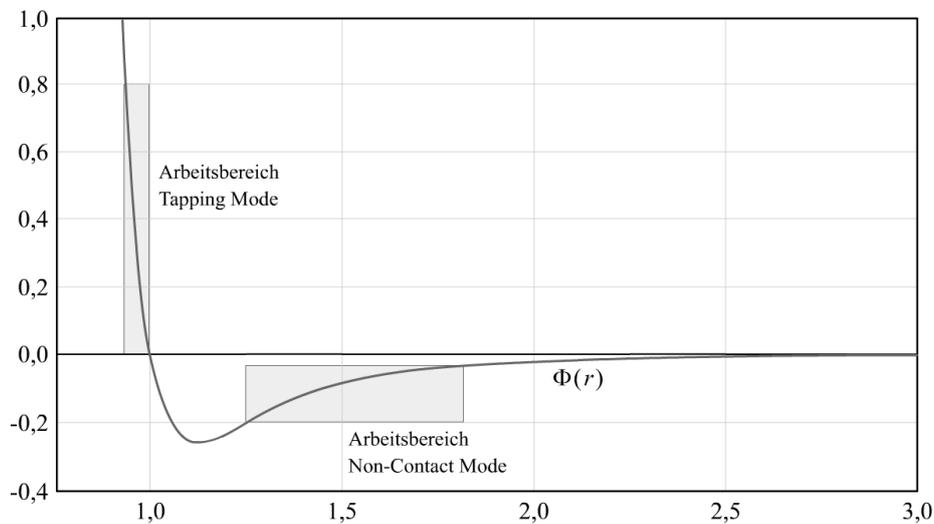


Abbildung 2: Das Lennard-Jones-Potential für $a = b = 1$.

zu spüren ist. Der Non-Contact Mode arbeitet im attraktiven Bereich, welcher von den Van-der-Waals-Wechselwirkungen sowie den elektrostatischen und magnetischen Wechselwirkungen dominiert wird. Damit ist die Änderung der Messgröße beim Tapping Mode größer und es kann eine bessere Auflösung erzielt werden.

2.3 Grenzen der Auflösung

Um die Daten einer AFM-Messung zu interpretieren, muss bedacht werden, dass die Regelelektronik die Abstandsänderungen aufgrund der sich ändernden Wechselwirkungskraft vornimmt. Diese Wechselwirkungen werden durch das Potentialfeld hervorgerufen und nicht durch die tatsächlichen Höhenänderungen der Probenoberfläche.

Durch Verwendung eines Eichgitters, dessen Gitterkonstante und dessen Tiefe der Gitterpunkte bekannt sind, lassen sich die Längen- und Höhenangaben des Gerätes eichen (siehe unten). Trotz des Eichens kann ein AFM nicht die genaue Topographie der Oberfläche wiedergeben. Der Hauptgrund hierfür liegt in der Tatsache, dass nicht eine unendlich dünne und punktförmige Spitze verwendet wird, sondern sie endliche Ausmaße hat, die zu Abbildungsfehlern führen. Alle Strukturen, die im Größenbereich des Spitzenradius liegen, werden verfälscht. Sie erscheinen breiter und runder als sie es in Realität sind.

Abbildungsfehler können also durch die folgenden Gründe entstehen:

- (1) Ist eine Vertiefung dünner als die Spitze, so wird sie kaum abgebildet.

- (2) Es werden schmale Erhöhungen, die dünner als die Breite der Spitze sind, verfälscht dargestellt. Sie erscheinen in der Aufnahme mindestens so breit wie die Breite der Spitze. Der Grund dafür liegt in der Tatsache, dass die Spitze die eine Seite der Kante mit der Vorderseite und die anderer Seite mit der Rückseite abtastet.
- (3) Sehr scharfe Strukturen werden maximal mit der Steigung der Spitzenwände abgebildet.

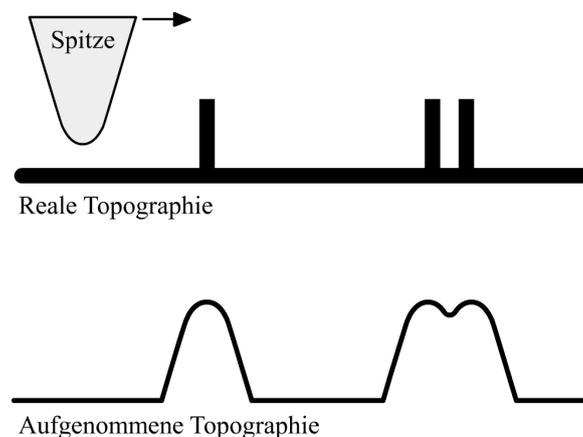


Abbildung 3: Zur Verdeutlichung der Abbildungsfehler.

2.4 Der Regelkreis

Damit das Mikroskop auch wirklich verlässlich ein Oberflächenprofil liefert, ist es notwendig, dass im Tapping Mode mit Hilfe einer Regelung der Abstand des Cantilevers und der Probe konstant gehalten wird. Hierzu verwendet man häufig einen kombinierten Regelmechanismus, den **Regelkreis**. Dieser besteht aus einem Proportionalregler, der den Abstand nachregelt, wenn der aktuelle Abstand vom Sollwert abweicht. Dieser reagiert schnell auf starke Schwankungen, liefert aber nur unbefriedigend auch den wirklichen Sollwert. Deshalb gibt es noch einen Integralteilregler. Dieser verändert die Höhe so, dass im Mittel der gesamten Messstrecke der Sollwert gehalten wird. Dieser reagiert natürlich nur sehr langsam auf schnelle Änderungen, weshalb eine Kombination notwendig ist. Neben diesem Regler an sich gehören zu einem schematischen Regelkreis noch die Störgröße, die immer wieder für ein Abweichen vom Sollwert sorgt, welches dann vom Regler ausgeglichen wird.

Ein derartiges Schema wurde in Abbildung 4 dargestellt.

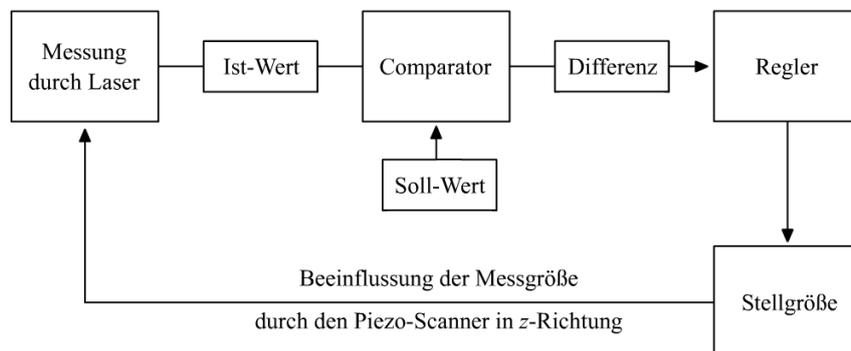


Abbildung 4: Schema eines Regelkreises.

2.5 Eichung durch Bestimmung einer bekannten Gitterkonstanten

Um das AFM zu eichen, benutzt man ein Eichgitter mit bekannter Gitterkonstante und Tiefe der Strukturen. Mit Hilfe der optischen Methode der Interferenz wird die Gitterkonstante bestimmt. Dieser Verfahren eignet sich sehr gut, da optische Beugungserscheinungen gut zur Bestimmung periodischer Parameter wie z.B. einer Gitterkonstanten sind (vergleiche dazu das Demonstrationspraktikum).

Bestimmung der Gitterkonstanten durch Interferenz

Ein Laserstrahl mit bekannter Wellenlänge λ wird an einem Gitter reflektiert und lässt auf einem Schirm im Abstand L zum Gitter ein Interferenzbild entstehen. Misst man auf dem Schirm die Maxima n -ter Ordnung aus, so ergibt sich für die Gitterkonstante

$$g = \frac{n\lambda}{\sin \alpha}. \quad (3)$$

Hierbei stellt α den Winkel zwischen dem auf das Gitter fallenden Laserstrahl und dem zu einem Maximum n -ter Ordnung reflektierten Strahl dar. Es kann bei diesem Versuch davon ausgegangen werden, dass der Laserstrahl senkrecht auf das Gitter fällt. Da der Winkel α nicht besonders gut gemessen werden kann, wollen wir α aus Abstandsmessungen bestimmen. Sei x der horizontale bzw. vertikale Abstand zwischen dem Maximum 0-ter und n -ter Ordnung auf dem Schirm. Dann folgt aus einfachen geometrischen Überlegungen

$$g = \frac{n\lambda}{\sin(\arctan(x/L))}. \quad (4)$$

2.6 Rauigkeit von Oberflächen

Um die Bilder der verschiedenen Oberflächen auch quantitativ vergleichen zu können, muss ein Maß definiert werden. Neben zum Beispiel den Fourier-

transformationen, die bei periodischen Mustern Aussagekraft haben, gibt es das Konzept der **Rauhigkeit**.

Hierzu gibt es zwei Definitionen:

(1) **RMS-Rauhigkeit**. Die RMS-Rauhigkeit ist

$$R_q = \sqrt{\sum_{i=1}^N \frac{(Z_i - \langle Z_i \rangle)^2}{N}}.$$

Dabei sind die Z_i die gemessenen Höhen und mit $\langle \cdot \rangle$ wurde der jeweilige Mittelwert bezeichnet.

(2) **Mittlere Rauhigkeit**. Die mittlere Rauhigkeit ist

$$L_a = \frac{1}{L_x L_y} \int_0^{L_x} \int_0^{L_y} |f(x, y) - \langle f \rangle| dy dx.$$

Hierbei sind $f(x, y)$ die Höhen zu den Orten (x, y) und L_x sowie L_y sind die Ausdehnungen der Probe.

Beide Größen sagen im Prinzip dasselbe aus: Je größer ihr Wert, desto größer die vertikale Rauhigkeit. Da die Reihenfolge der Summation und Integration verschieden ist, lässt sich natürlich nicht RMS-Rauhigkeit mit mittlerer Rauhigkeit vergleichen. Die Rauhigkeiten sind statistische Werte, ihr Wert kann auf ein- und derselben Probe schwanken, je nachdem, welchen Bereich der Probe man untersucht.

Da mit die Charakterisierung eines Bildes durch nur diese zwei Zahlen ein sehr starker Informationsverlust verbunden ist, hat die Rauhigkeit allein jedoch keine große Aussagekraft. Auch augenscheinlich völlig verschiedene Bilder können die gleichen Werte besitzen. Um ein Bild besser zu charakterisieren, muss man deshalb entweder weitere Kennzahlen hinzuziehen oder das Bild mit Worten beschreiben.

Wir werden im Versuch die Rauhigkeit von Goldfilmen untersuchen.

2.7 Wachstum dünner Metallschichten

Im Versuch werden Goldfilme untersucht, die durch thermisches Verdampfen des Materials aus einem Tiegel und anschließender Kondensation aus der Gasphase auf einem Substrat (Glas oder Glimmer) hergestellt wurden. Das Aufdampfen findet unter Hochvakuum-Bedingungen mit einem Gasdruck im Bereich von 10^{-8} bar statt.

Man unterscheidet beim Wachstum von Goldschichten mit Dicken im Bereich von 25 bis 100 nm vier Phasen des Wachstums:

- (1) Adsorption und Nukleation, also *Keimbildung*.
- (2) Wachstum und Zusammenwachsen von Keimen.
- (3) Ausbildung von Kanälen zwischen zusammenwachsenden Keimen bzw. Inseln.
- (4) Ausbildung eines geschlossenen Films.

Abhängig von äußeren Parametern wie Substrat und Substrattemperatur, Quelltemperatur oder angelegter elektrischer Feldstärke werden diese Phasen jeweils bei unterschiedlichen Schichtdicken durchlaufen. Man unterscheidet zwischen drei Wachstumsmodi:

Wachstumsmodi der Heteroepitaxie

Die *Heteroepitaxie* beschreibt das Wachstum dünner Materialien auf einem Substrat aus einem anderen Material. Abhängig von der Stärke der Wechselwirkungen zwischen Substrat und aufgedampften Materialatomen gibt es die folgenden Wachstumsarten:

- (1) *Lagenwachstum* (Frank-van der Merve-Wachstum): Die Wechselwirkungen zwischen kondensiertem Material und Substrat sind größer als die zwischen benachbarten Schichten von deponiertem Material. Dadurch entstehen Monoschichten, es handelt sich um ein Lagenwachstum.
- (2) *Inselwachstum* (Vollmer-Weber-Wachstum): Die Wechselwirkungen zwischen kondensiertem Material und Substrat sind kleiner als die zwischen benachbarten Schichten von deponiertem Material. Dadurch lagern sich Gasatome bevorzugt an bereits aufkondensierten Schichten des deponierten Materials an, so dass *Insel* oder *Körner* entstehen. Verschiedene Inseln müssen dabei nicht unbedingt die gleiche kristallographische Orientierung haben, so dass beim Zusammenwachsen von Inseln verschiedener kristallographischer Orientierung *Korngrenzen* entstehen.
- (3) *Mischwachstum* (Stranski-Krastanov-Wachstum): Hierbei handelt es sich um Lagen- und Inselwachstum. Zunächst wächst eine oder mehrere Schichten im Lagenwachstum auf, bis dann ab einer kritischen Schichtdicke Inseln gebildet werden und schließlich Inselwachstum dominiert.

Bei Gold findet stets ein Inselwachstum statt, allerdings können hier verschiedene Inseltypen entstehen. Je nach Substrattemperatur wachsen entweder säulenartige Inseln oder es kommt zu Inseln, die auch übereinander wachsen. Erst bei sehr hohen Temperaturen haben alle Inseln dieselbe kristallographische Orientierung.

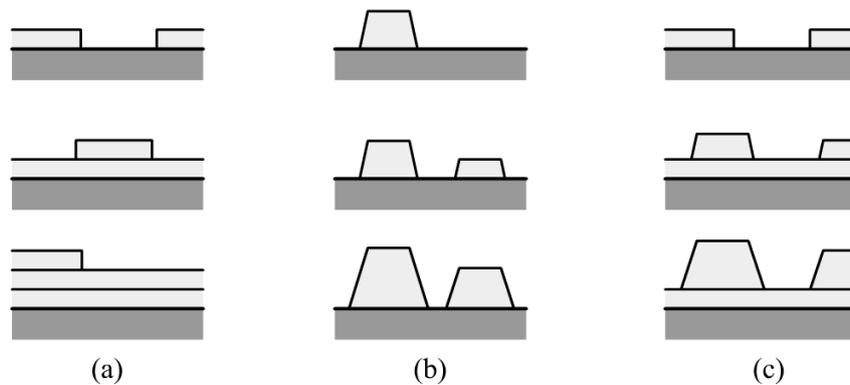


Abbildung 5: Veranschaulichung der Wachstumsmodi: (a) Lagenwachstum, (b) Inselwachstum und (c) Mischwachstum.

Kapillaritätsmodell

Um die Entstehung von Inseln bzw. Körnern besser verstehen zu können, soll an dieser Stelle kurz auf das Kapillaritätsmodell eingegangen werden.

Das Kapillaritätsmodell beschreibt ursprünglich das Verhalten von Flüssigkeitstropfen an Grenzflächen, kann aber auch zur Erklärung des Auftretens der verschiedenen Wachstumsarten von deponiertem Material verwendet werden, wenn dieses sich auf dem Substrat ähnlich wie Flüssigkeiten an Grenzflächen verhält. Dies ist (je nach Temperatur) auch bei unseren Goldfilmen der Fall.

Man nimmt an, dass die Atome sich in Form von Tropfen am Substrat anlagern, dabei hat ein Tropfen den idealisierten Radius r und den Winkel ϕ zwischen Kugel- und Substratoberfläche. Ist die Oberflächenenergie des deponierten Materials größer als die des Substrats, so werden Inseln entstehen. Andernfalls werden Lagen gebildet.

3 Versuchsdurchführung

Eichung

Nach einer Einführung in die Benutzung des AFM durch den zugehörigen Assistenten wird das Eichgitter in das AFM gelegt. Der horizontale Abstand zwischen den Spitzen des Gitters wird mittels einer Software bestimmt. Mit Hilfe eines Beugungsexperimentes wird die Gitterkonstante zum Vergleich bestimmt. Mit diesen Werten wird die aktuelle Empfindlichkeit des Piezoscanners bestimmt, und das AFM somit geeicht.

Messungen

In der Versuchsbeschreibung wurde die Untersuchung von Goldschichten vorgeschlagen. Wir haben jedoch einen Chromfilm untersucht.

Eine auf ein gläsernes Abdeckglas gedampfte Chromschicht wird mit einer Pinzette eingeritzt und auf einem Probenhalter befestigt. Mit dem AFM wird ein Kratzer auf der Oberfläche aufgenommen, so dass die Schichtdicke des Chromfilmes bestimmt werden kann. Dann wird noch die Oberfläche des Chromfilmes abgebildet, um das Wachstum dieser Schicht zu untersuchen.

4 Auswertung

4.1 Eichung

Bestimmung der Gitterkonstante mittels Beugung

Mit Hilfe eines Beugungsexperimentes wird die Gitterkonstante des Eichgitters untersucht. Hierzu wird das Gitter in den Strahlengang eines Lasers mit der Wellenlänge λ gebracht. Im Abstand l zu dem Gitter steht ein Schirm, auf dem das Beugungsmuster n -ter Ordnung im Abstand d zur optischen Achse gemessen wird.

Die Gitterkonstante a berechnet sich durch die aus der Optik bekannte Formel¹

$$a = \frac{n \lambda}{\sin \alpha}.$$

Wir haben den Beugungswinkel α nicht direkt gemessen. Dieser ergibt sich jedoch aus der Geometrie der Versuchsanordnung zu $\alpha = \arctan(d/l)$. Somit

¹ siehe Anfängerpraktikum Versuch 23: Das Prismen- und Gitterspektrometer, Seite 8. <http://www.mehr-davon.de/content/protokolle>.

ergibt sich für die Gitterkonstante des Eichgitters

$$a = \frac{n \lambda}{\sin(\arctan(\frac{d}{l}))}. \quad (5)$$

Der Fehler berechnet sich mittels des Gesetzes der Fehlerfortpflanzung zu

$$\sigma_a = \sqrt{\sigma_l^2 \left(\frac{\partial a}{\partial l}\right)^2 + \sigma_d^2 \left(\frac{\partial a}{\partial d}\right)^2}.$$

Mit $n = 1$, $\lambda = 632 \text{ nm}$, $l = 246 \pm 5 \text{ mm}$ und $d = 76 \pm 1 \text{ mm}$ ergibt sich

$$a_{\text{opt.}} = 2,1 \pm 0,4 \mu\text{m}.$$

Bestimmung der Gitterkonstante mit dem AFM

Mit dem Programm „WSxM“² wurden die aufgenommenen Daten ausgewertet. Das Abbild des Gitters wurde zunächst über die Funktion „Global Plane“ aufbereitet, um dann über die Funktionen „Profile“ und „Measure Distance“ die Gitterkonstante berechnen zu können. Abbildungen 6 und 7 zeigen die benutzten Datensätze. Wie zu erkennen ist, haben wir noch den diagonalen Abstand der Spitzen gemessen, um diesen mit den Literaturwerten³ zu vergleichen. Bei einer Nahaufnahme (Abbildung 8) einer einzelnen Spitze haben wir deren Höhe bestimmt. Unsere Ergebnisse sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

² Version 2.2, bezogen am 25.10.2006 von <http://www.nanotec.es/download.htm>.

³ Siehe Datenblatt zu den Messspitzen im Anhang.

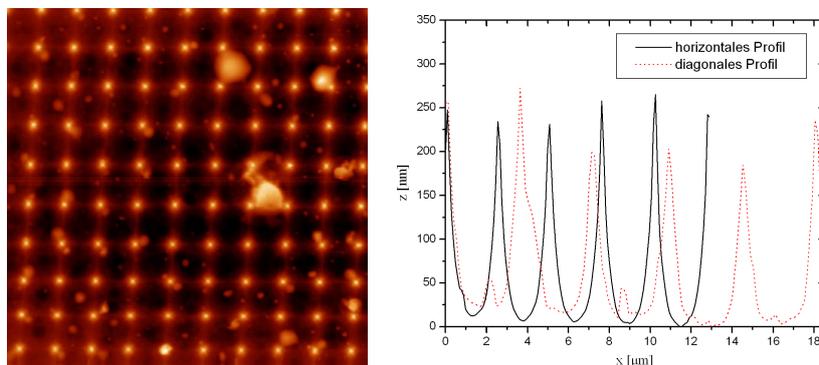


Abbildung 6: Links: Aufnahme des Gitters in einem $25 \times 25 \mu\text{m}^2$ großen Gebiet. Rechts: Höhenprofil der linken Abbildung.

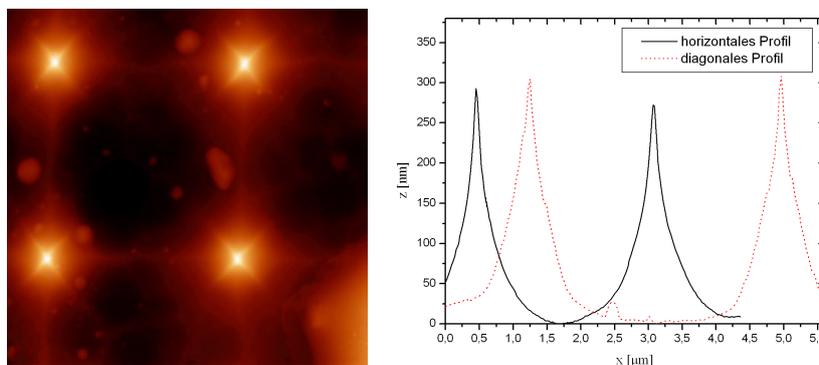


Abbildung 7: Links: Aufnahme des Gitters in einem $5 \times 5 \mu\text{m}^2$ großen Gebiet. Rechts: Höhenprofil der linken Abbildung.

Die optische Messung liegt mit $2,1 \mu\text{m}$ sehr nahe am Literaturwert von $2,12 \mu\text{m}$, welchen wir somit verifiziert haben. Wir nehmen an, dass die Gitterkonstante in der zweiten Messung im $5 \times 5 \mu\text{m}^2$ großen Gebiet am genauesten gemessen wurde, da wir hier die beste Auflösung erzielt haben. Wir müssen also alle folgenden Messdaten mit dem Faktor

$$\beta := \frac{2,12}{2,6} \approx 0,815$$

multiplizieren, um die exakten lateralen Abmessungen zu erhalten. Wir wissen nicht, ob wir die mit einem Radius von weniger als 10 nm dicken Spitzen in unserer Messung genau abgerastert haben. Wir nehmen dieses jedoch an, und erhalten somit einen Faktor

$$\gamma := \frac{0,3}{0,7} \approx 0,428$$

für die Korrektur der Messdaten in z -Richtung.

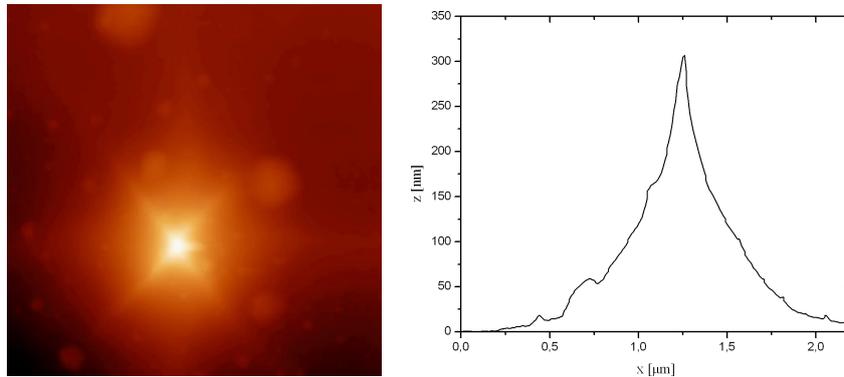


Abbildung 8: Links: Aufnahme des Gitters in einem $2 \times 2 \mu\text{m}^2$ großen Gebiet. Rechts: Höhenprofil der linken Abbildung.

	Gitterkonstante	Diagonaler Abstand	Höhe der Spitze
$25 \times 25 \mu\text{m}^2$	$2,5 \mu\text{m}$	$3,6 \mu\text{m}$	-
$5 \times 5 \mu\text{m}^2$	$2,6 \mu\text{m}$	$3,7 \mu\text{m}$	-
optische Messung	$2,1 \mu\text{m}$	-	-
Literaturwert	$2,12 \mu\text{m}$	$3,0 \mu\text{m}$	$0,7 \mu\text{m}$
$2 \times 2 \mu\text{m}^2$	-	-	$0,3 \mu\text{m}$

Tabelle 1: Ergebnisse der Eichmessung.

Weiterhin haben wir noch den Öffnungswinkel der Spitzen untersucht. Dazu wurde ein Höhenprofil einer einzelnen Spitze in einem Graphen mit gleicher Achsenskalierung aufgetragen. Der Öffnungswinkel wurde dann zeichnerisch in Abbildung 9 bestimmt. Es ergab sich ein Öffnungswinkel von ca. 50° . Der Literaturwert liegt mit 20° deutlich unter unserem Wert. Dieses Ergebnis deutet darauf hin, dass die Spitze der Cantilever nicht das Eichgitter, sondern sich selber abbildet⁴. Diese Vermutung wird dadurch unterstützt, dass in den Abbildungen 6, 7 und 8 die Spitzen alle sehr ähnlich aussehen, was in Wirklichkeit sicher nicht so ist. Tatsächlich ist das Eichgitter dazu da, die geometrischen Eigenschaften der Spitze zu bestimmen.

4.2 Messung

Schichtdicke

Ein Höhenprofil der aufgedampften Chromschicht mit Kratzer wurde in Abbildung 10 dargestellt. Zur Aufbereitung der Daten wurde die Funktion „local Plane“ benutzt. Es ergibt sich eine Schichtdicke von $13 \text{ nm} \cdot \gamma = 5,6 \text{ nm}$.

⁴ Siehe hierzu Kapitel 2.3.

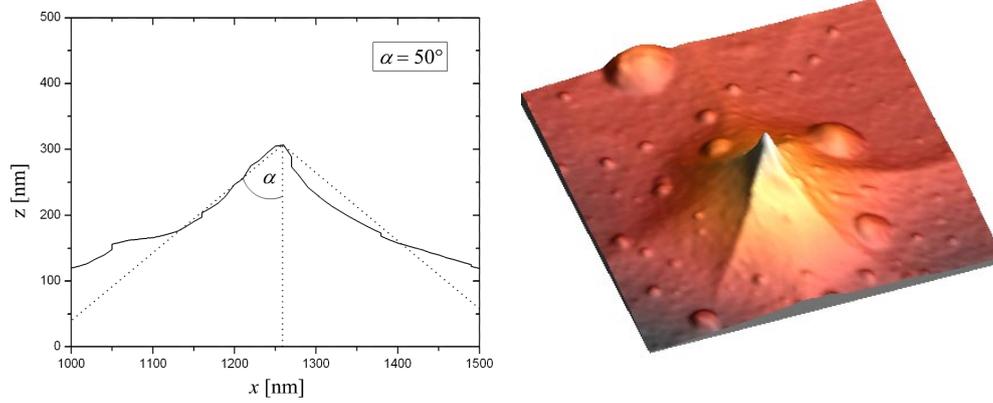


Abbildung 9: Links: Zeichnerische Bestimmung des Öffnungswinkels einer Spitze. Rechts: Dreidimensionale Darstellung einer Spitze.

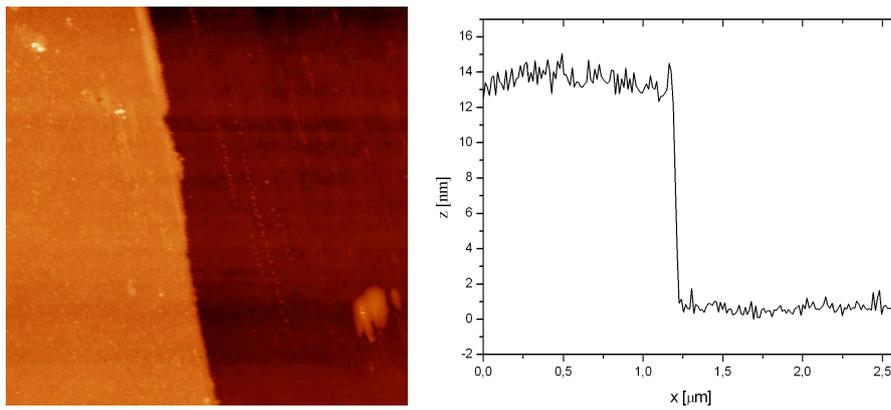


Abbildung 10: Links: Kratzer auf der Chromschicht. Rechts: Höhenprofil der linken Abbildung.

Korngröße

Um die Korngröße zu bestimmen, wurde eine Nahaufnahme des Chromfilms aufgenommen. Mit der Funktion „Measure“ wurden die Halbachsen mehrerer Körner ausgemessen. Die Korngröße ergibt sich durch $a \cdot b \cdot \pi \cdot \beta^2$, wobei

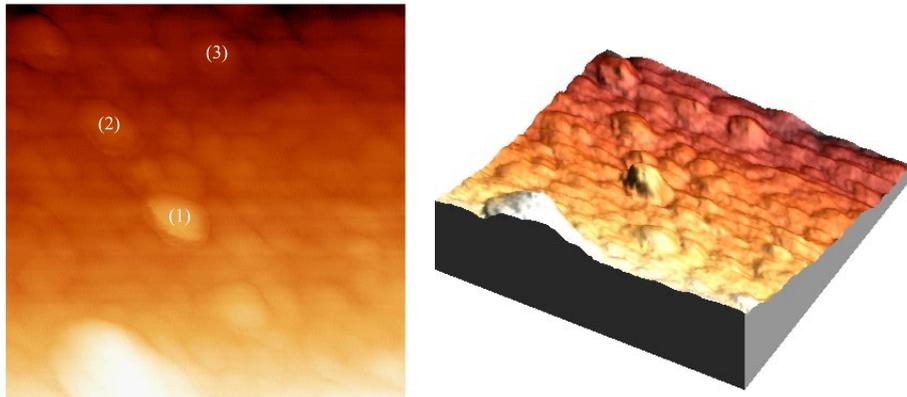


Abbildung 11: Links: Aufnahme von Körnern auf der Chromschicht mit hinzugefügter Nummerierung. Rechts: Dreidimensionale Darstellung der linken Abbildung.

a und b die Halbachsen eines Kornes sind. Unsere Ergebnisse sind in Tabelle 2 dargestellt. Es ergibt sich eine durchschnittliche Korngröße von 392 nm^2 .

Korn	a	b	Korngröße
(1)	20 nm	13 nm	543 nm^2
(2)	17 nm	11 nm	390 nm^2
(3)	13 nm	9 nm	244 nm^2

Tabelle 2: Ergebnisse der Eichmessung.

Die Körner sind durchschnittlich $3 \text{ nm} \cdot \gamma = 1,3 \text{ nm}$ hoch.

Wie in Abbildung 11 (rechts) gut zu erkennen ist, ziehen sich Streifen über die Chromschicht. Dies kann ein Abbildungsfehler sein, da unsere Spitze schon sehr abgenutzt war. Es ist aber auch möglich, dass das bedampfte Abdeckglas zuvor in dieser Richtung abgewischt wurde, so dass sich die Chromkeime bezüglich dieser Richtung ausgerichtet haben.

Bei der Messung hatten wir Schwierigkeiten überhaupt Körner auf der Oberfläche ausfindig zu machen, was ebenfalls daran liegen mag, dass unsere Messspitze schon sehr abgenutzt war. Somit können wir das erwartete Inselwachstum vom Chrom nur bedingt nachweisen.

5 Diskussion

Es ist fraglich, ob unsere Messwerte bezüglich der Dicke der Chromschicht aussagekräftig sind, da keine richtige Eichmessung für die z -Richtung durchgeführt wurde und wir auf die Herstellerangaben zurückgreifen mussten.

Auch das Inselwachstum von Chrom konnten wir nicht wirklich verifizieren, da unsere Aufnahmen der Chromschicht alle sehr unscharf waren und wir nur wenige Körner erkennen konnten. Die gesamte Oberfläche sah sehr rauh aus, hohe Inseln waren kaum auszumachen.

Immerhin haben wir uns mit der Funktionsweise des AFM bekannt gemacht, die Untersuchung des Chromfilmes hätte noch mehr Zeit in Anspruch genommen und mit großer Wahrscheinlichkeit das Einsetzen einer neuen Cantilever vorausgesetzt. Wir hatten beim Einbau der Chromprobe in das AFM dessen Kopf zu schräg aufgesetzt, so dass die Spitze beim Abrastern in die Probe gerammt wurde. Eine weitere Aufnahme des Eichgitters wäre im Nachhinein aufschlussreicher gewesen, als den Chromfilm noch weiter zu untersuchen. Dann hätten wir die Geometrie unserer Spitze nach dem Eindringen in die Probe untersuchen können.

Eigene Kommentare

[Na für den ersten F-Praktikumsversuch ging das ja schon mal. Nicht zu viel Vorbereitung dank guter Literaturmappe, kein zu schwieriges Protokoll und ein zumindest teilweise interessanter Versuch.]_{Daniel}

[Eigentlich ein sehr schöner Versuch. Die Literaturmappe ist wirklich sehr gelungen.]_{Hauke}

6 Anhang

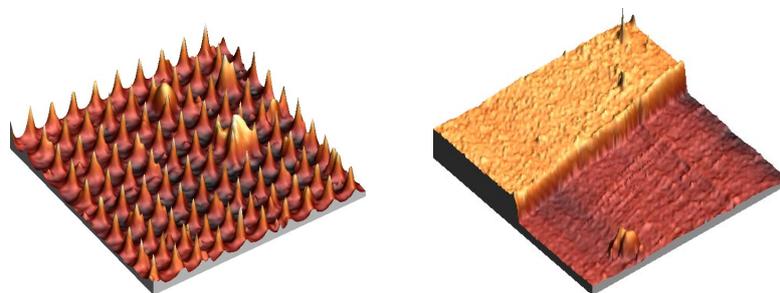


Abbildung 12: Links: Dreidimensionale Darstellung von Abbildung 6 (links). Rechts: Dreidimensionale Darstellung von Abbildung 10 (links).