

Physikalisches Praktikum für Fortgeschrittene

Universität Kassel

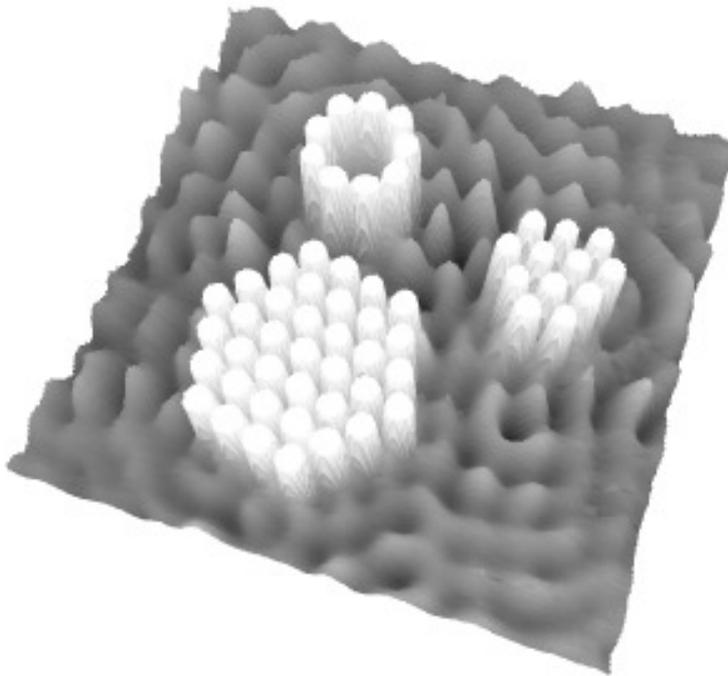
Fachbereich 18 - Naturwissenschaften

Institut für Physik

Sommersemester 2007

Versuch A06

Rastertunnelmikroskopie



Christian Gerbig Philipp Reiß

Durchgeführt vom 09.07. bis 12.07.2007

Protokollabgabe: _____

(Datum und Unterschrift des Betreuers)

Testat: _____

(Datum und Unterschrift des Betreuers)

Inhaltsverzeichnis

1 Grundlagen	3
1.1 Tunneleffekt	3
1.2 Rastertunnelmikroskopie (STM)	4
1.2.1 Funktionsweise eines STM	4
1.2.2 Betriebsmodi eines STM	4
1.3 Eigenschaften von Schall	5
1.3.1 Schallgeschwindigkeit	6
1.3.2 Schalldruck	6
1.4 Vergleich zwischen STM und dem Versuchsaufbau	7
2 Durchführung	8
2.1 Aufbau	8
2.2 Durchführung	8
2.3 Messprotokoll	9
3 Auswertung	10
3.1 Festkörperoberfläche mit hexagonal dichtester Kugelpackung	10
3.2 Graphen - einzelne Graphitschicht	10
3.3 Obeflächendefekt durch Kathodenzerstäubung	11
3.4 Ellipsenstruktur auf Festkörperoberfläche	12
3.5 Ionengitter	12
3.5.1 Salz ohne Gitterdefekte	12
3.5.2 Salz mit Fremdatom dotiert	13
3.6 Quantenpunkt	14
3.6.1 Theoretische Berechnung stehender Wellen	14
3.7 Adsorbiertes Benzen auf Festkörperoberfläche	16
4 Fehlerdiskussion	16
5 Zusammenfassung	17
6 Anhang	17

1 Grundlagen

1.1 Tunneleffekt

Der Tunneleffekt ist ein quantenmechanischer Effekt, der aus der Wellennatur von Teilchen resultiert. Er ermöglicht es Teilchen, eine Potentialbarriere zu passieren, die höher ist als die Teilchenenergie. Dieses Verhalten ist in der klassischen Physik nicht möglich.

Der Tunneleffekt in einer Potentialbarriere wie in Abb. 1.1 lässt sich aus der stationären, eindimensionalen Schrödingergleichung (1.1)

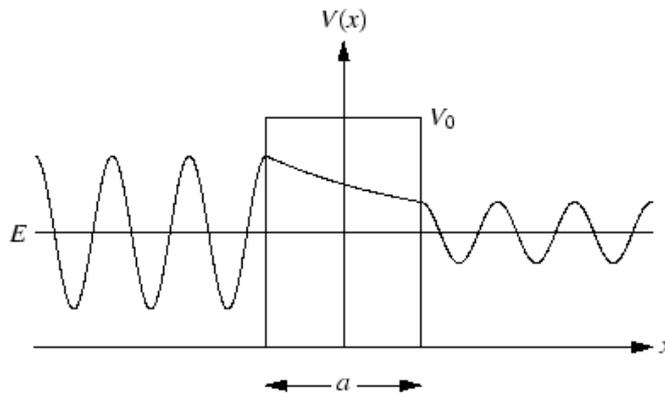


Abbildung 1.1: Darstellung eines Teilchens mit der Energie E , dessen Wellenfunktion $\Psi(x)$ durch eine Potentialbarriere der Höhe V_0 und der Breite a tunnelt. (Quelle: <http://www.e18.physik.tu-muenchen.de>)

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{d^2}{dx^2} \Psi(x) = (V_0 - E) \Psi(x) \quad (1.1)$$

herleiten. Dies geschieht hier nur schematisch, da die genaue Rechnung in der Regel in Lehrbüchern zur Quantenmechanik aufgeführt ist [1]. Der betrachtete Bereich wird in drei Teile aufgeteilt:

$$\begin{aligned} V(x) &= 0 \text{ für Bereich 1 mit } x \leq -a/2 \\ V(x) &= V_0 \text{ für Bereich 2 mit } -a/2 \leq x \leq a/2 \\ V(x) &= 0 \text{ für Bereich 3 mit } x \geq a/2 \end{aligned} \quad (1.2)$$

Bei jedem Abschnitt wird für die Wellenfunktion der Ansatz (1.3) verwendet:

$$\begin{aligned} \Psi_1(x) &= A_1 \cdot e^{ik_1x} + B_1 \cdot e^{-ik_1x} \\ \Psi_2(x) &= A_2 \cdot e^{ik_2x} + B_1 \cdot e^{-ik_2x} \\ \Psi_3(x) &= A_3 \cdot e^{ik_3x} \end{aligned} \quad (1.3)$$

Mit Hilfe von Stetigkeitsbedingungen lässt sich dieses Gleichungssystem lösen. Über die Wahrscheinlichkeitsstromdichten

$$j_i = -\frac{i\hbar}{2m} \left[\Psi_i^* \frac{\partial \Psi_i}{\partial x} - \Psi_i \frac{\partial \Psi_i^*}{\partial x} \right] \quad (1.4)$$

lässt sich die Transmissionswahrscheinlichkeit T berechnen:

$$T = \frac{j_3}{j_1} = \frac{4E(V_0 - E)}{4E(V_0 - E) + V_0^2 \sinh^2(k_2 x)} \approx \frac{16E(V_0 - E)}{V_0^2} e^{-k_2 x} \quad (1.5)$$

Hierbei ist

$$k_2 = \sqrt{\frac{2m}{\hbar^2}(V_0 - E)}$$

Die Tunnelwahrscheinlichkeit ist also exponentiell abhängig von der Dicke der Potentialbarriere.

1.2 Rastertunnelmikroskopie (STM)

Rastertunnelmikroskopie, englisch *Scanning Tunneling Microscopy*, *STM* ist eine Methode zur Untersuchung von Oberflächen im Hinblick auf ihre elektronische Struktur. Dabei rastert eine scharfe Spitze die Oberfläche zeilenweise ab. Die Spitze besteht dabei idealerweise nur aus einem einzelnen Atom. Die Messgröße eines STM ist ein elektrischer Strom.

1.2.1 Funktionsweise eines STM

Das STM wie in Abb. 1.2 dargestellt nutzt den Tunneleffekt aus, der einen sehr kleinen Strom zwischen der Spitze und der untersuchten Oberfläche ermöglicht. Dafür wird eine Spannung zwischen Probe und Sonde angelegt. Diese muss so groß sein, dass ein messbarer Strom fließt, aber nicht so groß, dass sie einen elektrischen Durchschlag hervorruft. Der Strom besteht nun aus Elektronen, die durch die Potentialbarriere zwischen Oberfläche und Spitze tunneln. Die Stromstärke ändert sich dabei wie die Tunnelwahrscheinlichkeit in Abhängigkeit von der Entfernung x der Spitze zur Oberfläche:

$$I(x) \propto e^{-2\kappa x} \quad (1.6)$$

Hierbei ist κ eine Konstante, die vom verwendeten Material, der Spannung etc. abhängt - nicht nur von den Energiedifferenzen wie in der obigen theoretischen Herleitung. Wegen des exponentiellen Zusammenhangs zwischen Abstand und Messsignal erreicht ein Rastertunnelmikroskop eine sehr hohe vertikale Auflösung. Die Probe muss hierfür elektrisch leitend sein. Die Spitze besteht in der Regel aus einem Edelmetall oder auch Wolfram. Die Bewegung der Spitze in allen drei Raumdimensionen wird von piezoelektrischen Aktuatoren kontrolliert, die Entfernung zur Oberfläche beträgt üblicherweise etwa $0,5 \text{ nm}$ um das Tunneln zu ermöglichen. Mit einem STM lassen sich einzelne Atome auf einer Oberfläche abbilden, allerdings kann immer nur ein recht kleiner Ausschnitt der Oberfläche betrachtet werden.

1.2.2 Betriebsmodi eines STM

Ein Rastertunnelmikroskop kann Informationen über die Oberfläche auf verschiedene Arten aufnehmen. Dabei wird jedoch immer der Tunnelstrom gemessen.

Konstante Höhe: Die Spitze wird bei gleichbleibender Höhe über die Oberfläche gefahren, so dass sich der Abstand zwischen Oberfläche und Spitze ändert. Damit

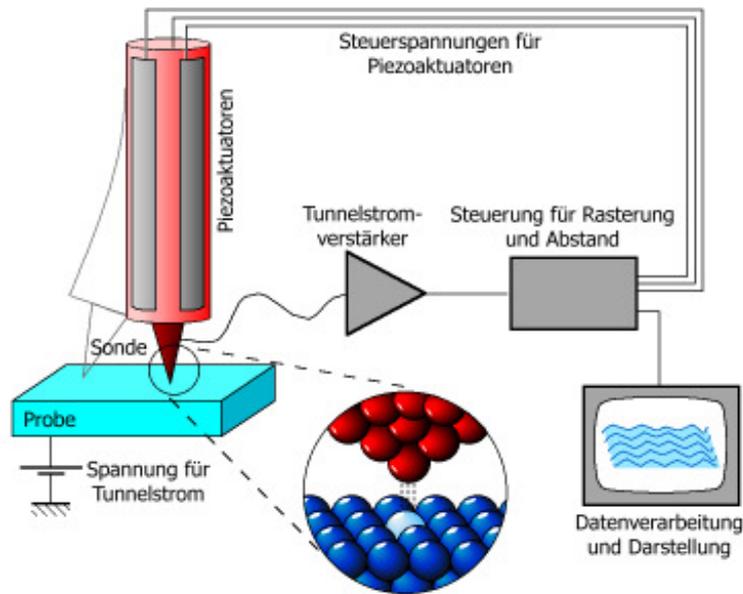


Abbildung 1.2: Schematische Darstellung eines Rastertunnelmikroskops. Der Tunnelstrom ist durch die gestrichelten Linien in der Vergrößerung angedeutet [2].

ändert sich der Tunnelstrom in Abhängigkeit von der Topographie und der lokalen Zustandsdichte auf der Probe. Die Daten des Tunnelstroms werden dann benutzt, um die erwünschten Eigenschaften der Oberfläche zu errechnen. Dieser Modus ist vergleichsweise schnell kann aber nur auf flachen Oberflächen verwendet werden, da sonst die Gefahr besteht, dass die Spitze eine Erhöhung seitlich trifft und abbricht, oder dass kein Strom mehr fließt wenn sich die Spitze über einer Vertiefung befindet.

Konstanter Strom: Eine Rückkopplungselektronik regelt die Höhe der Spitze ständig nach, so dass der Tunnelstrom konstant bleibt. Die Spitze folgt also der Topographie der Oberfläche.

Dieser Modus ist deutlich langsamer als bei der konstanten Höhe, allerdings können so auch Proben mit einer rauhen Oberfläche untersucht werden.

Modulierter Tunnelstrom: Bei den beiden o.g. Modi wurde die Spannung für den Tunnelstrom konstant gehalten. Hierbei wird jetzt noch zusätzlich ein oszillierende Spannung addiert, so dass der Tunnelstrom ebenfalls oszilliert. In diesem Modus kann die lokale Austrittsarbeit Φ aus dem Zusammenhang

$$\frac{d \ln(I)}{dx} \propto \sqrt{\Phi} \quad (1.7)$$

errechnet werden.

1.3 Eigenschaften von Schall

Schall ist eine longitudinale Welle, deren Amplitude sich in Druckschwankungen manifestiert. Es wird also ein Ausbreitungsmedium benötigt, welches fest, flüssig oder

gasförmig sein kann. In diesem Fall ist die Ausbreitung in Luft interessant, genauer: die Schallgeschwindigkeit und der Schalldruck.

1.3.1 Schallgeschwindigkeit

Die Druckschwankungen bei der Ausbreitung in Luft (oder in Gasen allgemein) sind so schnell, dass der Prozess als isentrop bezeichnet werden kann. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit c_{Gas} berechnet sich nach

$$c_{Gas} = \sqrt{\frac{C_p p}{C_v \rho}} = \sqrt{\frac{C_p}{C_v RT}} \quad (1.8)$$

Hierbei sind p der Gasdruck, ρ die Dichte des Gases und $C_{p,v}$ die Wärmekapazitäten bei konstantem Druck bzw. konstantem Volumen. Diese werden häufig zum Isentrophenexponent $\chi = C_p/C_v$ zusammengefasst.

Setzt man hier die Werte für Luft ein, so errechnet sich die Schallgeschwindigkeit in trockener Luft bei 273K zu $c_L = 331\text{m/s}$.

Geht man näherungsweise davon aus, dass sich die Schallgeschwindigkeit mit dem Wassergehalt in der Luft nicht ändert, lässt sich (1.8) auf alle Temperaturen erweitern:

$$c_L(T) = \frac{c_L}{c_{L,273K}} = \frac{c_L}{331\text{m/s}} = \frac{\sqrt{\chi RT}}{\sqrt{\chi R \cdot 273K}} \quad (1.9)$$

Umgeformt erhält man für die Schallgeschwindigkeit:

$$c_L(T) = 331 \frac{\text{m}}{\text{s}} \sqrt{\frac{T}{273K}} \quad (1.10)$$

1.3.2 Schalldruck

Die dynamischen Druckschwankungen eines Schallereignisses $p_s(\vec{r}, t)$ in einer Schallwelle werden einem Referenzschalldruck p_0 überlagert. Der Referenzschalldruck wurde Anfang des 20. Jahrhunderts als untere Schwelle der Hörbarkeit für das menschliche Gehör bei 1kHz festgelegt und entspricht etwa $p_0 = 2 \cdot 10^{-5}\text{Pa}$. Dieser Wert stellte sich zwar später als zu niedrig heraus, wurde aber beibehalten. Der Schalldruckpegel L_p ist nun das logarithmierte Verhältnis eines Schallereignisses zum Referenzschalldruck.

$$L_p = 10 \log_{10} \left(\frac{p_s^2}{p_0^2} \right) = 20 \log_{10} \left(\frac{p_s}{p_0} \right) \quad (1.11)$$

Es handelt sich um eine logarithmische Größe, da das menschliche Gehör ebenfalls logarithmisch auf Lautstärkeunterschiede reagiert. Der Schalldruck einer ebenen Schallwelle in Luft ist wie folgt von der Schallkennimpedanz $Z_0 = c \cdot \rho$, der Schallschnelle v und der Schallintensität I verknüpft:

$$p_s = \sqrt{I c_l \rho} = c_l \rho v = \frac{I}{v} \quad (1.12)$$

Die Schallenergiedichte E in Ws/m^3 berechnet sich nach:

$$E = \frac{p_s^2}{c_l^2 \rho} \quad (1.13)$$

1.4 Vergleich zwischen STM und dem Versuchsaufbau

In diesem Versuch sollen atomare Strukturen mit Hilfe von makroskopischen Objekten simuliert werden. Dabei wird beispielsweise das $1/r$ -Potential eines Atoms mit dem „Kastenpotential“ von Filmdosen simuliert. Analog dazu können auch Quantentröge o.Ä. simuliert werden.

Die Wellenfunktionen der Elektronen werden in diesem Versuch mit Schallwellen simuliert, die von einem Lautsprecher abgestrahlt und von einem Mikrofon aufgenommen werden. Dies könnte man mit den von der Spitze emittierten Elektronen beim STM vergleichen, die je nach geeigneter Phase von der Oberfläche absorbiert oder reflektiert werden.

Weiterhin passen die Wellenlängen der Schallwellen in etwa so zur Größe der Strukturen auf der Oberfläche wie die der Elektronenwellen zu den untersuchten Strukturen beim STM.

Es ist also davon auszugehen, dass die Untersuchung einer Probe mittels Rastertunnelmikroskopie recht gut mit einem makroskopischen Aufbau und der Verwendung von Schallwellen simuliert werden kann, ohne die Vergleiche hierbei allzu stark strapazieren zu müssen.

2 Durchführung

2.1 Aufbau

Der Versuchsaufbau besteht aus einer Sonde, die in einer Ebene automatisiert und in der Höhe manuell bewegt werden kann. (Abb. 2.1)

Die Sonde selbst besteht aus einem Lautsprecher und einem Mikrofon. Diese sind so angeordnet, dass sie den Schall möglichst radialsymmetrisch abstrahlen und auch gleichmäßig detektieren. Die Daten werden an einem PC aufgezeichnet und dort auch

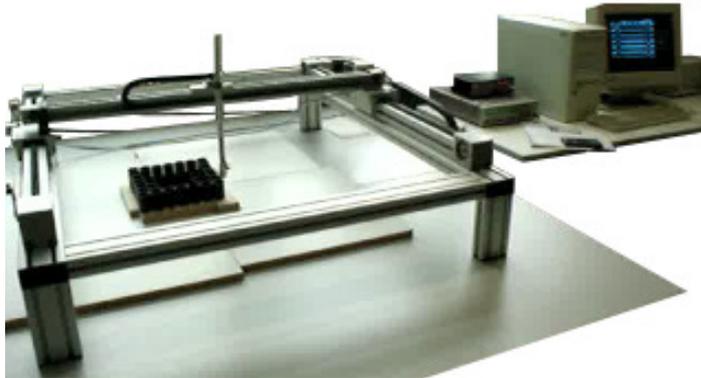


Abbildung 2.1: Darstellung des Versuchsaufbaus, insbesondere des x - y -Verschiebetisches. Die Sonde mit Lautsprecher und Mikrofon ist im Bild neben der Anordnung von Filmdosen zu erkennen.

gleich in einem Fehlfarbenbild dargestellt, hierbei wird die Schallintensität gemessen und in Helligkeitswerten ausgegeben. Die Position in x - und y -Richtung kann mit den Cursorstasten am PC voreingestellt und dann in einer angegebenen Fläche automatisch geändert werden, hierbei wird auch die Schrittweite der Messpunkte eingestellt. Die aufgenommenen Daten werden am PC abgespeichert: *.d sind die Bilddaten, *.p die jeweiligen Parameter und *.s die Spektren.

Unter der Sonde können Objekte positioniert werden, die dann bei bestimmten Frequenzen abgerastert werden. Alternativ kann an einem Punkt ein Spektrum aufgezeichnet werden. Als Objekte werden Filmdosen verwendet, die Atome simulieren sollen. Diese können auch in regelmäßigen Formen angeordnet eine Festkörperoberfläche darstellen.

2.2 Durchführung

Bei der Durchführung hat es sich als zweckmäßig herausgestellt, die aufgebaute Struktur zunächst bei einer geschätzten Eigenfrequenz der Filmdosen abzurastern, um eine Übersicht zu erhalten. Dann werden exemplarisch Spektren aufgenommen und verglichen (Beispielsweise ein Spektrum für eine leere Dose und eines für eine mit Wasser gefüllte Dose).

Beim Vergleich der Spektren ergeben sich in der Regel Frequenzen mit mehr oder weniger großen Intensitätsunterschieden, an denen sich die Filmdosen unterscheiden lassen. Bei diesen Frequenzen wird die Messung für die gesamte Struktur wiederholt um einen möglichst guten Kontrast zu erhalten.

2.3 Messprotokoll

Die aufgenommenen Daten befinden sich auf dem Messrechner im Ordner D:\Reiss und die Aufzeichnungen während der Messungen sind dem Protokoll angehängt (siehe 6. Anhang).

3 Auswertung

In der nachfolgenden Auswertung werden die aufgenommenen Strukturen einzelnen analysiert.

Die aus der Durchführung erhaltenen Bilder werden mit den zusammengestellten Anordnungen verglichen, Gemeinsamkeiten, Unterschiede und auftretende Effekte diskutiert, sowie möglichenfalls Analogien zu realen Rastertunneluntersuchungen gezogen.

3.1 Festkörperoberfläche mit hexagonal dichtester Kugelpackung

Zur Darstellung einer Festkörperoberfläche mit hexagonal dichtester Kugelpackung wurden die verwendeten Film Dosen geschlossen in hexagonaler Weise zusammengestellt (siehe Abbildung 3.1 (a)). Aus der dreidimensionalen Darstellung der Bilddaten lässt sich bei zwei verschiedenen Frequenzen deutlich die Hexagonale Struktur erkennen. Bei einer Rasterfrequenz von 9,84 kHz (siehe Abbildung 3.1 (b)) können den Film Dosen sehr gut Atomrümpfe zugeordnet werden. Hingegen werden bei einer Frequenz von 11,16 kHz die Film Dosen als Vertiefungen und deren Zwischenräume erhöht dargestellt (siehe Abbildung 3.1 (c)). Ein Vergleich von Abbildung 3.1 (b) mit einer realen STM-Messung einer fcc-Oberfläche (siehe Abbildung 3.1 (d), [3]) zeigt eine deutliche Analogie des Versuch mit dem experimentellen Verfahren.

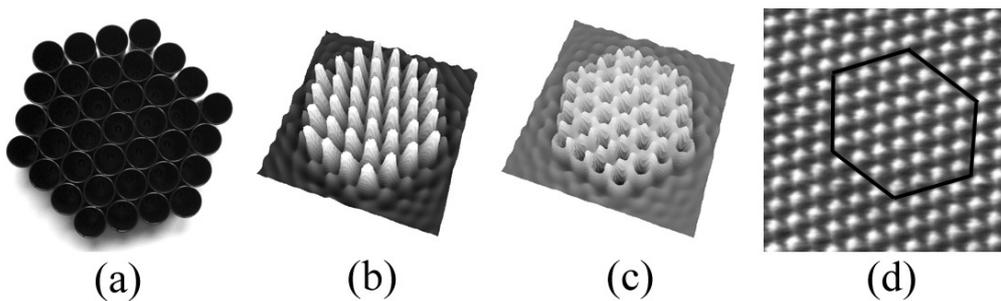


Abbildung 3.1: Film Dosenanordnung der fcc-Oberfläche, (a). Dreidimensionale Darstellung der Messdaten bei 9,84 kHz, (b) und 11,16 kHz, (c). STM-Aufnahme einer fcc-Oberfläche, (d) [3].

3.2 Graphen - einzelne Graphitschicht

Die Untersuchung elektrodynamischer und quantenmechanischer Eigenschaften von einzelnen Graphitschichten, den sogenannten Graphenen, stellt ein höchst aktuelles Thema in der modernen Festkörperphysik dar und weckte unser Interesse eine Graphenstruktur mit Hilfe des Versuchsaufbaus zu simulieren.

In Abbildung 3.2 (a) ist die Anordnung der Film Dosen zu erkennen. Um eine möglichst genaue Anordnung der Struktur zu erhalten, wurde ein zur hexagonalen Struktur analoger Aufbau verwendet - jedoch wurden jeweils die Film Dose im Mittelpunkt eines sechseckigen Graphenrings vollständig mit Wasser aufgefüllt um diesen Bereich als Gitterplatz ohne Atomrümpfpotential darstellen zu können. Abbildung 3.2 (b) zeigt deutlich, dass diese Verfahren den gewünschten Effekt erzielt und die Graphenstruktur sehr gut zu erkennen ist. Ein Vergleich einer graphisch erstellten Graphenschicht

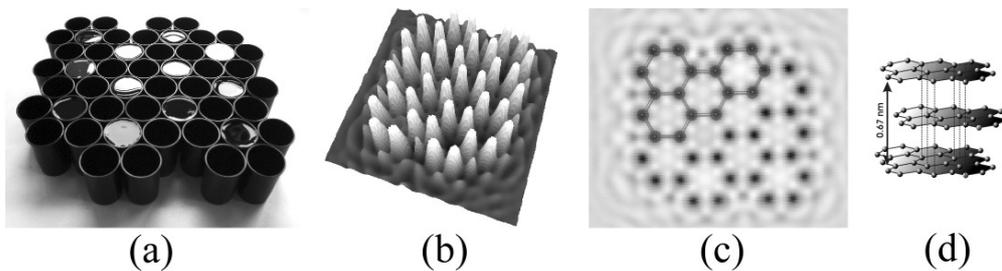


Abbildung 3.2: Filmdosenanordnung des Graphens, (a). Dreidimensionale Darstellung der Messdaten bei 9,87 kHz, (b). Vergleich einer simulierten Graphenstruktur mit einem 2D-Plot der Messdaten, (c). Schematische Darstellung der Struktur von Graphit, (d).

- mit eingezeichneten Bindungen zwischen den Kohlenstoffatomen - mit der zwei-dimensionalen Darstellung der Messdaten bei 8,25 kHz zeigt sogar eine vollständig symmetrische Übereinstimmung der geometrischen Struktur beider Modelle. Der Vergleich des Verfahrens mit durchgeführten STM-Messungen an HOPG (Highly Ordered Pyrolytic Graphite) wird an dieser Stelle nicht angeführt, da nach Abbildung 3.2 (d) die einzelnen Graphene in Graphit versetzt übereinanderliegen und demnach in STM-Bildern meist die Struktur einer fcc-Oberfläche abgebildet wird (siehe Abbildung 3.1 (d) [3]).

3.3 Obeflächendefekt durch Kathodenzerstäubung

Neben der Untersuchung von hauptsächlich ebenen Oberflächenstrukturen soll mit der in Abbildung 3.3 (a) illustrierten dreidimensionalen Anordnung der Filmdosen ein starker Obeflächendefekt simuliert und des Weiteren die Reichweite des Messverfahrens untersucht werden.

Die Grundgedanke für diese spezielle Anordnung der Filmdosen lieferte das Verfahren der Kathodenzerstäubung (Sputtern), bei der durch Beschuss mit energiereichen Ionen, Atome aus einem Festkörpertarget herausgelöst werden und somit größere kraterähnlich Obeflächendefekte hinterlassen. Das Verfahren wird hauptsächlich zur Erzeugung dünner Schichten und als Analyseverfahren eingesetzt.

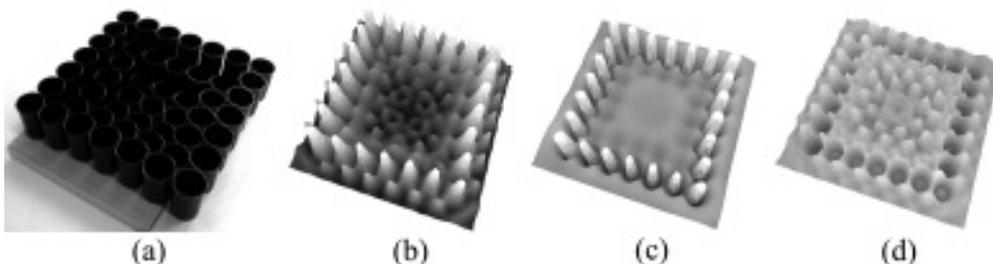


Abbildung 3.3: Filmdosenanordnung des Obeflächendefekts, (a). Dreidimensionale Darstellung der Messdaten bei (b): 9,99 kHz, (c): 4,68 kHz, (d): 16,68 kHz

In Abbildung 3.3 (a) lässt sich die dreidimensionale Anordnung der Filmdosen erkennen. Die nachfolgenden Abbildungen 3.3 (b)-(d) wurden bei einer konstanten Höhe der Mikrofonsonde aufgenommen.

Es lässt sich in Abbildung 3.3 (b) sehr gut erkennen, dass die Intensität der verwendeten Schallwellen vollkommen ausreicht um dreidimensionale Strukturen der vorliegenden Form - mit nicht unerheblichem Tiefenprofil - abbilden zu können. Des Weiteren ist jedoch zu erkennen, dass es hierbei stark auf die Wahl der Frequenz ankommt, da in Abbildung 3.3 (c) die Tiefeninformation vollständig verloren geht und aus Abbildung 3.3 (d) der Rückschluss auf eine Festkörpervertiefung ausgeschlossen wäre.

3.4 Ellipsenstruktur auf Festkörperoberfläche

In Analogie zu bekannten STM-Messung an ellipsenförmig angeordneten Eisenatomen auf Kupfersubstraten wurde die Fähigkeit der Versuchapparatur untersucht, stehende Schallwellen, analog zu stehenden Elektronenwellen in solchen Anordnungen zu detektieren.

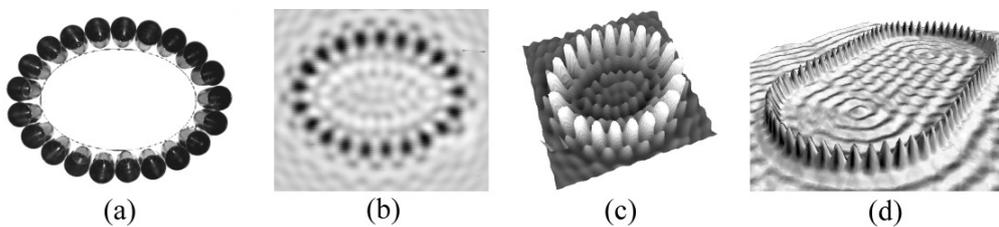


Abbildung 3.4: Film Dosenanordnung der Ellipse, (a). Zweidimensionale Darstellung der Messdaten bei 9,39 kHz, (b). Dreidimensionale Darstellung der Messdaten bei 9,90 kHz, (c). STM-Aufnahme einer experimentell umgesetzten Anordnung von Eisenatomen auf Kupfer, (d) [4].

In Abbildung 3.4 (b) ist die Ellipsenform der angeordneten Film Dosen (siehe Abbildung 3.4 (a)) gut zu erkennen, jedoch lassen sich stehende Wellen nur schwer erahnen. Dieses Darstellungsproblem lässt sich durch die dreidimensionale Abbildung 3.4 (c) wesentlich verbessern und stehende Schallwellen innerhalb der Ellipse sind gut zu erkennen. Um die Brennpunkte aus Abbildung 3.4 (d) sichtbar werden zu lassen, hätten die Film Dosen in einer größeren Ellipsenform zusammengestellt werden müssen.

3.5 Ionengitter

Für die Versuchsdurchführung wurden zwei unterschiedliche Arten von Film Dosen zur Verfügung gestellt, dies eröffnete uns die Möglichkeit ein Ionengitter in Anlehnung an eine Salzoberfläche mit der Versuchapparatur aufzunehmen.

Im Folgenden wurde zuerst eine reine Salzoberfläche ohne Gitterdefekte und des Weiteren ein mit einem Fremdatom dotiertes Salz simuliert.

3.5.1 Salz ohne Gitterdefekte

In Abbildung 3.5 (a) lässt sich deutlich das mit zwei unterschiedlichen Film Dosen zusammengestellte Ionengitter erkennen. Jedes Kationen wird jeweils von vier Anionen umschlossen und umgekehrt. In der dreidimensionalen Verarbeitung der Messdaten (Abbildung 3.5 (b)) lässt sich genau diese Eigenart des Ionengitters erkennen. Zur Verdeutlichung wurde ein Teil Darstellung mit einem grafisch erzeugten Ionengitter

überlagert. In Abbildung 3.5 (c) ist eine STM-Aufnahme einer Kochsalz-Oberfläche abgebildet. Es lässt sich erkennen, dass die Struktur dem Abbild einer sc-Oberfläche entspricht, da die Natriumatome mit ihrem größeren Atomradius die Chloratome überdecken. Dieser Sachverhalt konnte mit Hilfe der Versuchsapparatur nicht dargestellt werden. Die Gitterabstände zwischen den Kationen und Anionen sind identisch, nur auf Grund der verschiedenen Eigenfrequenzen beider Filmdosen bilden sich leicht unterschiedliche Schallamplituden, die ein Differenzieren zwischen den Filmdosen in Abbildung 3.5 (b) ermöglicht.

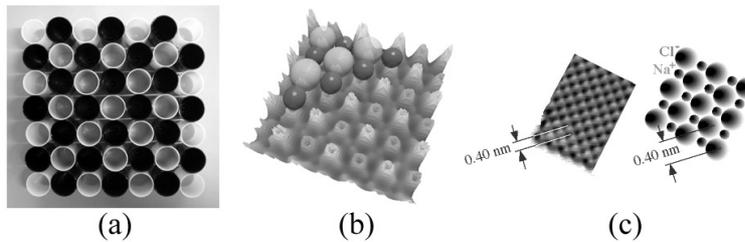


Abbildung 3.5: Filmdosenanordnung des Ionengitters, (a). Dreidimensionale Darstellung der Messdaten des Ionengitters ohne Defekte bei 7,5 kHz, (b). STM-Aufnahme einer Kochsalzoberfläche(c) [5].

3.5.2 Salz mit Fremdatom dotiert

Um den Effekt einer Dotierung zu veranschaulichen, wurde ein Ion in Form einer Filmdose aus dem Ionengitter entfernt und durch eine mit Kunstfell umwickelte Filmdose ersetzt (vergleiche Abbildung 3.5 (a) mit 3.6 (a)). Der auftretenden Effekte sind drastisch und lassen sich in Abbildung 3.6 (b) sehr deutlich erkennen. Das gesamte Ionengitter wird auf Grund des größeren Fremdatoms verzerrt und die Bindungen um das Dotieratom besonders in horizontaler und vertikaler Richtung aufgeweitet. Ein reales Analogon wurde mit der STM-Aufnahme einer mit einem Zinkatom dotierten Natriumchlorid-Oberfläche gefunden (siehe Abbildung 3.6 (b)). Es lassen sich zwischen Abbildung 3.6 (b) und 3.6 (c) durchaus Gemeinsamkeiten erkennen.

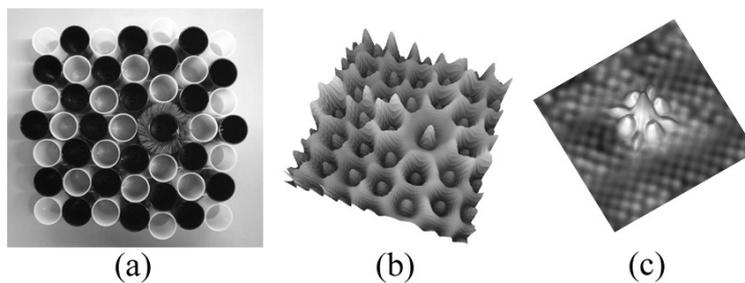


Abbildung 3.6: Filmdosenanordnung des Ionengitters, (a). Dreidimensionale Darstellung der Messdaten des dotierten Ionengitters bei 13,38 kHz, (b). STM-Aufnahme einer mit einem Zinkatom dotierten Kochsalzoberfläche, (c) [6].

3.6 Quantenpunkt

In der Halbleitertechnologie bildet der Quantenpunkt (engl.: Quantumdot) seit Jahren ein aktuelles Forschungsthema, in dem mit sehr viel Engagement an der Herstellungs- und Charakterisierungsverfahren gearbeitet wird. Quantenpunkte sind nulldimensionale Strukturen, d.h. in ihnen vorhandene Ladungsträger sind in ihrer Bewegungsfreiheit in allen drei Raumrichtungen eingeschränkt. Sie besitzen demnach diskrete Eigenenergien und verhalten sich ähnlich wie Atome, jedoch kann ihre Größe und Form manipuliert werden. Die Anwendungen von Quantenpunktstrukturen sind vielfältig und reichen vom Hochleistungslaser über Ein-Photon-Quellen bis zu Markern in der Biologie.

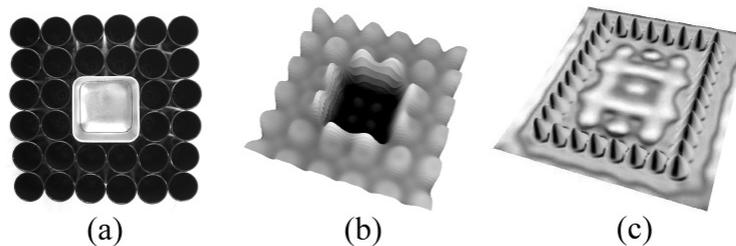


Abbildung 3.7: Film Dosenanordnung des Quantenpunktes, (a). Dreidimensionale Darstellung der Messdaten des simulierten Quantenpunktes, (b). STM-Aufnahme von Eisenatomen auf einer Kupferoberfläche mit ähnlichen Eigenschaften, (c) [7].

Mit Hilfe der experimentellen Gegebenheiten wurde versucht eine Struktur mit Film Dosen zusammenzustellen, die den Eigenschaften eines Quantenpunktes möglichst ähneln. Hierzu wurde eine quadratische Blechdose mit ca. 1,5-facher Höhe einer Film Dose und doppelter Seitenlänge eines Film Dosedurchmessers mit den selbigen in zwei Reihen umschlossen (siehe Abbildung 3.7 (a)). Um möglichst genaue Informationen über das System zu erhalten wurden Messdaten zu 99 Bildern im Bereich von 5,10 kHz bis 17,10 kHz aufgezeichnet.

Abbildung 3.7 (b) zeigt die dreidimensionale Darstellung eines Messdatensatzes; es ist deutlich zu erkennen, dass die Versuchsanordnung die Anordnung der Film Dosen sehr deutlich wiedergibt. Im nachfolgenden Abschnitt 3.6.1 wird gezeigt, dass die stehenden Schallwellen innerhalb der Blechdose nahezu analog zu Quantenpunkten diskrete Eigenschwingungen, bzw. Eigenenergien annehmen können. Dieser Sachverhalt wird durch eine theoretische Berechnung der stehenden Schallwellen veranschaulicht.

Mit Abbildung 3.6 (c) wird ebenfalls eine Analogie zur Anordnung der Film Dosen aufgezeigt. Die STM-Aufnahme zeigt deutliche Strukturen von stehenden Elektronenwellen innerhalb des Rechtecks von Eisenatomen.

3.6.1 Theoretische Berechnung stehender Wellen

In einem Topf mit quadratischer Grundfläche können sich stehende Wellen ausbilden wenn die Seitenlänge $L_{x,y}$ der Grundfläche gleich einem ganzzahligen Vielfachen der halben Schallwellenlänge ist und die Wellenknoten auf den Rändern liegen. Für dieses dreidimensionale Problem ergibt sich die stehenden Schallwellen oder Wellenfunk-

tionen $\Psi_{1,2}(x,y)$ zu [8],

$$\Psi_{1,2}(x,y) = \sqrt{\frac{2}{L_x}} \sqrt{\frac{2}{L_y}} \sin \frac{\pi n_{1,2x} x}{L_x} \sin \frac{\pi n_{1,2y} y}{L_y} \quad (3.1)$$

Wie durch Abbildung 3.8 (a)-(h) illustriert, können zu ausgewählten Frequenzen der mit der Versuchsanordnung aufgenommenen Bilder dreidimensionale Plots der Superposition zweier Wellenfunktion $\Psi(x,y) = \Psi_1(x,y) + \Psi_2(x,y)$ nahezu eindeutig zugeordnet werden. Die Größen $n_{1x}, n_{1y}, n_{2x}, n_{2y}$ bestimmen die Anzahl der Schwingungsbüchse in beide Raumrichtungen für jeden Summanden $\Psi_{1,2}(x,y)$ der Superposition. Aus den Abbildungen 3.8 (a)-(h) ist ebenfalls ersichtlich, dass eine exakte Übereinstimmung der Modenstrukturen nicht vorliegt. Die verwendete Blechdose besitzt abgerundete Seitenkanten (siehe Abbildung 3.7 (a)) und somit können die stehenden Schallwellen nur bedingt durch Gleichung (3.1) beschrieben werden.

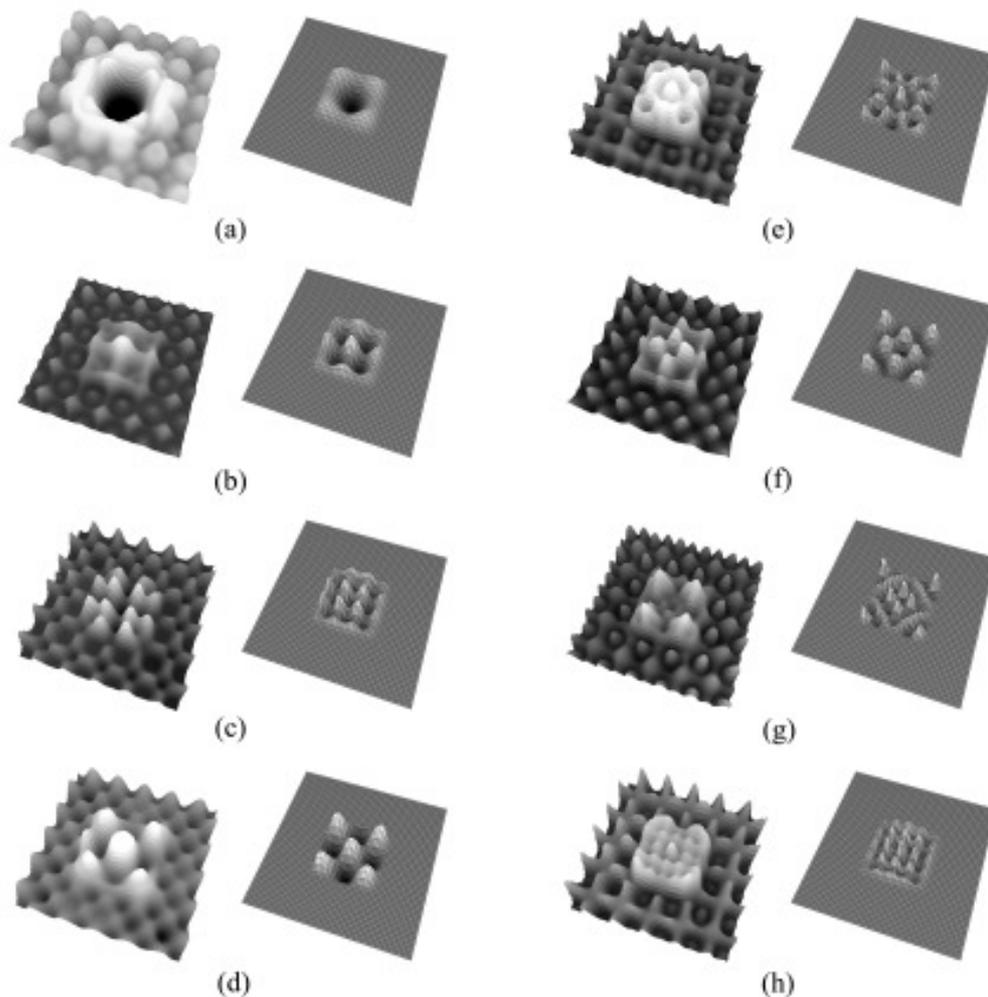


Abbildung 3.8: Experimentell ermittelte und theoretisch berechnete Modenstruktur $n_{1x}, n_{1y}, n_{2x}, n_{2y}$ der stehenden Schallwellen im Topf. (a): 1,3,3,1 ; (b): 1,5,5,1 ; (c): 1,7,7,1 ; (d): 3,3,3,3 ; (e): 3,5,5,3 ; (f): 3,7,7,3 ; (g): 5,7,7,5 ; (h): 9,1,1,9

3.7 Adsorbiertes Benzen auf Festkörperoberfläche

Abschließend soll ein STM-Aufnahme eines adsorbierten Benzen-Moleküls (C_6H_6 , ugs. Benzol) auf einer Festkörperoberfläche mit Hilfe der Versuchsapparatur simuliert werden. Hierzu wurden sechs leere Filmdosen um eine vollständig mit Wasser befüllte Filmdose angeordnet, diese sollen die Kohlenstoff-Atome des Benzen-Rings darstellen. Des Weiteren wurden sechs halb mit Wasser gefüllte Filmdosen radialsymmetrisch um den inneren Ring platziert um die Wasserstoff-Atome zu simulieren.

Für ein besseres Verständniss des Aufbaus sind die Abbildungen 3.9 (a) und 3.9 (d) zu vergleichen.

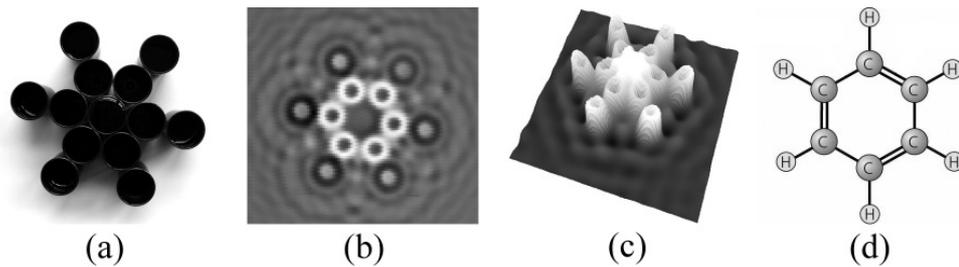


Abbildung 3.9: Filmdosenanordnung des Benzenmoleküls, (a). Zweidimensionale Darstellung der Messdaten des simulierten Benzens bei 10,10 kHz, (b). Dreidimensionale Darstellung der Messdaten des simulierten Benzens bei 6,40 kHz, (c). Atomarer Aufbau des Benzenmoleküls, (d). [9]

Die Abbildungen 3.9 (b) und 3.9 (c) zeigen eine deutliche Übereinstimmung der aufgestellten Struktur mit der Molekülform des Benzens. Besonders in Abbildung 3.9 (b) sind die Unterschiede der Atompotentiale von Kohlenstoff und Wasserstoff zu erkennen. Es bildet sich sogar durch die Schallwellen um das Molekül eine starke Abgrenzung, die nicht mit den Filmdosen übereinstimmt und Ähnlichkeit zu Molekülorbitalen aufweist.

Eine Schwierigkeit steckt jedoch in der Darstellung der stark unterschiedlichen Größen der Kohlenstoff- und Wasserstoffatome durch das Verfahren. Durch verschiedenes Befüllen der Filmdosen mit Wasser sollte dieser Effekt zwar berücksichtigt werden, zeigt jedoch nur eine Verschiebung der Eigenfrequenzen. Man kann vermuten, dass reale STM-Aufnahmen von adsorbiertem Benzen auf Festkörperoberflächen hauptsächlich nur die Kohlenstoffatome abbilden würde - demnach zeigt dieses letzte Anordnung Grenzen auf für den Vergleich von Abbildung durch die Versuchsapparatur und Rastertunnelmikroskopie.

4 Fehlerdiskussion

Neben den bereits in der Versuchsauswertung beschriebenen Schwierigkeiten bei der Darstellung und dem Vergleich von Abbildungen des Verfahrens mit realen STM-Aufnahmen sind im Folgenden noch zwei Anmerkungen anzufügen.

Bei der Auswertung der Daten fällt auf, dass bei einer zweidimensionalen Darstellung der aufgenommenen Bilddaten, also nur Anhand der Graustufen des Bildes, weniger Strukturen erkennbar sind als in einem berechneten Höhenprofil. Es ist somit empfehlenswert, eine Darstellung des Höhenprofils zu erstellen, falls nicht sicher ist,

ob ein Bild tatsächlich sinnvoll interpretierbare Informationen enthält. Regelmäßigen kurzen Linien, die an einigen rechten und linken Bildrändern zu sehen sind, entstehen durch Geräusche der Stellmotoren bei der Bewegungsumkehr des Messkopfes.

Abschließend lässt sich der durchgeführte Versuch durchaus als erfolgreich bezeichnen und Übereinstimmungen des Verfahrens mit der Rastertunnelmikroskopie sind nicht von der Hand zu weisen.

5 Zusammenfassung

Im beschriebenen Versuch - Rastertunnelmikroskopie - sollte mit Hilfe einer Versuchsvorrichtung das mikroskopische Rastertunnelverfahren auf ein makroskopisches Analogon übertragen werden. Der quantenmechanische Wellencharakter von Elektronen wird durch Schallwellen in Luft ersetzt. Mit Hilfe von Filmdosen ließen sich unterschiedlichste Gegebenheiten und Manipulationen von Festkörperoberfläche simulieren und mit dem Versuchsaufbau graphisch abbilden.

Das Verfahren eröffnet ungeahnte Parallelen zwischen der mikroskopischen Welt und des makroskopischen Versuchsaufbaus.

6 Anhang

Im nachfolgenden Anhang befindet sich das Messprotokoll auf den Seiten 22-24, sowie zusammengefasste Abbildungen aller dreidimensionalen Darstellungen der aufgenommenen Messdaten zum Quantenpunkt auf Seite 20 und dem Benzen auf Seite 21.

Literatur

- [1] WOLFGANG NOLTING:
Grundkurs Theoretische Physik 5/1: Quantenmechanik, 6. Auflage,
Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2003.
- [2] WIKIPEDIA: *Scanning Tunneling Microscopy.*
(http://en.wikipedia.org/wiki/Scanning_tunneling_microscope)
- [3] *Atomically resolved STM image (80x80 nm) of a PbSe(001) surface.*
(http://www.hlphys.jku.at/groupsites/iv-vi/gallery/iv-vi_gallery.htm)
- [4] *From Weak Localisation to Quantum Chaos.*
(<http://www.tcm.phy.cam.ac.uk/~bds10/stm15.jpg>)
- [5] INSTITUT FÜR ALLGEMEINE PHYSIK, TU WIEN: *Grains of salt.*
(<http://www.physics.gatech.edu/frog>)
- [6] *NaCl crystal doped with Zn.*
(<http://www.berkeley.edu/news/features/2000/02/images/jcsd2.jpg>)
- [7] IBM: *Rectangular Corral.*
(<http://www.almaden.ibm.com/vis/stm/images/stm14.jpg>)
- [8] WOLFGANG DEMTRÖDER:
Experimentalphysik, Bd. 3. Atome, Moleküle und Festkörper, 3. überarb. Auflage,
Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2005.
- [9] *Structure of Benzen.*
(<http://www.yourdictionary.com/images/ahd/jpg/A4benzen.jpg>)

Abbildungsverzeichnis

1.1	Darstellung eines Teilchens mit der Energie E , dessen Wellenfunktion $\Psi(x)$ durch eine Potentialbarriere der Höhe V_0 und der Breite a tunnelt. (Quelle: http://www.e18.physik.tu-muenchen.de)	3
1.2	Schematische Darstellung eines Rastertunnelmikroskops. Der Tunnelstrom ist durch die gestrichelten Linien in der Vergrößerung angedeutet [2].	5
2.1	Darstellung des Versuchsaufbaus, insbesondere des x-y-Verschiebetisches. Die Sonde mit Lautsprecher und Mikrofon ist im Bild neben der Anordnung von Filmdosen zu erkennen.	8

3.1	Filmdosenanordnung der fcc-Oberfläche, (a). Dreidimensionale Darstellung der Messdaten bei 9,84 kHz, (b) und 11,16 kHz, (c). STM-Aufnahme einer fcc-Oberfläche, (d) [3].	10
3.2	Filmdosenanordnung des Graphens, (a). Dreidimensionale Darstellung der Messdaten bei 9,87 kHz, (b). Vergleich einer simulierten Graphenstruktur mit einem 2D-Plot der Messdaten, (c). Schematische Darstellung der Struktur von Graphit, (d).	11
3.3	Filmdosenanordnung des Oberflächendefekts, (a). Dreidimensionale Darstellung der Messdaten bei (b): 9,99 kHz, (c): 4,68 kHz, (d): 16,68 kHz	11
3.4	Filmdosenanordnung der Ellipse, (a). Zweidimensionale Darstellung der Messdaten bei 9,39 kHz, (b). Dreidimensionale Darstellung der Messdaten bei 9,90 kHz, (c). STM-Aufnahme einer experimentell umgesetzten Anordnung von Eisenatomen auf Kupfer, (d) [4].	12
3.5	Filmdosenanordnung des Ionengitters, (a). Dreidimensionale Darstellung der Messdaten des Ionengitters ohne Defekte bei 7,5 kHz, (b). STM-Aufnahme einer Kochsalzoberfläche(c) [5].	13
3.6	Filmdosenanordnung des Ionengitters, (a). Dreidimensionale Darstellung der Messdaten des dotierten Ionengitters bei 13,38 kHz, (b). STM-Aufnahme einer mit einem Zinkatom dotierten Kochsalzoberfläche, (c) [6].	13
3.7	Filmdosenanordnung des Quantenpunktes, (a). Dreidimensionale Darstellung der Messdaten des simulierten Quantenpunktes, (b). STM-Aufnahme von Eisenatomen auf einer Kupferoberfläche mit ähnlichen Eigenschaften, (c) [7].	14
3.8	Experimentell ermittelte und theoretisch berechnete Modenstruktur $n_{1x}, n_{1y}, n_{2x}, n_{2y}$ der stehenden Schallwellen im Topf. (a): 1,3,3,1 ; (b): 1,5,5,1 ; (c): 1,7,7,1 ; (d): 3,3,3,3 ; (e): 3,5,5,3 ; (f): 3,7,7,3 ; (g): 5,7,7,5 ; (h): 9,1,1,9	15
3.9	Filmdosenanordnung des Benzenmoleküls, (a).Zweidimensionale Darstellung der Messdaten des simulierten Benzens bei 10,10 kHz, (b). Dreidimensionale Darstellung der Messdaten des simulierten Benzens bei 6,40 kHz, (c). Atomarer Aufbau des Benzenmoleküls, (d). [9] . . .	16
6.1	Dreidimensionale Darstellung der Messdaten des simulierten Quantenpunktes bei 88 verschiedenen Frequenzen zwischen 5,10 kHz und 17,10 kHz.	20
6.2	Dreidimensionale Darstellung der Messdaten des adsorbierten Benzens bei 40 verschiedenen Frequenzen zwischen 6,00 kHz und 17,10 kHz.	21

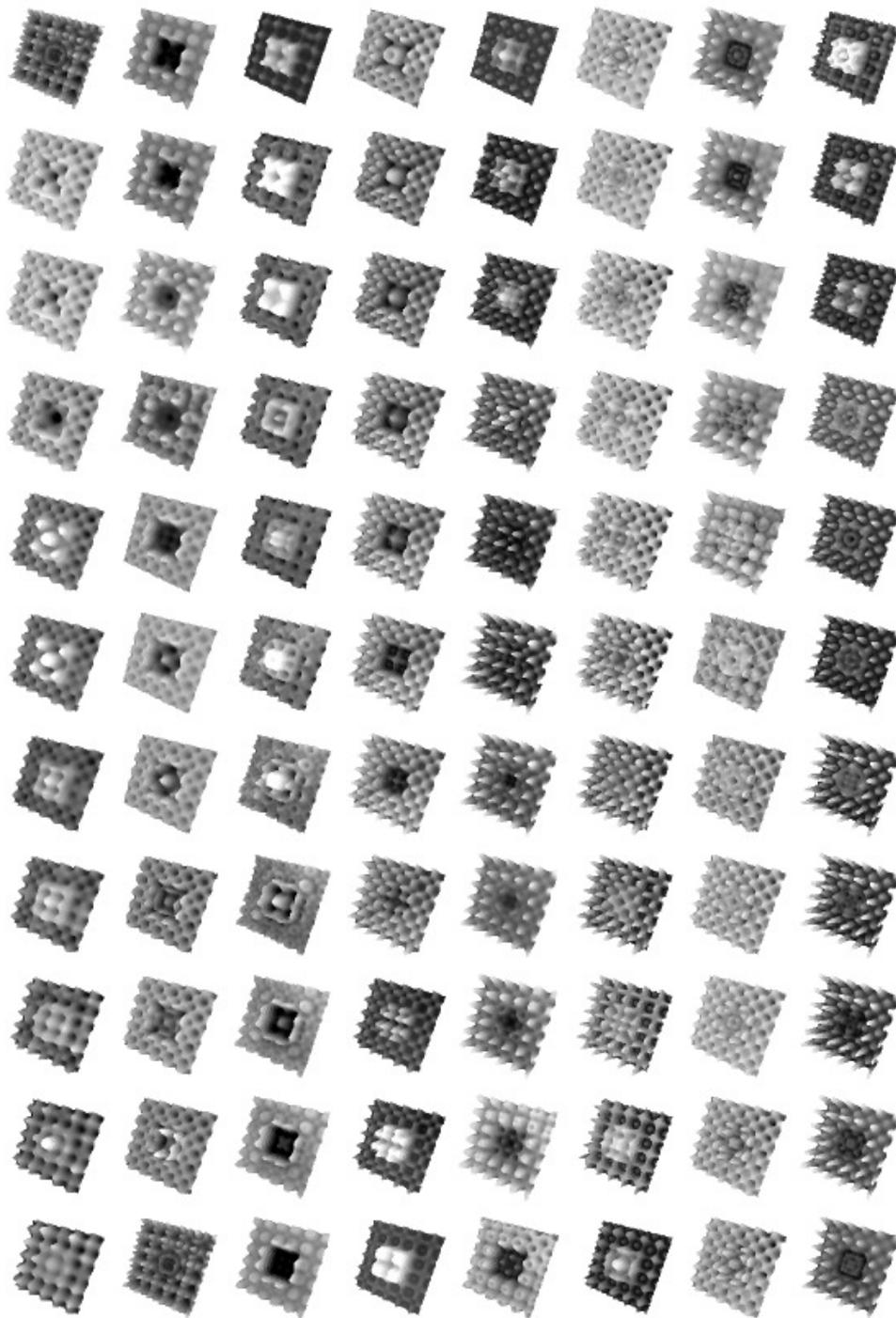


Abbildung 6.1: Dreidimensionale Darstellung der Messdaten des simulierten Quantenpunktes bei 88 verschiedenen Frequenzen zwischen 5,10 kHz und 17,10 kHz.

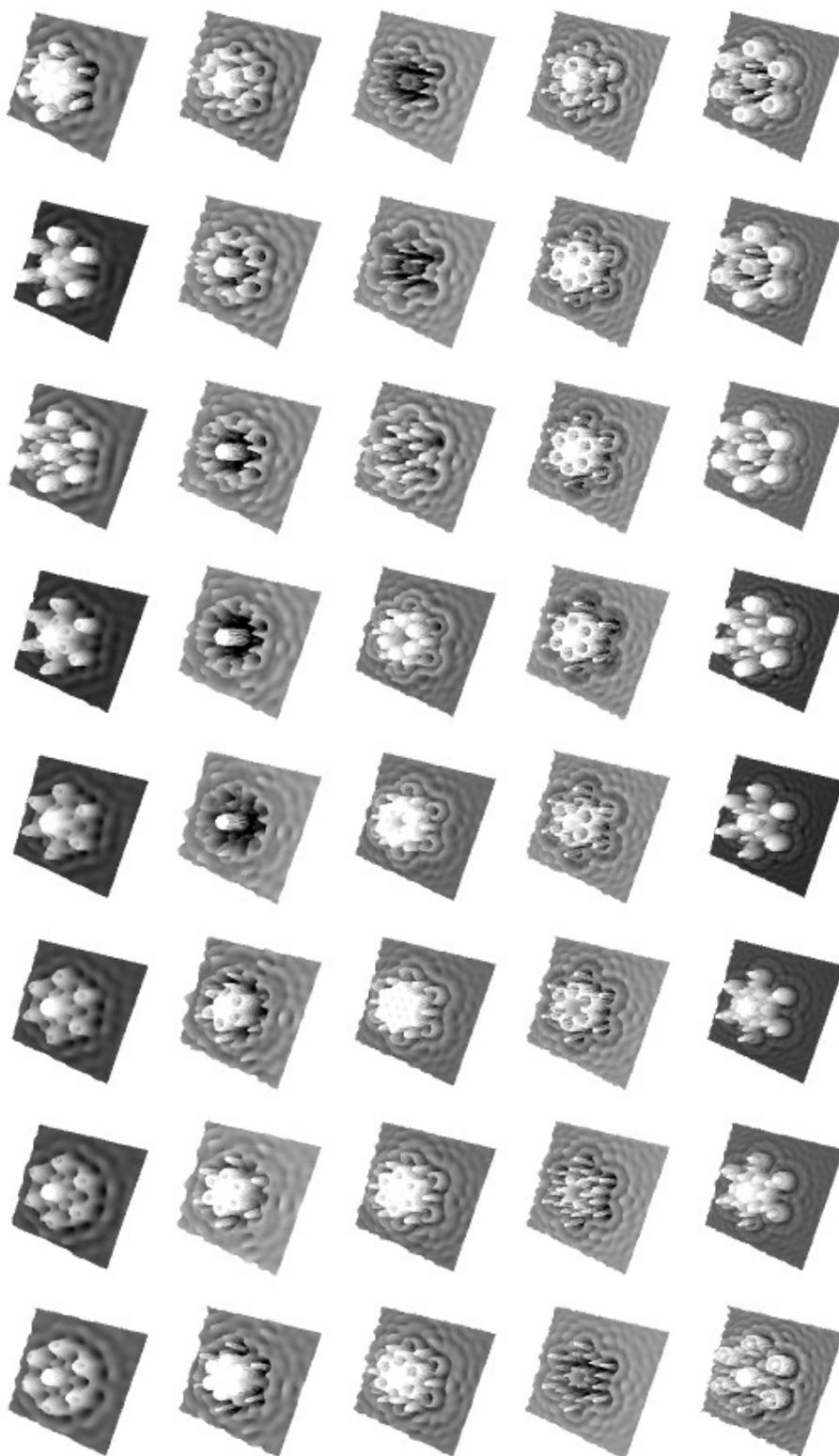


Abbildung 6.2: Dreidimensionale Darstellung der Messdaten des adsorbierten Benzens bei 40 verschiedenen Frequenzen zwischen 6,00 kHz und 17,10 kHz.