

UNIVERSITÄT REGENSBURG

F-PRAKTIKUM

Rastertunnelmikroskopie



Michael Rößner und Jonas Schambeck

5. März 2020

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	3
2	Grundlagen	4
2.1	Physikalische Konzepte	4
2.1.1	Kristallstrukturen im Festkörper	4
2.1.2	Quantenmechanischer Tunneleffekt	6
2.1.3	Piezoelektrischer Effekt	8
2.2	Aufbau eines Rastertunnelmikroskops	9
2.2.1	Aufbau der Spitze	9
2.2.2	Herstellung der Spitze	9
2.2.3	Piezomotoren	9
2.3	Betriebsarten eines Rastertunnelmikroskops	9
2.3.1	Topographischer Modus	9
2.3.2	Modus konstanter Höhe	9
2.3.3	Spektroskopie	9
2.4	Probenmaterialien	9
2.4.1	Graphit	9
2.4.2	Gold	9
2.4.3	Molybdänsulfid	9

1 Einleitung

Durch die fortschreitende Miniaturisierung der Technik entstand im 20. Jahrhundert die Notwendigkeit Strukturen abzubilden, die kleiner waren als die Wellenlänge des Lichts. Herkömmliche optische Mikroskope boten in diesem neuen Bereich, der Nanowissenschaft, nicht mehr die notwendige Genauigkeit. Ein wichtiger Schritt gelang den Physikern Gerd Binnig und Heinrich Rohrer 1981, als sie mit dem experimentellen Nachweis eines abstandabhängigen Tunnelstroms den Grundstein für das Rastertunnelmikroskop legten.

Aus dieser Erfindung ist seither eine ganze Familie an Rastersondenmikroskopen hervorgegangen, die sich unterschiedliche Wechselwirkungen auf atomarer Skala zu nutze machen. Das bekannteste ist wohl das Rasterkraftmikroskop, welches die Kräfte zwischen der Materialoberfläche und der Messspitze messen kann. Weiter wurden das optische Rasternahfeldmikroskop und das Magnetkraftmikroskop entwickelt. Erst die Entwicklung dieser Mikroskopfamilie hat die Beobachtung und Manipulation von Nanostrukturen einfach und preiswert genug für den weitläufigen Einsatz in Unternehmen gemacht. Dies hat wesentlich zur Veranschaulichung der Quantenmechanik beigetragen. Ein Beispiel bieten hier die "Quantum Corrals", wie in Abbildung 1.1 zu sehen. Hierbei handelt es sich um einfache Quantensysteme Oberflächen. In obigem Beispiel sind Goldatome radial auf einer Kupferoberfläche angeordnet. Anschaulich gezeigt werden hier die Elektronenwellen im Inneren der Anordnung. Derartige Messungen erreichten schnell große Beliebtheit und sind in populärwissenschaftlichen Zeitschriften häufig Thema. [3]

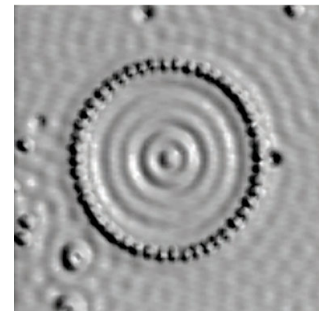


Abbildung 1.1: Quantum Corral [?]

2 Grundlagen

2.1 Physikalische Konzepte

2.1.1 Kristallstrukturen im Festkörper

Kubische Gitter

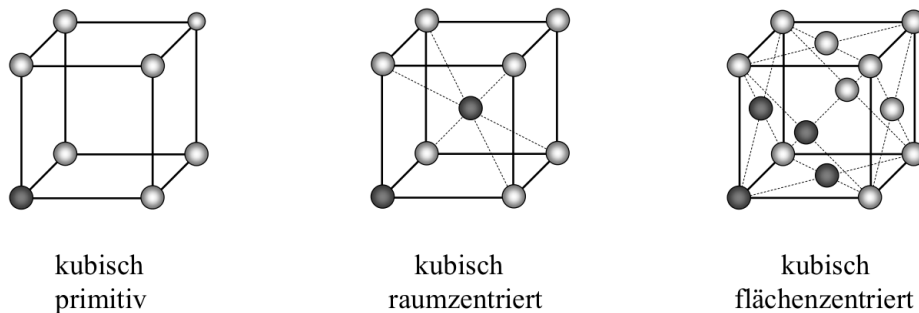


Abbildung 2.1: Die drei kubischen Atomgitter. Von links nach rechts: einfach kubisch (sc), kubisch raumzentriert (bcc), kubisch flächenzentriert (fcc) [1]

Es existieren drei verschiedene kubische Gitter. Diese sind in Abbildung 2.1 dargestellt. Im Rahmen dieses Versuches soll nur das kubisch flächenzentrierte Gitter näher betrachtet werden. Viele Metalle und Legierungen kristallisieren in diese Anordnung.

Betrachtet man eine möglichst dichte Packung an Kugeln, so sind zwei Stapelfolgen möglich. Das fcc-Gitter repräsentiert hierbei die Schichtfolge ABCABC..., siehe hierzu Abbildung 2.2. Ein Atom hat in dieser Anordnung 12 nächste Nachbarn mit dem Abstand $\frac{a}{\sqrt{2}}$. a sei hier die Gitterkonstante des Würfels. In einer kubischer Zelle befinden sich $8 \cdot \frac{1}{8} + 6 \cdot \frac{1}{2} = 4$ Atome. Die Atome an den Ecken befinden sich in acht Zellen gleichzeitig, jene an den Flächen in zwei. Sie werden deshalb anteilig hinzugerechnet. Die Packungsdichte $V_{\text{Atome}}/V_{\text{kub. Zelle}}$ ergibt sich somit zu:

$$\underbrace{\frac{4}{3} \left(\frac{d_{NN}}{2} \right)^2 \pi}_{\text{Volumen eines Atoms}} \cdot \frac{4}{\text{Atome pro kubischer Zelle}} / \frac{a^3}{\text{Volumen des Würfels}} \approx 0.74$$

Die dichtest mögliche Kugelpackung nimmt also 74% des Raums ein.

Hexagonal dichteste Kugelpackung

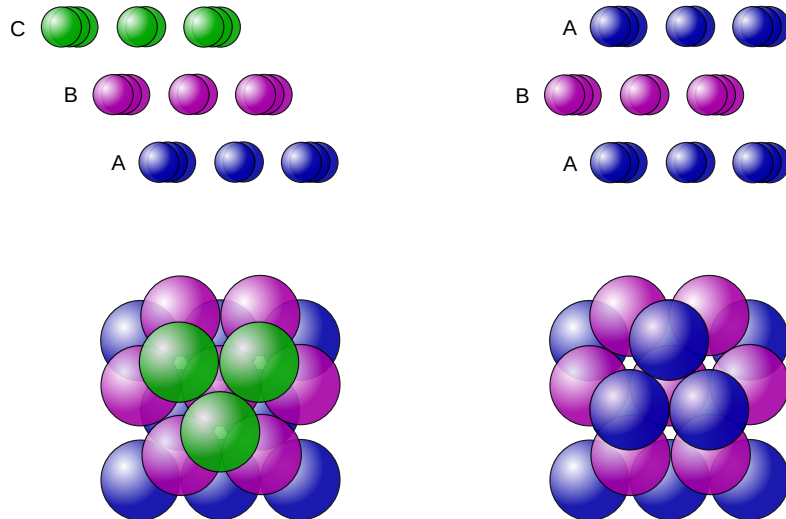


Abbildung 2.2: Die möglichen Stapelfolgen für eine dichteste Kugelpackung: Links im Bild werden drei verschiedene Schichten gestapelt, also ABCABC... Rechts werden nur zwei Schichten gestapelt, die dritte Schicht liegt also exakt auf der Ersten, ABABAB... [4]

Die rechte Stapelfolge in Abbildung 2.2 wird als hexagonal dichteste Kugelpackung (hcp) bezeichnet. In Eigenschaften wie Abstand und Anzahl der nächsten Nachbarn gleicht es dem fcc, was durch die Betrachtung als dichteste Packungen schnell klar wird. In Abbildung 2.3 sind die Stapelfolgen eingezeichnet. Die Vektoren a und b sind gleich lang. Für c findet man $c = \sqrt{\frac{8}{3}} a$. In realen Kristallen weicht dies oft etwas ab.

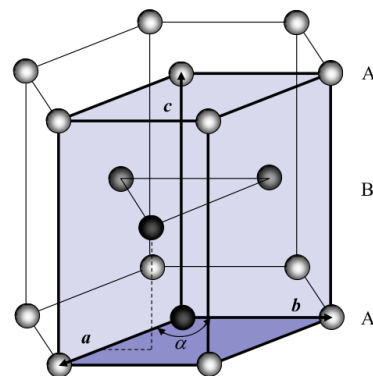


Abbildung 2.3: hcp-Gitter [1]

Graphenstruktur

In Abbildung 2.4 ist die Bienenwabenstruktur des Graphens dargestellt. Es handelt sich um eine Atomlage von Kohlenstoffatomen, die durch sp^2 -Hybridorbitale verbunden sind. Alle Bindungen sind hierbei gleich lang. [1]

2.1.2 Quantenmechanischer Tunneleffekt

Das Tunneln beschreibt einen quantenmechanischen Effekt, nach dem es für Teilchen möglich ist, eine Energiebarriere zu überwinden, auch wenn diese eine wesentlich höhere

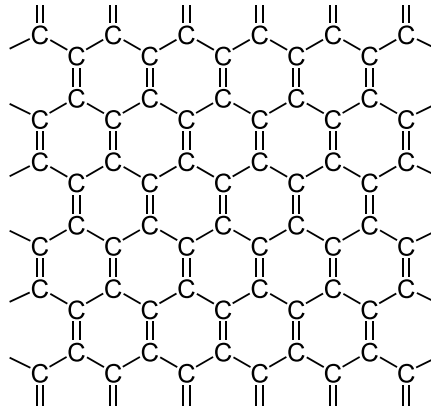


Abbildung 2.4: Struktur von Graphen [5]

Energie als das Teilchen besitzt. Klassisch wäre dies unmöglich.
Wir betrachten eine Potentialbarriere

$$V(x) = V_0 \Theta(a - |x|)$$

und ein Teilchen mit der Energie $E < V_0$. Benutzt man die stationäre Schrödingergleichung

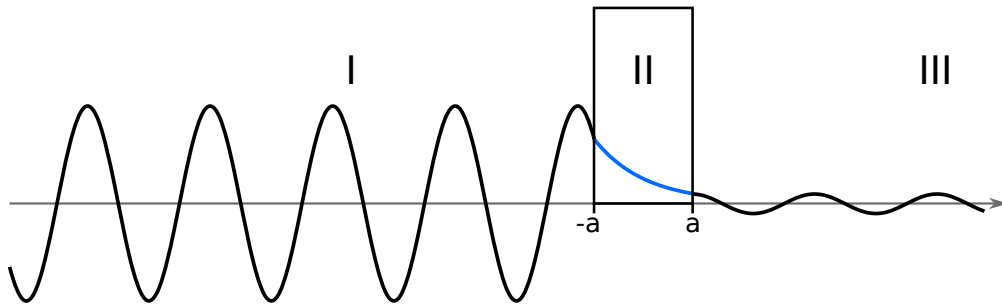


Abbildung 2.5: Skizze des Tunneleffekts: Die Wellenfunktion des Teilchens läuft von links auf die Potentialbarriere zu. Nach einem exponentiellen Abfall im Inneren der Barriere besteht eine kleine Wahrscheinlichkeit, dass sich das Teilchen rechts der Barriere aufhält

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{d^2}{dx^2} \Phi(x) + V(x)\Phi(x) = E\Phi(x)$$

so findet sich für die Teilchenwellenfunktion

$$\Psi(x) = \begin{cases} A e^{ikx} + B e^{-ikx}, & x < -a \\ C e^{-\kappa x} + D e^{\kappa x} & -a < x < a \\ F e^{ikx} + G e^{-ikx}, & x > a \end{cases}$$

mit den Wellenzahlen $k = \sqrt{2mE}/\hbar$ und $\kappa = \sqrt{2m(V_0 - E)}/\hbar$. Benutzt man nun die Anschlussbedingungen

$$\begin{aligned} x = -a : \quad & A e^{-ika} + B e^{ika} = C e^{\kappa a} + D e^{-\kappa a} \\ x = a : \quad & F e^{+ika} + G e^{-ika} = C e^{-\kappa a} + D e^{+\kappa a} \end{aligned}$$

und die Normalisierungsbedingung

$$\int \Psi^*(x) \Phi(x) dx = 1$$

so kann man Ausdrücke für die einzelnen Koeffizienten erhalten. Für ein von links einfallendes Teilchen, also $G = 0$, errechnet sich die Transmissionsamplitude $S(E)$ zu

$$S(E) = \frac{F}{A} = \frac{e^{-2ika}}{\cosh(2\kappa a) + \frac{i\varepsilon}{2} \sinh(2\kappa a)}$$

Die Wahrscheinlichkeit einer Transmission, der Durchlässigkeitskoeffizient, errechnet sich dann zu

$$|S(E)|^2 = \frac{1}{1 + (1 + (\varepsilon^2/4)) \sinh^2(2\kappa a)}$$

Nimmt man nun eine sehr hohe und breite Barriere an, also $\kappa a \gg 1$ und vernachlässigt die aus dieser Näherung resultierenden Logarithmusterme, so erhält man den handlichen Ausdruck

$$|S(E)|^2 = \exp\left(-4\sqrt{2m(V_0 - E)} \frac{a}{\hbar}\right)$$

[6]

2.1.3 Piezoelektrischer Effekt

Bestimmte Materialien erzeugen eine elektrische Spannung, sobald eine äußere Kraft auf den Körper wirkt. Dies wird als piezoelektrischer Effekt bezeichnet. Er wurde 1880 durch die Brüder Curie an einigen Kristallen entdeckt.

Essentiell für die Rastersondenmikroskopie ist der inverse piezoelektrische Effekt. Dieser führt zu einer Geometrieänderung des Kristalls beim Anlegen einer äußeren Spannung. Dies ermöglicht sehr feine Ortsänderungen der Spitze. Es werden drei technische nutzbare Vorgänge unterschieden, die in Abbildung 2.6 skizziert werden.

- **Längs-Effekt:**
Eine äußere Kraft \mathbf{F} führt zu einer Polarisierung \mathbf{P} . Die resultierende Spannung U liegt in gleicher Richtung an.
- **Querr-Effekt:**
Eine äußere Kraft \mathbf{F} führt zu einer transversalen Polarisierung \mathbf{P} . Die resultierende Spannung U liegt nun quer an.
- **Scher-Effekt:**
Eine äußere Kraft \mathbf{F} führt zu einer diagonalen Polarisierung \mathbf{P} . Die resultierende Spannung U liegt wiederum quer an.

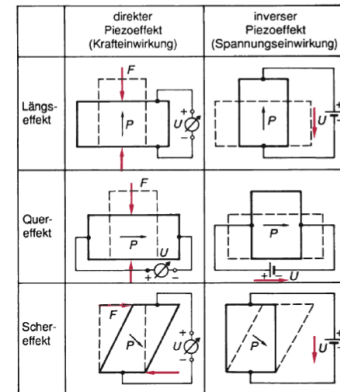


Abbildung 2.6: Piezoelektrizität [7]

Die Anwendungen der Piezoelektrizität sind weitreichend. Abbildung 2.7 gibt hierzu eine Übersicht. [7]

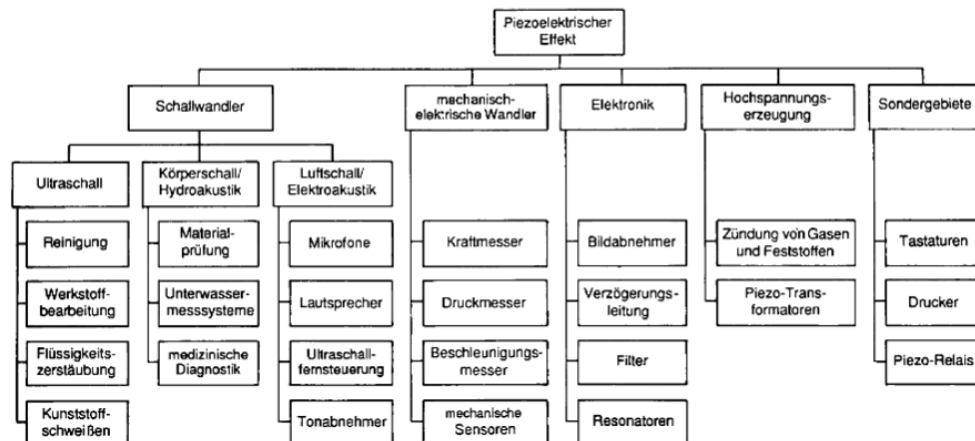


Abbildung 2.7: Anwendung der Piezoelektrizität [7]

2.2 Aufbau eines Rastertunnelmikroskops

2.2.1 Aufbau der Spitze

2.2.2 Herstellung der Spitze

2.2.3 Piezomotoren

2.3 Betriebsarten eines Rastertunnelmikroskops

2.3.1 Topographischer Modus

2.3.2 Modus konstanter Höhe

2.3.3 Spektroskopie

2.4 Probenmaterialien

2.4.1 Graphit

2.4.2 Gold

2.4.3 Molybdänsulfit

Literaturverzeichnis

- [1] Hunklinger, S.: Festkörperphysik. 5. Auflage. Berlin: De Gruyter, 2017
- [2] <https://www.physicscentral.com/explore/action/atom.cfm> 04.03.2020
- [3] <https://de.wikipedia.org/wiki/Rastertunnelmikroskop> 05.03.2020
- [4] https://de.wikipedia.org/wiki/Dichteste_Kugelpackung 04.03.2020
- [5] <https://de.wikipedia.org/wiki/Graphen> 04.03.2020
- [6] Schwabl, F.: Quantenmechanik I. 7. Auflage. Berlin: Springer, 2007
- [7] Hering, E., Martino, R., Stohrer, M.: Physik für Ingenieure. 12. Auflage. Berlin: Springer, 2016