

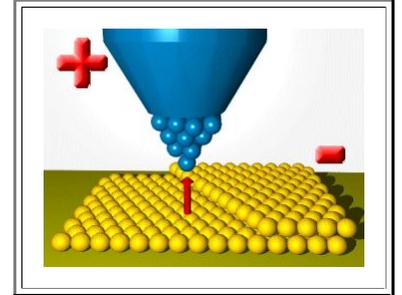
Sichtbare Wellenfunktionen

Illustration

- Kann man Orbitale und **Wellenfunktionen** irgendwie direkt sehen? Mit einem Elektronenmikroskop oder sowas?
 - Man kann nicht. Zumindest nicht direkt die Wellenfunktion ψ eines Elektrons. Sie ist in der Regel eine **komplexe** Funktion. Wie soll das aussehen?
 - Wohl aber kann man die **Aufenthaltswahrscheinlichkeit**, also ψ^2 unter günstigen Umständen direkt sehen.

➤ Dazu nimmt man ein **Rastertunnelmikroskop**, abgekürzt **RTM**, oder gebräuchlicher **STM** (für scanning tunnel microscope) **1981** erfunden von Gerd **Binnig** und Heinrich **Rohrer**, die damals für das **IBM** Forschungslabor in Zürich arbeiteten. **1986** gab's dafür den Nobelpreis.

- Das Prinzip, wie nebenstehend dargestellt, ist extrem einfach: man nehme eine extrem scharfe Nadel, deren Spitze nur noch aus einem Atom besteht, und rastere (= scanning) sie im Abstand **< 1 nm** über die Oberfläche der zu untersuchende Probe. Daher das "Raster" im Namen.
- An die Nadel legt man den positiven, and die Probe den negativen Pol einer Spannungsquelle. Gemessen wird (im Prinzip) der in die Nadel fließende Strom; damit wird dann das Bild aufgebaut.
- Der Strom (praktisch nur noch aus einzelnen Elektronen bestehend) muß trotz des kurzen Abstands noch durch eine Energiebarriere fließen; das kann er aber bequem mit dem **Tunneleffekt**. Der Strom ist also ein Tunnelstrom, daher das "Tunnel" im Namen.



➤ Bei der praktischen Umsetzung gibt es aber ein paar Haken und Ösen, die aber nur durchnummeriert werden sollen:

1. Wie macht man eine derart scharfe Nadel?
2. Wie hält man sie in einem konstanten winzigen Abstand?
Antwort: Indem man per Regelkreis den Strom konstant hält und die z-Achsenkoordinate variiert. Das Signal ist dann die z-Koordinate, oder besser gesagt, die Spannung, die man an den Piezokristall des Abstandshalters anlegen muß.
3. Wie kann man mit einer mechanischen Präzision **< 0,01 nm** arbeiten? Das braucht man ja, um die notwendige Auflösung zu bekommen.?
4. Wie vermeide ich kleinste Vibrationen meiner Anordnung, die ja das Bild komplett verwackeln würden?
5. Wie messe ich die ja wohl ziemlich kleinen Tunnelströme mit der erforderlichen Präzision?
6. Wie erhalte ich eine atomar halbwegs glatte und vor allem saubere Oberfläche der Probe?

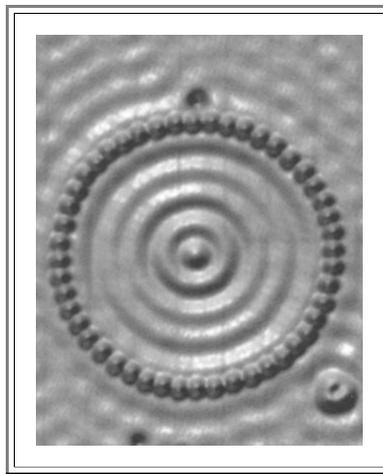
- So ganz umsonst gibt es den Nobelpreis halt doch nicht.

➤ Wenn man all die Probleme gelöst hat, und tatsächlich ein Bild mit einer Vergrößerung von ca. **50 000 000 x** entstanden ist, stellt sich eine andere Frage: Was sehe ich eigentlich?

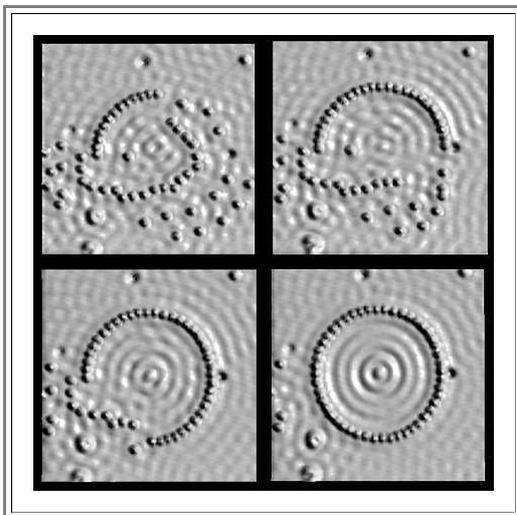
- Auch keine ganz simple Frage. Aber im großen und ganzen lautet die Antwort: Der Tunnelstrom ist gegeben durch die Wahrscheinlichkeit, daß am betrachteten "Punkt" ein Elektron da ist mal der Wahrscheinlichkeit, dass es tunnelt.
- Falls die letztere Wahrscheinlichkeit halbwegs konstant ist, sehe ich also direkt die **Aufenthaltswahrscheinlichkeit** der Elektronen auf der Oberfläche der Probe.

➤ Das wird besonders interessant, wenn ich die Oberfläche der Probe noch geeignet manipulierte. Zum Beispiel kann ich auf eine sonst möglichst glatte und strukturlose Oberfläche eine Reihe Atome setzen, die einen geschlossenen Ring bilden.

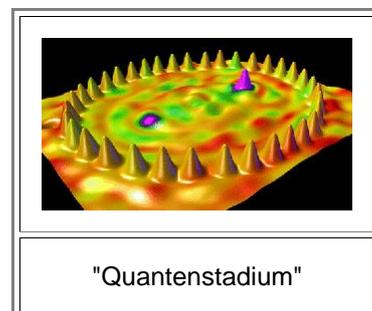
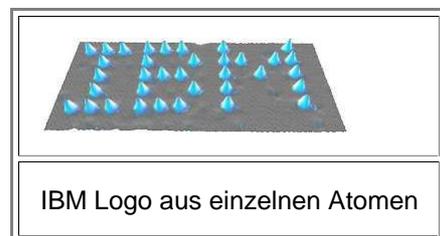
- Das ist wie ein Zaun, oder ein Korral ("corral") für ein Elektron, das ich in diesen Pferch einbringe. Was ich dann sehe sieht dann so aus.



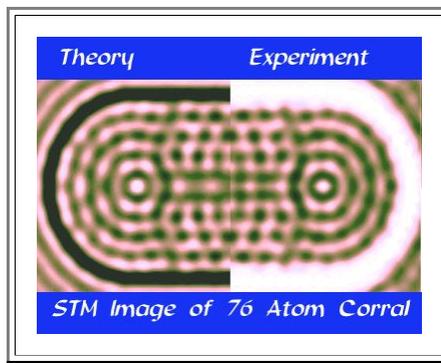
- Das ist ein sensationelles Bild. Es wurde **1993** von Crommie, Lutz and Eigler (IBM Almaden) erstellt. Die "Welle" in dem von **48** Eisenatomen auf der **{111}** Oberfläche von Kupfer geformten runden Korral ist *ein* Elektron. Wir sehen direkt das Quadrat seiner Wellenfunktion, oder genauer das Quadrat der gerade eingenommenen Wellenfunktion (das Elektron in dem durch die **Fe** Atome gebildeten runden Potentialtopf hat mehrere mögliche Zustände).
- Es erübrigt sich festzuhalten, daß das gemessene ψ^2 exakt auf das gerechnete paßt (in Matwis II werden wir eine ziemlich ähnliche Situation selbst berechnen).
- Eine Frage drängt sich auf: Wie bekommt man **48 Fe** Atome dazu, auf einem Kupferkristall Ringelreihen zu spielen?
 - Durch "**Nanotechnik**". Man benutzt das **STM** als einen Mikromanipulator. Erst bringt man genügend **Fe** Atome irgendwie verteilt auf die **Cu** Oberfläche. Dann schaut man nach wo sie sind, und bringt dann ein **Fe** Atom dazu, an der Spitze hängenzubleiben.
 - Dann fährt man mit der Spitze zum gewünschten Platz und setzt das Atom dort wieder ab. Eigentlich einfach - im Bild unten sieht man die verschiedenen Stadien des Aufbaus eines Quantenkorral.



- Spätestens jetzt setzt beim normalen Wissenschaftler der Spieltrieb ein:



- Man kann statt runden auch elliptische oder anders geformte Korralen bauen; das Bild rechts zeigt solche ein Gebilde.
 - 36 Co** Atome bilden eine Ellipse, ein zusätzliches **Co** Atom sitzt in einem Brennpunkt der Ellipse (rechts oben). Das im Korral herumtobende Elektron hat eine komplexere Wellenfunktion als im Kreiskorral, insbesondere ist es auch ganz gern im zweiten Brennpunkt, obwohl da gar kein Atom sitzt - eine Art Quantenecho. (Courtesy of IBM.) reported by: Manoharan et al., in Nature, 3 February 2000
- Wie gut Messung und Rechnung übereinstimmen, zeigt ein letztes Bild (für ein "Stadium") durch direkten Vergleich (von der Heller-Forschungsgruppe der Uni Harvard).



Ein Bild sagt mehr als tausend Worte: Die Quantentheorie "stimmt"; die Schrödingergleichung bestimmt, wo's lang geht.