

## Rastersonden-Mikroskopie (SPM)

Der Rastersonden-Mikroskopie (SPM) liegt eine geregelte rasternde Bewegung einer spitz zulaufenden Messsonde in unmittelbarer Nähe zur Probenoberfläche zugrunde. Die erhaltenen dreidimensionalen Bildinformationen umfassen Strukturen und Rauigkeiten bis hinab zur atomaren Skala sowie lokale Materialeigenschaften. Während die Rastertunnel-Mikroskopie (STM) auf elektrisch leitfähige Werkstoffe beschränkt ist, erlauben die Varianten der Rasterkraft- Mikroskopie (AFM) auch die Untersuchung von Isolator-Oberflächen.

### Betriebsarten:

#### Oberflächenabbildung

- Die präzise zweidimensionale Rasterbewegung ermöglicht die Untersuchung der Oberflächentopographie bis in molekulare Dimensionen.
- Vertikal hochaufgelöste Abbildungen können durch eine Kontrastgebung aufgrund chemisch spezifischer Wechselwirkungen zwischen Sonde und Werkstoff erweitert werden. Damit können chemische Heterogenitäten der Oberfläche analysiert werden.

#### Oberflächenspektroskopie

- An ausgewählten Positionen der Oberfläche lassen sich elektronische Eigenschaften oder die Deformierbarkeit des Werkstoffs sowie seine adhäsiven Wechselwirkungen mit der funktionalisierbaren SPM-Mess-Sonde ermitteln.

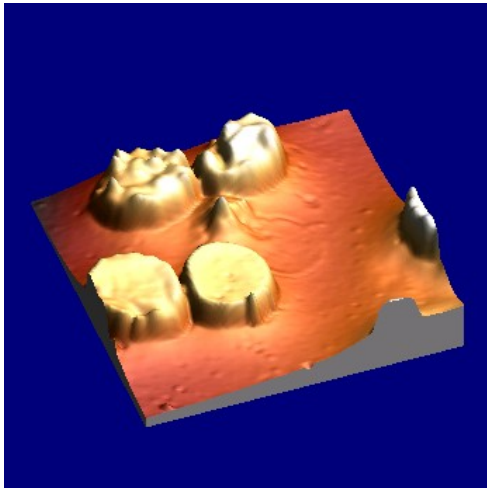
#### Oberflächenmodifizierung

- Die SPM-Spitze kann als Werkzeug im Sub- $\mu\text{m}$ -Bereich zur Positionierung von Molekülen und Partikeln verwendet werden.

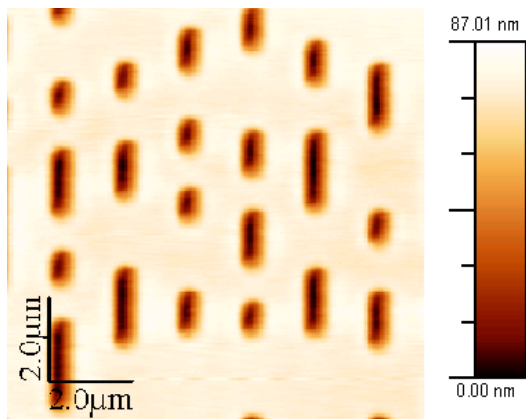
### Anwendungsgebiete:

- lokalen Charakterisierung oder Gestaltung von Oberflächen chemischer, biologischer und elektronischer Werkstoffe
- Hoch orts aufgelöste Abbildung von Polymer-, Metall- oder Keramik-Oberflächenstrukturen und -rauigkeiten
- Bestimmung des Adhäsionsverhaltens und der Reaktivität auf molekularer Ebene
- Untersuchung von Korrosions- oder Wachstumsprozessen zum Beispiel in der Elektrochemie
- Erzeugung funktionaler Strukturen in der Nanotechnologie

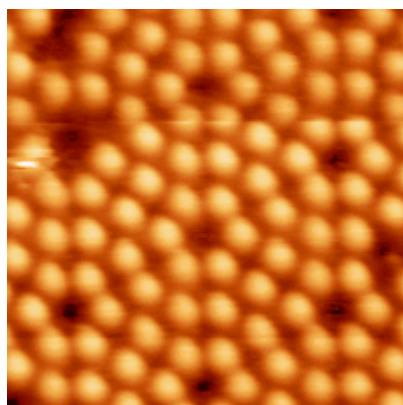
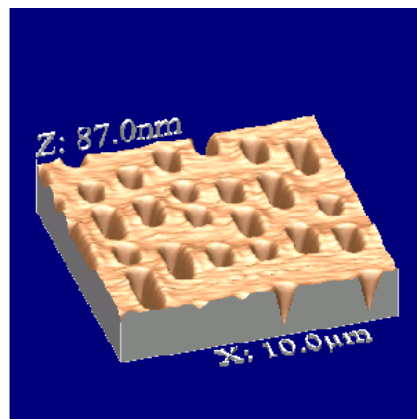
**Beispiele:**



AFM-Aufnahme von Blutkörperchen



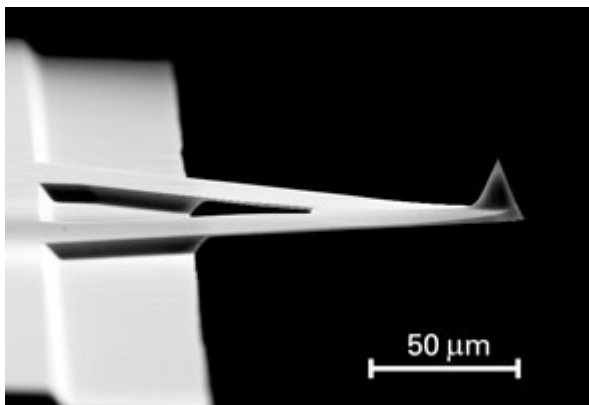
AFM-Aufnahme einer CD



STM-Aufnahme von [111]-Si, getempert

## Rasterkraftmikroskopie (AFM)

Die Rasterkraftmikroskopie gehört zu den Rastersondenmethoden. Sie wurde 1986 von Binnig, Quate und Gerber entwickelt und dient zur mechanischen Abtastung von Oberflächen auf der Nanometerskala. Dabei wird eine an einer Blattfeder befestigte Nadel (dem sog. „Cantilever“) zeilenweise über die Oberfläche geführt. Die Verbiegung des Hebelarms, hervorgerufen durch Kräfte zwischen Probe und Spitze werden hochaufgelöst gemessen.



Cantilever mit Spitze

### Contact- und Noncontactmode

Im einfachsten Fall kann die Wechselwirkung zwischen Probe und Spitze durch die potenzielle Energie zweier Massenpunkte angenähert werden. Der Verlauf kann durch das Lenard-Jones-Potenzial näherungsweise beschrieben werden.

Wird die Probe ausreichend an die Spitze herangefahren, befinden sich Probe und Spitze im direkten Kontakt und es herrschen repulsive Kräfte. Das Mikroskop wird in diesem Fall im Contact-Mode betrieben.

Das Mikroskop kann jedoch auch in der Weise betrieben werden, dass adhäsive Kräfte zwischen Spitze und Probe herrschen. Das Mikroskop arbeitet dann im Noncontact-Mode. Da die Kräfte für eine statische Defektverteilung zu klein und zu instabil sind, werden die adhäsiven Kräfte dynamisch bestimmt. Dabei wird der Cantilever mittels eines weiteren Piezo-Elements nahe der Resonanzfrequenz in Schwingung gebracht und der Probe angenähert. Durch das Kraftfeld zwischen Probe und Spitze ändert sich die Schwingungsfrequenz und die Schwingungsamplitude des Cantilevers. Die Amplitude wird ebenfalls über die Laserreflektion am Cantilever gemessen. Über einen Rückkopplungsmechanismus wird nun die Amplitude und damit der Abstand zur Probe konstant gehalten.

Da die Spitze keinen direkten Kontakt zur Probe erfährt, macht es dieser Modus oft erst möglich, weiche Proben oder nicht festhaftende Schichten auf der Probenoberfläche zerstörungsfrei zu messen.

#### Weitere Messmodi

Durch die Vielfalt der zwischen Probe und Spitze auftretenden Wechselwirkungen, die z.B. elektrostatischer, magnetischer, tribologischer Natur sein können, wurden einige weitere Messmodi entwickelt. Auch das Anlegen einer Spannung zwischen Probe und Spitze, ähnlich dem STM-Mode, bietet die Möglichkeit, weitere Eigenschaften wie Leitfähigkeit, Kapazität oder Oberflächenpotenziale der Probe zu messen.

## Vor- und Nachteile des Rasterkraftmikroskops

#### **Vorteile:**

- Zerstörungsfrei
- Topographie ist zugänglich
- Funktioniert an Luft und im UHV
- In-situ Untersuchungen sind möglich

#### **Nachteile:**

- Auflösung niedriger als beim STM

## Rastertunnelmikroskop (STM)

Der Abstand zwischen Probe und Spitze stellt eine Energiebarriere für Elektronen dar, die nach der klassischen Physik nicht zu überwinden wäre. Nach der Quantenmechanik hört die Wellenfunktion eines Elektrons am Ende der Spitze nicht plötzlich auf, sondern klingt exponentiell ab. Wenn die Barriere schmal ist, also der Abstand zwischen Spitze und Probe klein ist, kann die Aufenthaltswahrscheinlichkeit des Elektrons auf der anderen Seite der Barriere deutlich größer als null werden. Wenn zwischen Probe und Spitze eine Spannung anliegt, fließt dann ein Tunnelstrom.

Die Größe des Tunnelstroms hängt sehr stark vom Abstand zwischen Probe und Spitze ab, das heißt, wenn man die Spitze über eine "unebene" Probe bewegt, ändert sich der Strom entsprechend, so dass man die Unebenheiten abbilden kann, indem man den Strom misst. Die Methode ist so empfindlich, dass sogar atomare Auflösung erreicht wird!

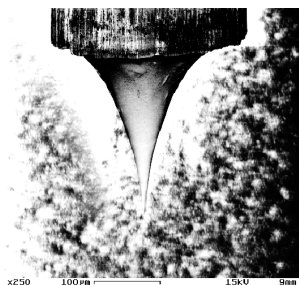
Je nach Richtung der Angelegten Spannung, tunneln Elektronen aus der Spitze in unbesetzte elektronische Zustände der Probe, oder Elektronen aus den besetzten Zuständen der Probe tunneln in die Spitze.

### Aufbau eines STM

Der Aufbau eines Rastertunnelmikroskops enthält folgende wichtige Elemente:

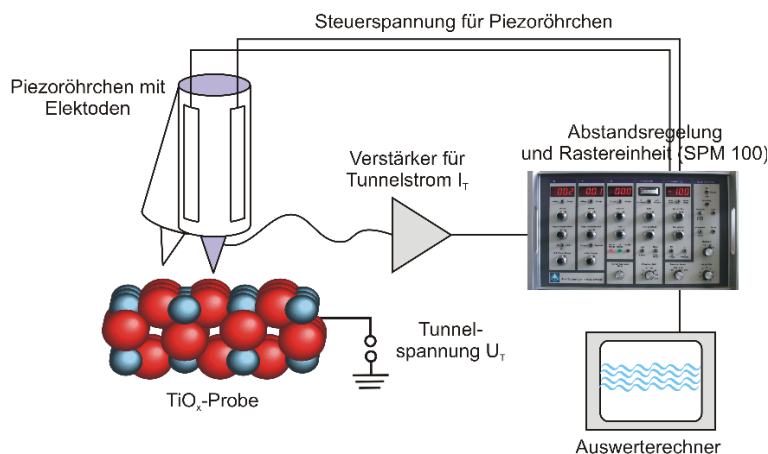
- **Die Spitze** muss möglichst spitz sein und sollte idealerweise sogar in einem einzelnen Atom enden. Bei besonders glatten Proben, wie zum Beispiel einer frisch gespaltenen Graphit-Oberfläche, kann man auch mit "schlechten" Spitzen gute Ergebnisse erzielen.

Spitzen kann man durch Ätzen oder durch geschicktes Abreißen eines Metalldrahtes mit Hilfe eines Seitenschneiders herstellen.



REM-Aufnahme einer STM-Spitze

- **Der Scanner** muss in der Lage sein, Bewegungen auf den Bruchteil eines Atomabstandes genau auszuführen. Dazu verwendet man Piezoröhrchen, die man durch anlegen von elektrischen Spannungen in alle drei Raumrichtungen verformen kann. Ob man die Probe oder die Spitze scannt ist im Prinzip gleichgültig, beide Varianten werden gebaut. Wenn große Proben, z. B. ganze Wafer in der Halbleiterindustrie untersucht werden sollen, wird man eher die Spitze bewegen.
- **Ein Messverstärker** wird gebraucht, um die kleinen Tunnelströme, die sich in der Größenordnung Nanoampere bewegen, zu messen.
- **Ein Computer** wird zur komfortablen Steuerung des Mikroskops verwendet und stellt die Messung in Echtzeit graphisch dar.
- **Eine Dämpfung** hält störende Erschütterungen fern. Kleinste Erschütterungen oder Vibrationen machen gute Bilder unmöglich.



Schematischer Aufbau eines STMs

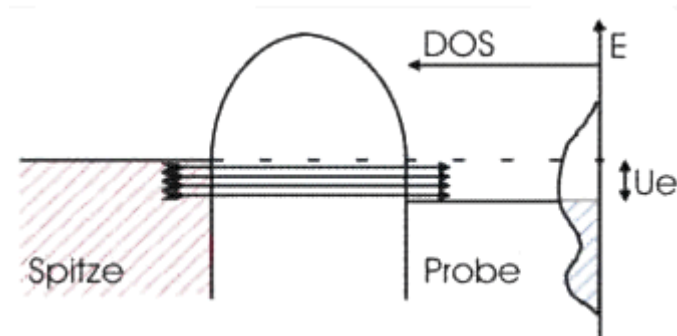
## Betriebsarten

Für den Betrieb des STM gibt es im Prinzip zwei Möglichkeiten:

1. **Konstante Höhe:** Es werden nur die X und Y Auslenkungen des Scanners benutzt, der vorgegebene Abstand zwischen Spitze und Probe bleibt konstant. Unebenheiten auf der Probe bewirken dann natürlich eine Änderung des Abstandes, also auch eine Veränderung des Stroms. Die Topographie der Probe ist im *Strombild* zu erkennen.
2. **Konstanter Strom:** Ein Regelkreis stellt den Z-Piezo ständig so nach, dass ein bestimmter, vorgegebener Strom fließt. So folgt die Spitze der Topographie der Probe. Die Topographie kann man nun darstellen, wenn man die Spannung abbildet, die den Scanner in Z-Richtung ansteuert.

## Tunnelspektroskopie

Bei der Tunnelspektroskopie wird die Spitze nicht bewegt. Sie befindet sich in einem konstanten Abstand zur Probe, während die Tunnelspannung  $U$  verändert wird. Jetzt hängt der Strom von der Dichte der unbesetzten elektronischen Zustände bis zur Energie  $eU$  in der Probe ab. Das macht die Tunnelspektroskopie zu einem mächtigen Instrument, wenn es darum geht die Elektronische Struktur von Metallen und Halbleitern zu untersuchen.



Energiediagramm für die Tunnelspektroskopie

## Vor- und Nachteile des Rastertunnelmikroskops

### Vorteile:

- Höchste Auflösung
- Zerstörungsfrei
- Topographie und elektronische Eigenschaften sind zugänglich
- Funktioniert an Luft und im UHV
- In-situ Untersuchungen sind möglich

### Nachteile:

- Nur für elektrisch leitende Proben
- Sehr empfindlich auf Umwelteinflüsse