

## Das Rastertunnelmikroskop

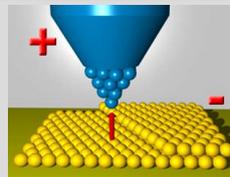
1

engl.: scanning tunneling microscope (kurz: STM)

Nobelpreis für Physik 1986

Heinrich Rohrer

Gerd Binnig



apl.Prof. Dr. D.J. As

## Grundlagen STM

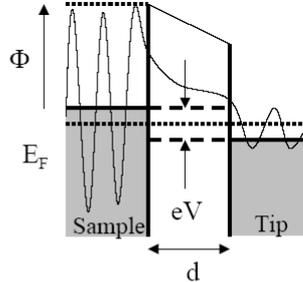
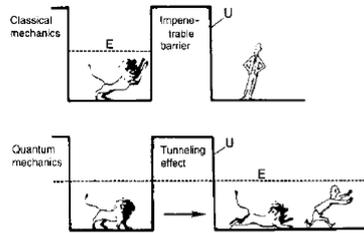
2

Das 1981 entwickelte Rastertunnelmikroskop (kurz: STM) stellt einen gewaltigen Fortschritt im Bereich der Mikroskopie dar, da es ein extrem hohes Auflösungsvermögen mit der Möglichkeit verbindet, Oberflächenstrukturen zerstörungsfrei abzutasten. Im Unterschied zu konventionellen Mikroskopietechniken wird hierbei nicht eine Strahlung analysiert, die von der Probe reflektiert oder gestreut wird bzw. diese durchdringt, sondern vielmehr wird die Oberfläche des zu untersuchenden Objekts mit einer Sonde berührungslos abgetastet. Durch dieses Vorgehen ist das räumliche Auflösungsvermögen des Mikroskops nicht mehr durch die Wellenlänge der verwendeten Strahlung begrenzt, sondern es lassen sich extrem kleine Strukturen bis hin zu einzelnen Atomen sichtbar machen.

Das Rastertunnelmikroskop hat ein Fenster zur Welt des Mikrokosmos geöffnet und viele neue Erkenntnisse und Anwendungen in der Metallurgie, Elektrochemie und Molekularbiologie erst ermöglicht. Für die Entwicklung dieses sensiblen Instruments erhielten Gerd Binnig und Heinrich Rohrer 1986 den Nobelpreis.

apl.Prof. Dr. D.J. As

Chen, C.J. In *Introduction to Scanning Tunneling Microscopy*; Oxford University Press: New York, 1993; p 3.



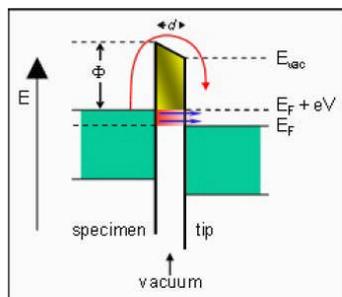
*Klassische Mechanik:*  $e^-$  kann Energiebarriere  $\Phi$  nicht überwinden, wenn  $E_F$  geringer ist

*Quantenmechanik:*  $e^-$  wird durch Wellenfunktion beschrieben, die im Isolator exponentiell abfällt

$$\Psi(d) = \Psi(0) \exp(-\kappa d) \quad \text{mit} \quad \kappa = \frac{\sqrt{2m(\Phi - E_F)}}{\hbar}$$

Tunnelwahrscheinlichkeit für  $e^-$        $W(d) = |\Psi(d)|^2 = |\Psi(0)|^2 \exp(-2\kappa d)$

$E_F$ : Fermienergie, höchster besetzter Zustand im Metall.  $\phi$  Austrittsarbeit des Metalls.



In STM wird eine geringe Spannung angelegt, um die Potentialbarriere effizienter zu überbrücken

Betrag der Potentialbarriere gegeben durch

$$\Phi = \frac{1}{2} (\Phi_{\text{Surface}} + \Phi_{\text{Tip}}) \quad \text{Metalle: } \Phi \approx 4\text{eV}$$

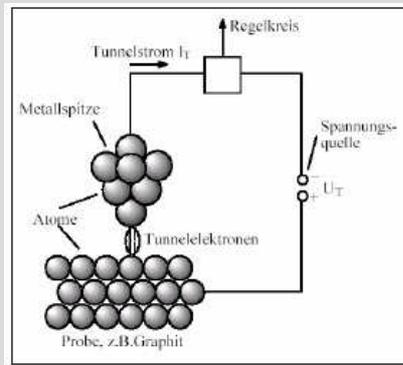
Wenn angelegte Spannung kleiner als  $\Phi$ :  $eV \ll \Phi$

$$\kappa \cong \sqrt{\frac{2m\Phi}{\hbar^2}} \quad \text{Näherungswert}$$

Der Tunnelstrom ist proportional zur Tunnelwahrscheinlichkeit  $W(d)$

Typische gemessene Stromstärken liegen zwischen 1 pA und 50 nA

Strom wird üblicherweise durch eine Feedback-Schleife konstant gehalten



Beim Rastertunnelmikroskop wird eine sehr feine Metallspitze extrem dicht an die Probenoberfläche herangeführt. Obwohl sich beide Körper nicht berühren, können Elektronen aufgrund des quantenmechanischen Tunneleffekts den Abstand zwischen Probe und Metallspitze „überspringen“. Wird zwischen beiden Körpern eine Spannung  $U_T$  angelegt, erhält diese Elektronenbewegung eine Vorzugsrichtung - ein *Tunnelstrom*  $I_T$  beginnt zu fließen. Die Größe dieses Stromes hängt sowohl vom Abstand zwischen Metallspitze und Probe als auch von der Elektronendichte an der untersuchten Stelle ab.

Auflösung:  $1\text{\AA}$  in lateraler,  $0,01\text{\AA}$  in axialer Richtung

**STM kann in UHV und Luft durchgeführt werden**

Spitze ist meistens ein chemisch geätzter oder mechanisch geschliffener Draht aus W, Pt, Ir

\* Die Spitze der Sonde besteht im Idealfall aus einem einzelnen Atom. Dies lässt sich durch spezielle Schneide- oder Ätztechniken erreichen. Der Abstand zwischen Probe und Sonde beträgt nur einige Nanometer, d.h. die Sonde gleitet im Abstand weniger Atomdurchmesser über die Probe.

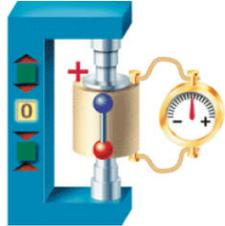
Quelle der Abbildung: <http://www.educeth.ch/physik/leitprog/atome/docs/kapitel1.pdf>

apl.Prof. Dr. D.J. As

Voraussetzung für das Zustandekommen des Tunnelstroms ist, dass die Probenoberfläche **elektrisch leitfähig** ist. Gegebenenfalls muss sie zuerst mit Gold bedampft werden, um eine hinreichende Leitfähigkeit sicherzustellen. Aber auch, wenn die Probe selbst ein elektrischer Leiter ist, ist eine dünne Goldbeschichtung oft sinnvoll, da viele Stoffe durch chemische Prozesse (z.B. Oxidation) zerstört werden können und sich ihre Oberflächenstruktur dementsprechend signifikant verändert. Gold hat eine viel gleichmäßigere Elektronenverteilung als z.B. Graphit, d.h. die Elektronendichte an der Oberfläche ist näherungsweise konstant. Daher lassen sich zwar einerseits einzelne Goldatome viel schwerer sichtbar machen als beim Graphit, andererseits lassen sich größere Strukturen leichter erkennen, da bei konstanter Elektronendichte die Größe des Tunnelstroms nur noch vom Abstand zwischen Abtastspitze und Probe abhängt. Während die von einem Rastertunnelmikroskop gelieferten Bilder von Graphitoberflächen also leicht missinterpretiert werden können, da hier sowohl Abstand als auch Elektronendichte variable Größen sind, ist die Deutung der Aufnahme einer Goldoberfläche viel einfacher: Die hellen und dunklen Bereiche zeigen hier, wie von den meisten Betrachtern intuitiv erwartet, Erhöhungen bzw. Vertiefungen in der Goldoberfläche an. Das gesamte Bild der Oberfläche entsteht beim Rastertunnelmikroskop nicht wie z.B. beim Lichtmikroskop „auf einmal“, sondern durch schrittweises „Abrastern“ der Probe. Hierzu ist eine sehr sensible Steuerung erforderlich, da die Sondenspitze hinreichend langsam und genau über die Probe gezogen werden muss.

Eine solch genaue Steuerung ist nur durch spezielle Bauteile möglich. Man verwendet hierzu Piezoelemente. Der piezoelektrische Effekt wurde 1880 von den Brüdern Jacques und Pierre Curie entdeckt. Werden bestimmte Kristalle, z. B. Quarz oder Turmalin, durch mechanische Kräfte geringfügig verformt, so entsteht eine elektrische Spannung, was gegebenenfalls einen kurzzeitigen Stromfluss zur Folge hat. Anwendung findet dies beispielsweise in elektronischen Feuerzeugen oder Gasanzündern. Dieser Effekt lässt sich aber auch umkehren: Wird an einen Piezokristall eine Spannung angelegt, so verformt sich dieser ein wenig. Die Größe der Verformung ist annähernd proportional zur angelegten Spannung. Auf diese Weise ist es ohne weiteres möglich, winzige Verschiebungen um Bruchteile eines Tausendstel Millimeters zu bewirken bzw. diese exakt zu messen.

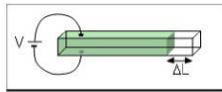
apl.Prof. Dr. D.J. As



SPM Scanner werden aus einem piezoelektrischen Material gefertigt, das sich bei Anlegen einer äußeren Spannung senkrecht zum Feld ausdehnt oder kontrahiert.

Die Polarität der Spannung entscheidet über Ausdehnung oder Kontraktion. AC Spannungen liegen dabei im Bereich +220 bis -220V.

Piezos sind SCHNELL!



0 V  
Ohne Spannung

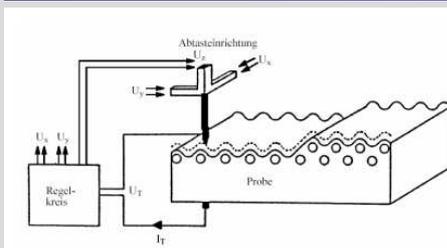
- V  
Ausgedehnt

+ V  
Kontrahiert

- In vielen AFM-Varianten bewegen die Piezoscanner die Probe. In anderen werden sie für die Bewegung des Cantilevers eingesetzt, während die Probe stationär bleibt.
- AC Signale an den leitenden Oberflächen des Piezokristalls sorgen für eine Bewegung in alle drei Raumrichtungen.

apl.Prof. Dr. D.J. As

## Aufbau

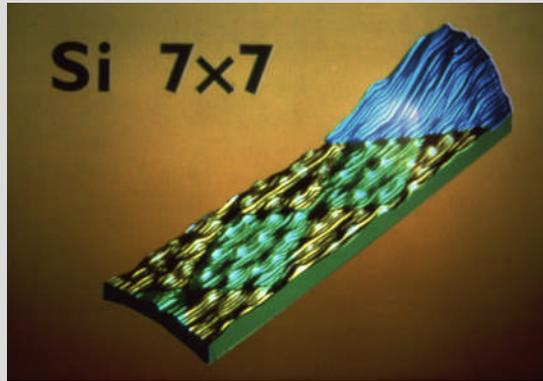


Zur Steuerung der Messsonde gibt es für jede Raumkoordinate ein Piezosystem:

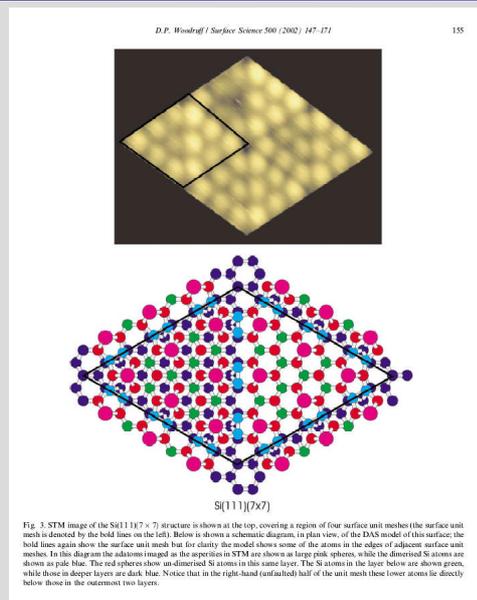
1. In x-Richtung oszilliert die angelegte Spannung, d.h. der entsprechende Piezokristall dehnt sich abwechselnd aus bzw. zieht sich zusammen und bewegt damit die Sonde hin und her.
2. In y-Richtung wird die Spannung stetig vergrößert, der Kristall dehnt sich aus und bewegt die Sonde in y-Richtung langsam über die Probe.
3. In z-Richtung erfolgt die Messung des Tunnelstroms. Wenn die Probenoberfläche exakt eben ist, bleibt sein Wert konstant, bei Unebenheiten hingegen ändert sich der Tunnelstrom deutlich. Dies wird vom Regelkreis registriert und die Spannung  $U_T$  wird entsprechend nachgeregelt, so dass der Tunnelstrom wieder auf seinen alten Wert zurückgeführt wird. Die Höhe dieser „Nachregelung“ ist ein Maß für die Beschaffenheit der Probenoberfläche. Auf diese Weise können sehr kleine Strukturen, z.B. die Bits einer CD, sichtbar gemacht werden.



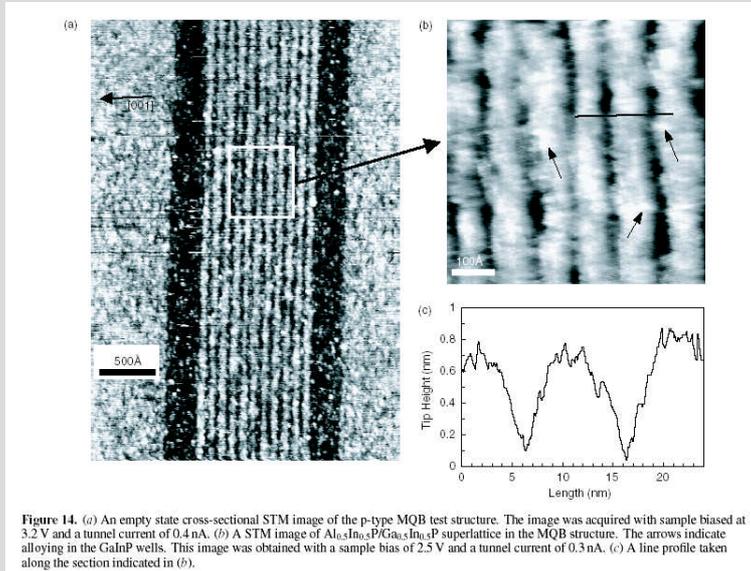
apl.Prof. Dr. D.J. As



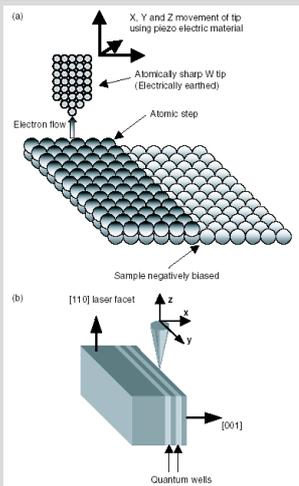
apl.Prof. Dr. D.J. As



apl.Prof. Dr. D.J. As

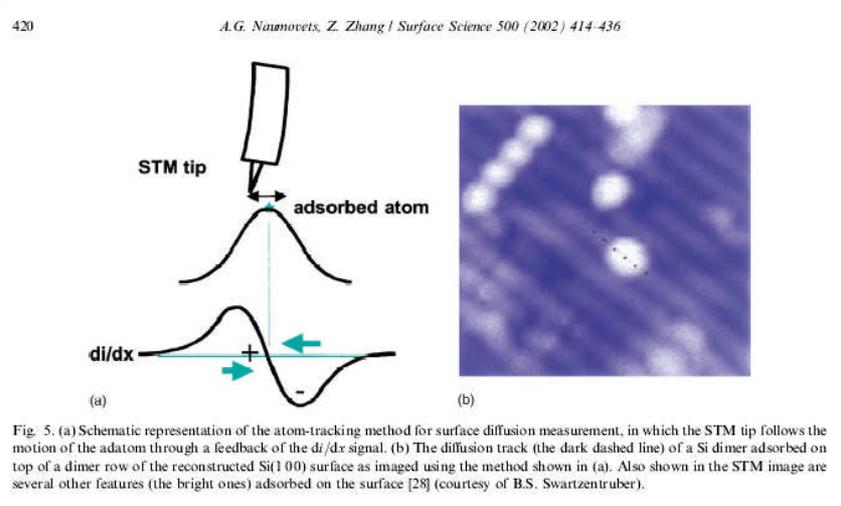


apl.Prof. Dr. D.J. As

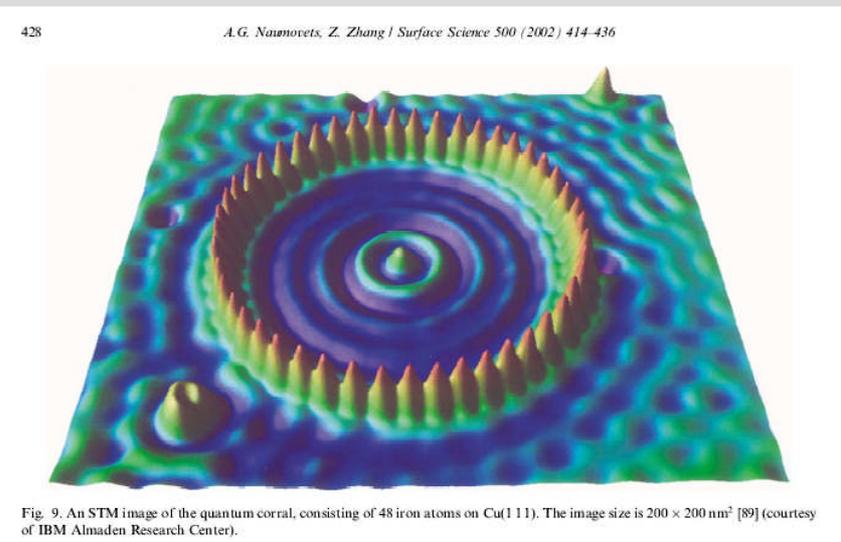


**Figure 2.** (a) Schematic of a typical planar STM setup where the tip operates in a constant-current mode. The tip will follow the undulations in surface charge to maintain the current by moving closer to or further away from the sample surface to provide a topographic image. The negative sample bias causes electrons to flow from the sample to the tip. Hence the tip is probing the full valence band states of the sample. (b) A schematic diagram illustrating cross-sectional STM with the tip over the epilayer region at one edge of the cleaved (110) laser facet.

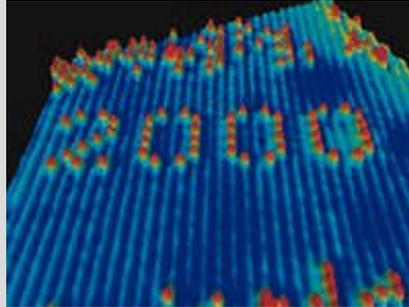
apl.Prof. Dr. D.J. As



apl.Prof. Dr. D.J. As



apl.Prof. Dr. D.J. As



Das Millennium lässt grüßen: Einzelne Kohlenmonoxid-Moleküle, die mit Hilfe eines STM auf einem Metallsubstrat arrangiert wurden. Die "Zebrastrreifen" sind einzelne Atomreihen.  
(Quelle: Institut für Experimentalphysik der FU Berlin)

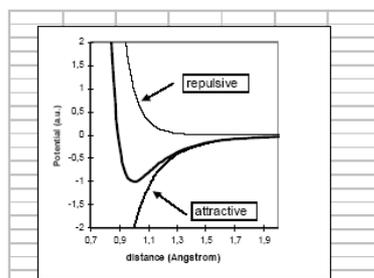
apl.Prof. Dr. D.J. As

Vergleich von AFM und STM:

- Laterale Auflösung beim AFM besser, axiale Auflösung beim STM
- Kraft-Abstands-Beziehung beim AFM sehr viel komplexer
- STM kann nur auf leitende Proben angewendet werden

Wenn keine anderen externen Kräfte wirken, kann die Kraft durch atomare Interaktionspotentiale beschrieben werden

**Lennard-Jones-Potential:**  $W(d) = \frac{C_1}{d^{12}} + \frac{C_2}{d^6}$       d: Abstand  
C<sub>1</sub>, C<sub>2</sub>: Konstanten



Abstoßende WW  $\propto \frac{1}{d^{12}}$

**Ionische oder Pauli-Abstoßung**

Für Abstände unterhalb 2 Å

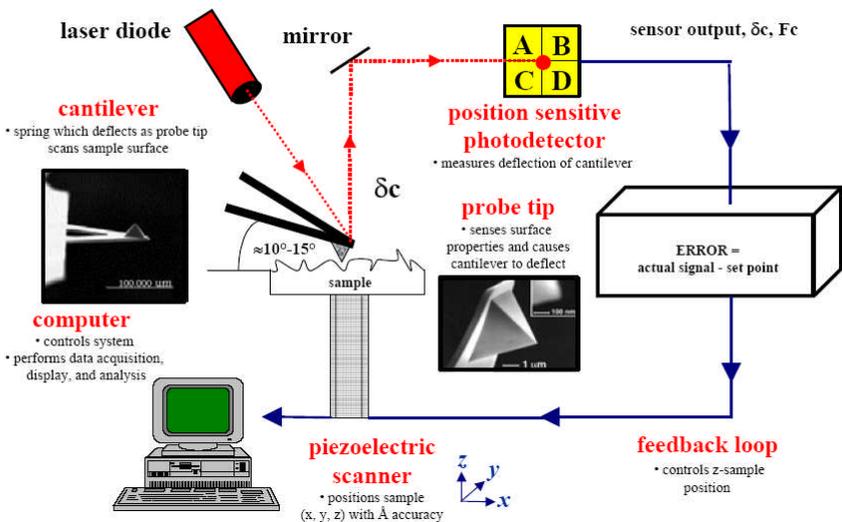
Für Abstände >2 Å überwiegen anziehende **Van der Waals-Kräfte** zwischen Probe und Spitze (induzierte Dipol-Wechselwirkung)

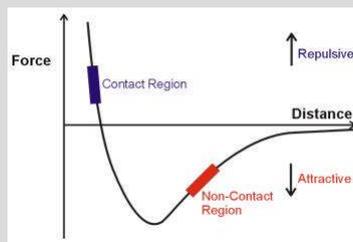
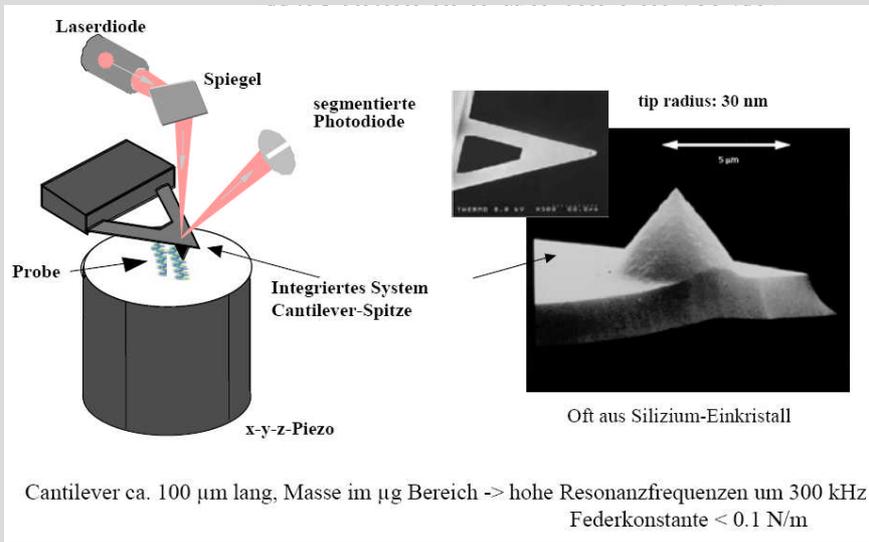
Langreichweitige (2-100 Å) **Dispersionskräfte**

apl.Prof. Dr. D.J. As

- **Chemische Kräfte**
  - a) kovalente: Überlapp der Elektronenwolken
  - b) Coulomb-Wechselwirkung (Ionenbindung)

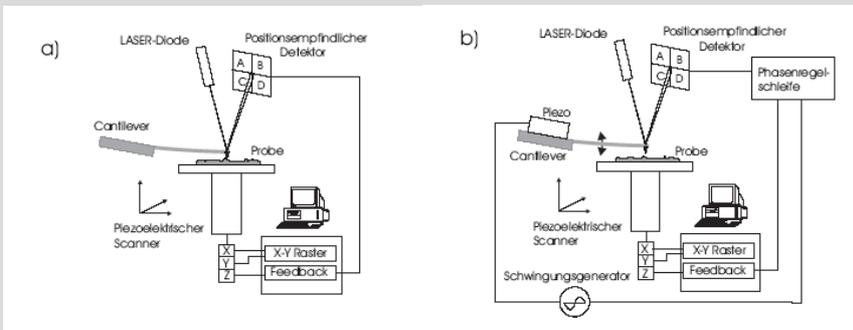
**Quantennatur, sehr stark, kurzreichweitig**
- **Elektrostatische Kräfte**  
Zwischen geladenen Molekülen; **starke langreichweitige Kräfte**
- **Magnetische Kräfte**  
Zwischen Molekülen mit magnetischen Momenten. **Langreichweitig, schwach**
- **Oberflächenspannung (kapillare Kondensation)**  
durch Feuchtigkeit und Adsorbate. **Stark, langreichweitig**
- **Wasserstoffbrückenbindung**  
H kovalent gebunden an O, F, Cl or N wird **polarisiert (+)** durch nahegelegene O, F, Cl or N
- **Van der Waals Kräfte**  
**Dipolkräfte, anziehend, langreichweitig**





Kontakt AFM

Non-Kontakt AFM



Die Spitze kontaktiert die Probe direkt oder durch einen Flüssigkeitsfilm

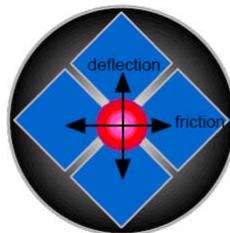
Auflagekräfte zwischen nN und  $\mu\text{N}$  in Luft, weniger als 0.1 nN in Flüssigkeiten

In Luft oft Ausbildung von Wasserstoffbrücken zwischen kondensierten Wassermolekülen -> Meniskuskräfte bis  $10^{-7}$  N!

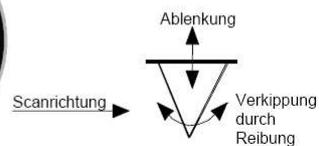
Starke Abstoßung der Frontatome, weiter entfernte Atome erfahren van der Waals-Anziehung

Während die Spitze über die Oberfläche geführt wird, kann ein Feedback-Mechanismus durch vertikale Bewegung der Probe eine konstante Cantilever-Ablenkung, und damit Kraft, aufrechterhalten

“constant height mode”  
 (kein z-Feedback)  
 + schnell  
 + für flache Proben  
 + Auflösung  
 - hohe Reibungskräfte

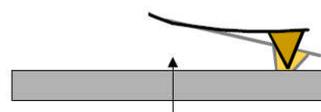


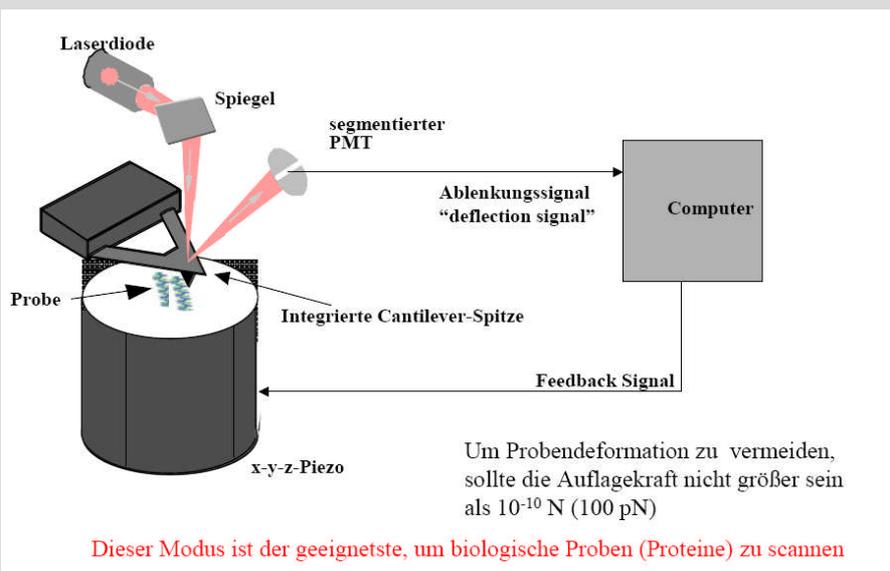
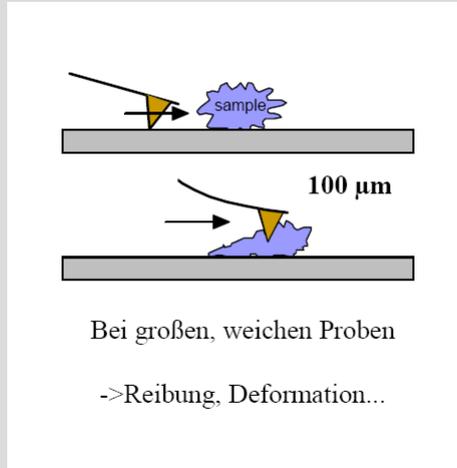
Reibungs-  
 (friction)Imaging

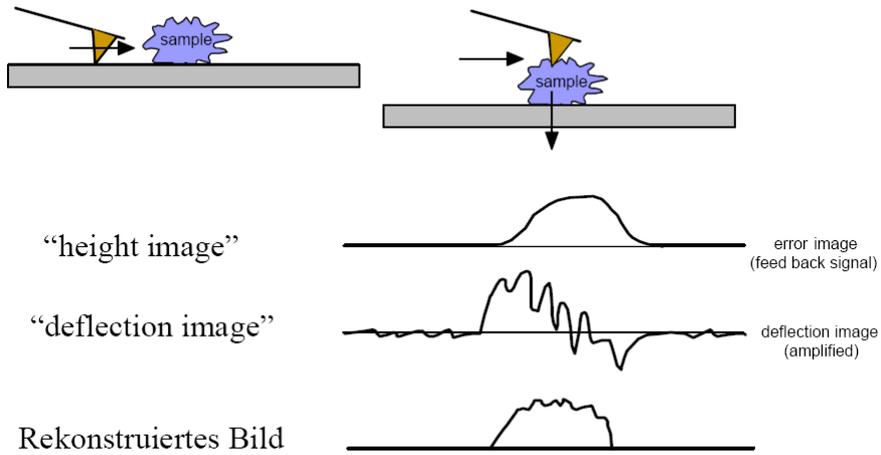


“constant deflection mode”  
 (mit z-Feedback)  
 - langsamer  
 + für rauhe Proben  
 - Auflösung  
 + geringe Scherkräfte

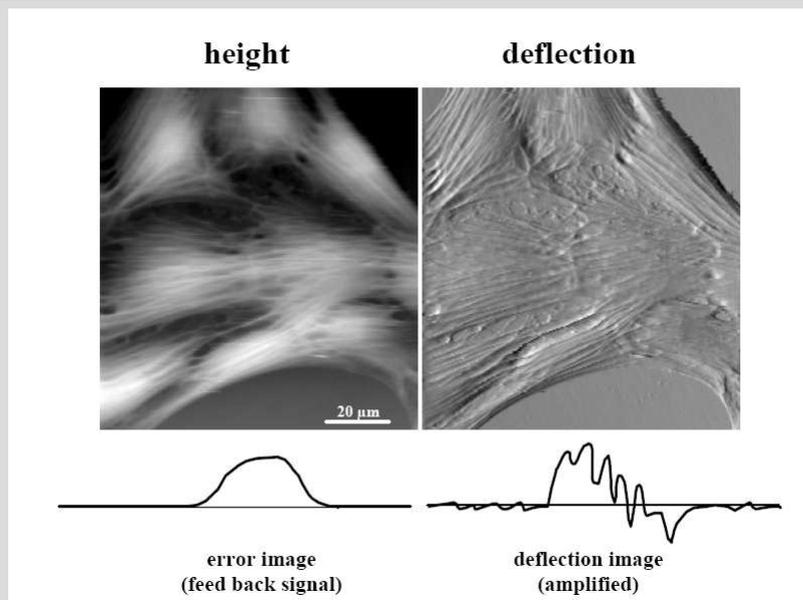
“force modulation mapping”  
 Detektion lokaler Elastizität



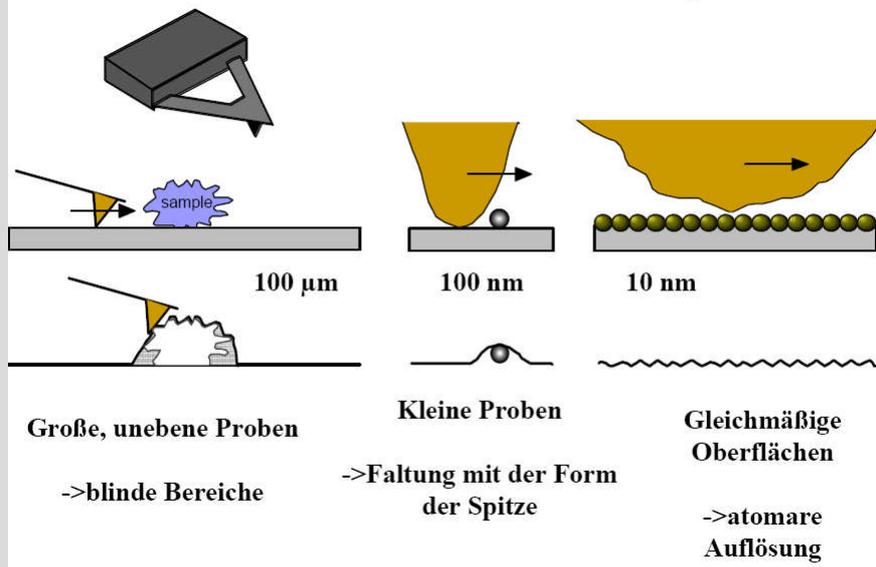




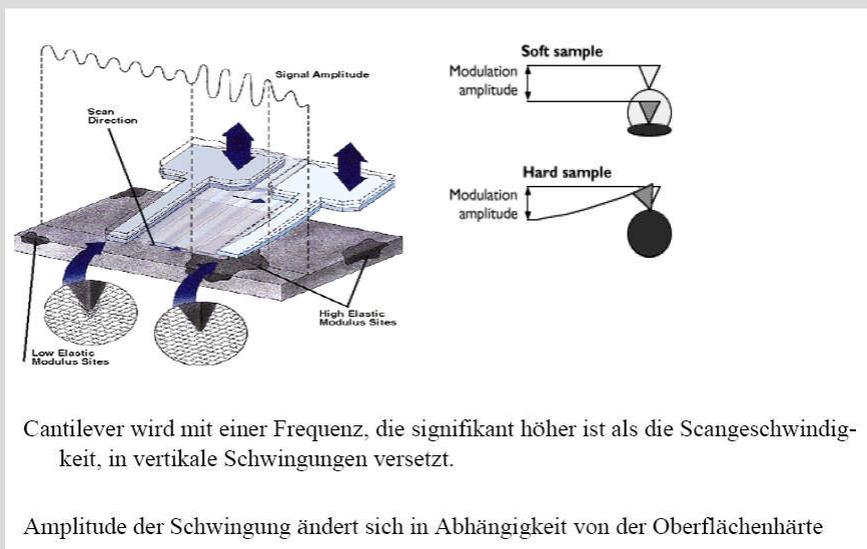
apl.Prof. Dr. D.J. As



apl.Prof. Dr. D.J. As



apl.Prof. Dr. D.J. As



apl.Prof. Dr. D.J. As

Cantilever wird im Abstand 1-40 nm über die Probe geführt  
 Cantilever wird durch ein zusätzliches Piezoelement etwas oberhalb seiner Resonanzfrequenz in vertikale Schwingungen versetzt  
 Schwingungsamplitude < 10nm  
 Spitze berührt die Oberfläche nicht. Stattdessen oszilliert sie oberhalb der adsorbierten Flüssigkeitsschicht.  
 Die Resonanzfrequenz  $\Omega_0$  des Cantilevers erniedrigt sich durch die *van der Waals* Kräfte im Bereich von 1-10 nm oberhalb der adsorbierten Flüssigkeitslage.  
 Änderung von  $\Omega_0$  nach  $\Omega$  ändert die Schwingungsamplitude  $\Delta z$

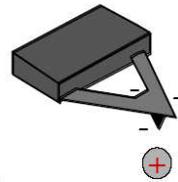
$$\Omega_0 = \sqrt{\frac{k + \frac{d^2 U}{dz^2}}{m_{\text{eff}}}}$$

Resonanzfrequenz, mit  $k$ : Federkonstante  
 $m_{\text{eff}}$ : effektive Masse  
 $U$ : VdW Potential

$$\Delta z = \Delta z_0 \frac{\Omega_0}{\sqrt{(\Omega^2 - \Omega_0^2) + \frac{\Omega^2}{Q^2}}}$$

Schwingungsamplitude,  $Q$ : Qualitätsfaktor

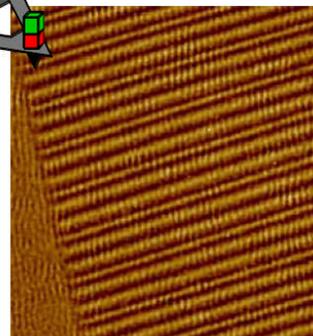
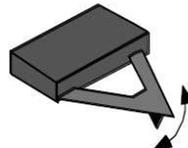
“electrostatic imaging”



“magnetic imaging”



(“tapping mode”)  
intermittent contact



Besonders attraktiv für weiche Oberflächen, insbesondere biologische Proben  
 Cantilever und Spitze werden nahe der Resonanzfrequenz zum Schwingen gebracht,  
 und dabei über die Oberfläche gescannt.

Im Gegensatz zum "non contact mode" berührt die Spitze die Oberfläche  
 zwischendurch leicht ("intermittent contact")

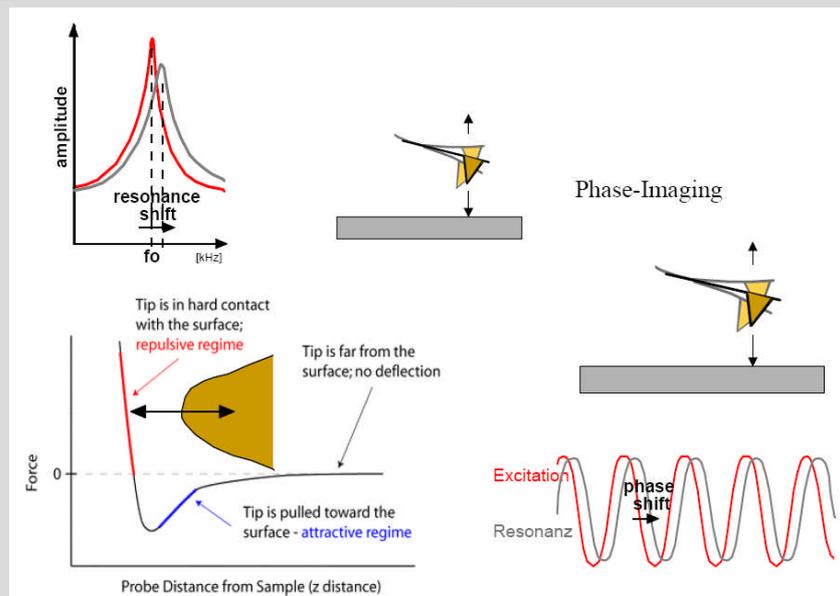
Eine (große) konstante Schwingungsamplitude (und daraus resultierend eine konstante  
 Interaktion zwischen Spitze und Oberfläche) wird während des Scans beibehalten.  
 Typische Amplituden im Bereich 20-100nm.

Kräfte sind typischerweise 200 pN oder darunter

Schwingungsamplitude ändert sich, wenn Spitze Erhebungen oder Vertiefungen  
 registriert.

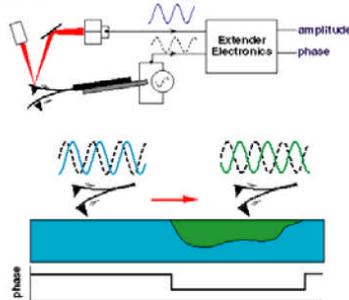
Keine laterale Reibung, da es nur sehr kurze Interaktionsintervalle zwischen Spitze und  
 Oberfläche gibt.

Problematisch in Wasser oder wässriger Lösung, da Oszillationen gedämpft werden.  
 Vorsichtige Korrekturen erforderlich.



### Zugänglich über den "Tapping Mode"

Kantilever wird nahe der Resonanzfrequenz zum Schwingen gebracht. Die Amplitude wird als Feedback-Signal genutzt. Phasenverschiebung ist abhängig von Oberflächeneigenschaften wie Zusammensetzung, Adhäsion, Reibung und viskoelastischen Eigenschaften.



- Identifikation zweiphasiger Strukturen in Polymermischungen
- Identifikation von Oberflächenkontaminationen, die im Höhenbild nicht zu sehen sind
- Geringere Schädigung an weichen Proben als mit "lateral force microscopy"

apl.Prof. Dr. D.J. As

Spezielle AFM-Spitzen erforderlich. Diese werden magnetisiert durch "sputter coating" mit ferromagnetischen Materialien.

Der Cantilever wird nahe der Resonanzfrequenz in Schwingungen versetzt (ca. 100 kHz).

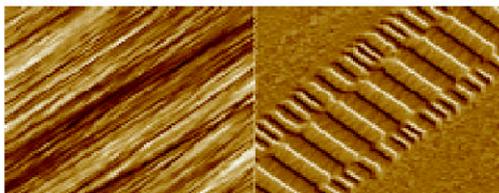
Die Spitze oszilliert 0.01 bis 0.1 nm über der Oberfläche

Gradienten in der magnetischen Kraft auf die Spitze verschieben die Resonanzfrequenz des Cantilevers.

Durch Aufnahme dieser Verschiebung in Schwingungsamplitude und Phase kann ein magnetisches Kraftbild aufgenommen werden

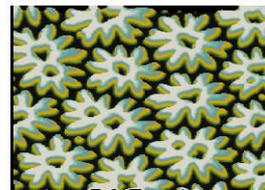
Anwendungen v.a. in der Datenspeicherungstechnologie

Überschriebene Tracks auf einer Hard Disk, 25  $\mu\text{m}$  scan



Image/photo taken with NanoScope® SPM, courtesy Digital Instruments, Santa Barbara, CA

Domänen in einem 80  $\mu\text{m}$  Granatfilm



apl.Prof. Dr. D.J. As

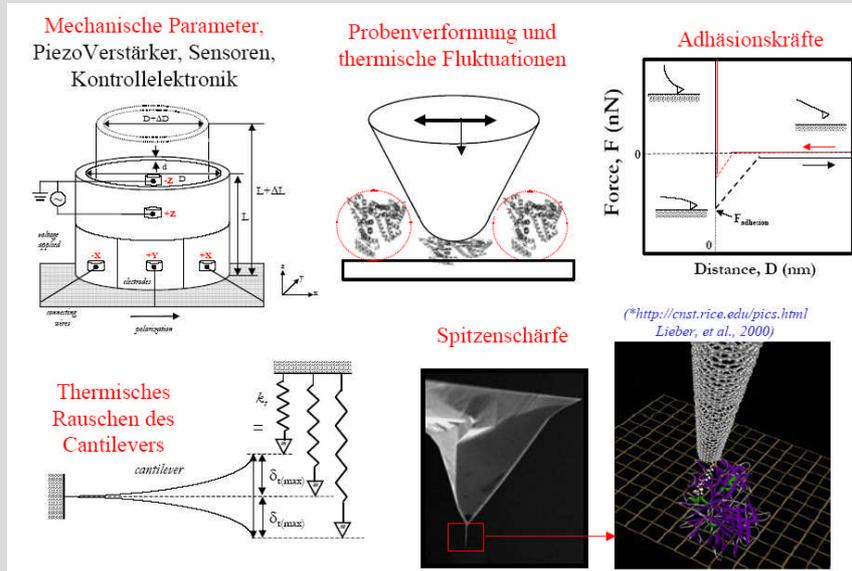
“contact modes”	Scanning Force Microscopy (SFM)	-> Oberflächentopologie
	Lateral Force Microscopy (LFM)	-> Reibung & Adhäsion
	Scanning Spreading Resistance Microscopy (SSRM)	-> Reibungswiderstand
	Pulsed Force Microscopy (PFM)	-> Elastizität (harter Proben)
	Force Modulation Microscopy (FMM)	-> Elastizität generell
“non contact modes”	Tapping Mode (TM) & Phase Imaging	-> Oberflächenpotentiale
	Electrostatic Force Microscopy (EFM)	-> Oberflächenladung
	Magnetic Force Microscopy (MFM)	-> lokale magnetische Momente

## “Contact Mode”

- Vorteile:
  - Hohe Scangeschwindigkeiten
  - Einziger Modus, mit dem “atomare Auflösung” erreicht werden kann
  - Leichteres Scannen bei extremen Topologieunterschieden
- Nachteile:
  - Laterale Scherkräfte können die Abbildung verzerren
  - In Luft können bei Kondensation hohe Kapillarkräfte entstehen
  - Kombination von lateralen und axialen Kräften kann zur reduzierten räumlichen Auflösung führen und weiche Proben zerstören

## “TappingMode” AFM

- Vorteile:
  - Höhere laterale Auflösung in den meisten Proben (1 bis 5nm)
  - Kleinere Kräfte und geringere Schädigung weicher Substanzen in Luft
  - Praktische keine lateralen Kräfte
- Nachteile:
  - Deutlich geringere Scangeschwindigkeiten als bei “contact mode” AFM



apl.Prof. Dr. D.J. As

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.

Einige dieser Mikroskopiemethoden werden im folgenden kurz erläutert:

- Tapping Mode (TM)
- Force Modulation Microscopy (FMM)
- Pulsed Force Microscopy (PFM)
- Phase Imaging
- Lateral Force Microscopy (LFM)
- Electrostatic Force Microscopy (EFM)
- Magnetic Force Microscopy (MFM)
- Scanning Spreading Resistance Microscopy (SSRM)
- Scanning Capacitance Microscopy (SCM)
- Surface Potential Microscopy
- Force-Distance Measurements

Desweiteren können mit dem AFM auch Strukturierungen von Oberflächen vorgenommen werden:

- Nanoindenting and Scratching
- Field induced Nanooxidation
- Field induced Intercalations and Deintercalations

apl.Prof. Dr. D.J. As

C.J. Chen, Introduction to Scanning Tunneling Microscopy, Oxford University Press, New York, 1993.

H.J.Güntherodt, R. Wiesendanger, Scanning Tunneling Microscopy I-III, Springer Verlag, Berlin, 1991.

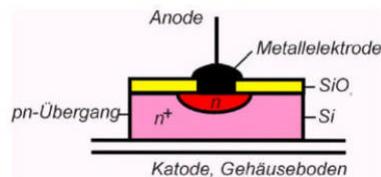
J.A. Stroscio, W.J. Kaiser, Scanning Tunneling Microscopy, Academic Press, San Diego, 1993.

C. Bai, Scanning Tunneling Microscopy and its Application, Springer Verlag, Berlin, 1992.

R. Wiesendanger, Scanning Probe Microscopy and Spectroscopy, Cambridge University Press, 1994

## Energiedissipation ballistisch injizierter Elektronen

### Schottky-Diode



- BEEM gibt Informationen über Inhomogenität der Grenzfläche
- Lateraler Auflösung bis zu  $10\text{\AA}$  ist möglich
  - ∴ Positionierung durch STM
- Spektroskopie an der Schottky-Barriere möglich (BEES)
- Energieauflösung =  $0,01\text{eV}$

- Strom durch einen Metall / n-typ Halbleiter Kontakt



- Der Strom  $I(T, A, \Phi_B, V)$  durch einen Metall / n-typ Halbleiter ist gegeben durch

$$I \approx \frac{4m_s^2 e (k_B T)^2 A}{h^3} e^{-\frac{\Phi_B}{k_B T}} \left[ e^{\frac{eV}{k_B T}} - 1 \right]$$

mit

- $T$  = Temperatur,
- $\Phi_B$  = Höhe der Schottky-Barriere,
- $A$  = Fläche des Kontakts,
- $V$  = angelegte Spannung.

E.H. Rhoderick and R.H. Williams, Metal-Semiconductor Contacts, (Clarendon Press, Oxford, 1988)

apl.Prof. Dr. D.J. As

#### Bisher :

- Untersuchung der Schottky – Barriere auf makroskopischer Skala ( $\mu\text{m}$ )
- z.B. LEED , EELS , AES , PES
- Problem:  
Mittelung der Barriere über die ganze Kontaktfläche

#### Idee:

- Nutzung der Vorteile von STM oder STS  
? atomare Auflösung.
- Problem: Oberflächensensitiv

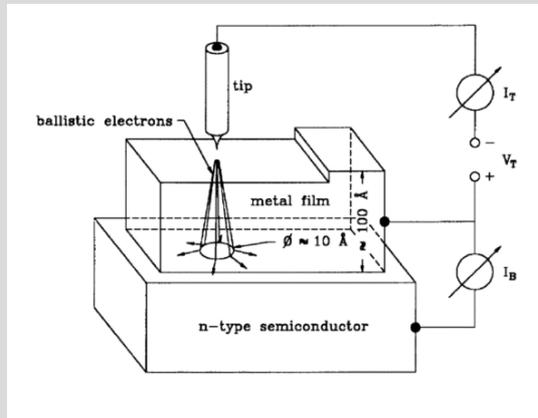
Hohe räumliche Auflösung des STM's

Informationen über Grenzflächen trotz Bedeckungen  
von bis zu  $100\text{\AA}$

**BEEM**

apl.Prof. Dr. D.J. As

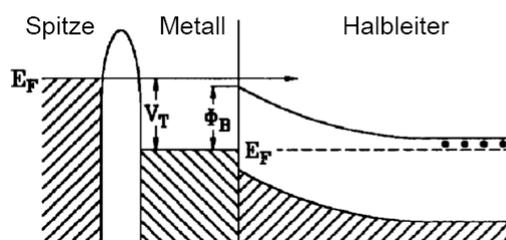
M. Prietsch, Physics Reports 253 (1995), 163-233



- $I_T$  = Tunnelstrom
- $V_T$  = Tunnelspannung
- Injektion von  $e^-$  durch die Tunnelspitze
- Freie Weglänge der  $e^-$   $\sim 10 \text{ \AA}$
- ?  $I_B$  = BEEM-Strom
- Separate Kontaktierung von Metall und Halbleiter notwendig.

- $I_T = 1000 \text{ pA}$ ,  $I_B = 10 \text{ pA}$
- Abschwächung von  $I_T$  um Faktor 100
- BEEM-Strom ist gering, Rauschlevel kleiner  $1 \text{ pA}$
- Stabilität der Spitze zur lateralen Auflösung

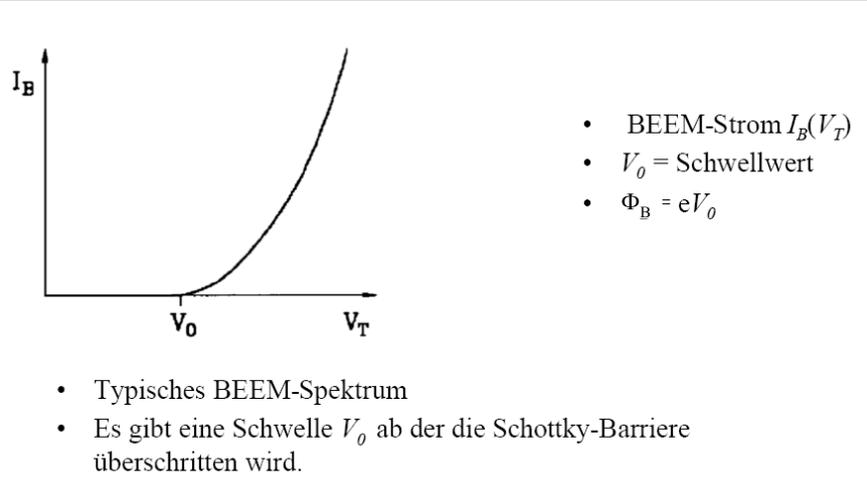
apl.Prof. Dr. D.J. As



- $E_F$  = Fermienergie
- $\Phi_B$  = Schottky - Barriere
- $V_T$  = Tunnelspannung

- $e^-$  tunneln durch die Vakuumbarriere
- Energie der  $e^-$  im Leitungsband des Metalls ist durch  $V_T$  gegeben
- Eindringen in den Halbleiter nach Überwinden von  $\Phi_B$

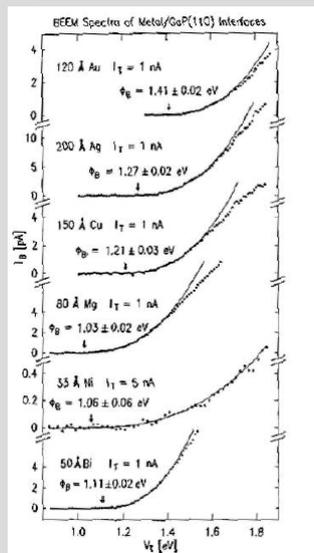
apl.Prof. Dr. D.J. As



apl.Prof. Dr. D.J. As

M. Prietsch, Physics Reports 253 (1995), 163-233

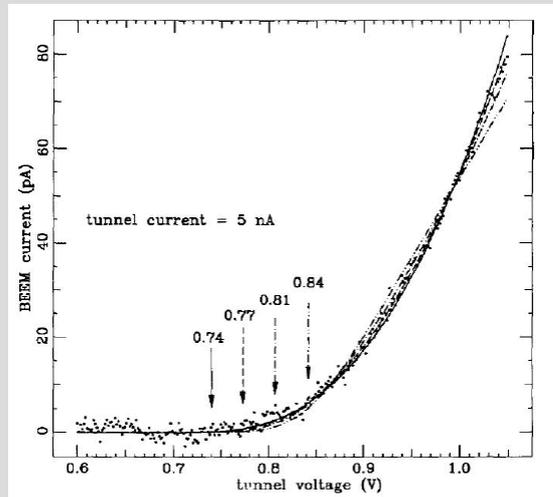
P. Niedermann, L. Quattropani, K. Solt, A.D. Kent, J. Vac. Sci. Technol. B10 (1992) 580



- Abhängigkeit von  $V_0$  von dem aufgetragenen Metall
- Abhängigkeit der Schwelle  $V_0$  von der Filmdicke (PtSi/n-Si(001))
- Bei gleicher Probe Abhängigkeit von  $V_0$  von der Präparation

apl.Prof. Dr. D.J. As

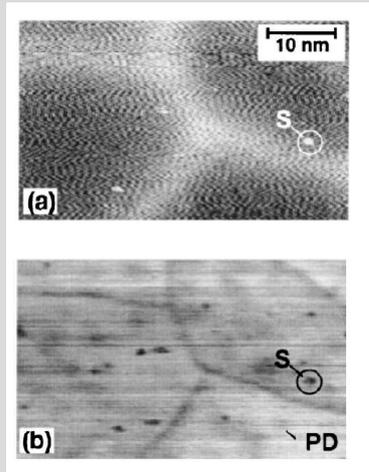
M.T. Cuberes, A. Bauer, H.J. Wen, D. Vandré, M. Prietsch and G. Kaindl,  
J. Vac. Sci. Technol. B12 (1994) 2422



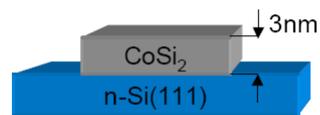
- Au/n-Si(111)  
Au-Film = 40 Å
- $V_0$  schwankt um  
~ 0,06 eV
- Schwelle  $V_0$  ist nicht  
eindeutig.

apl.Prof. Dr. D.J. As

T. Meyer, D. Migas, L. Miglio, and H. von Känel, Phys. Rev. Lett. 85, (2000) 7



- CoSi<sub>2</sub>/p-Si(111)



- $V_T = +1,5V$ ,  $I_T = 20nA$

- $I_B = 240pA$
- $F_p = 0,5 \pm 0,03eV$
- Defekte sichtbar

apl.Prof. Dr. D.J. As

- $e^-$  werden in einen Metall / Halbleiter Kontakt injiziert
  - Der größte Anteil der Elektronen wird dabei im Metall gestreut
  - Ein kleiner Teil durchläuft die Schicht ohne Energieverlust ?  $I_B$
  - BEEM eignet sich zur Spektroskopie der Schottky-Barriere
  - BEEM eignet sich zur Untersuchung der Grenzschicht
- 
- Welche Prozesse führen auf mikroskopischer Skala zum Energieverlust ballistisch injizierter  $e^-$  ?
  - Ballistisch injizierte  $e^-$  sind sensitiv auf weitere Verlustmechanismen
  - Winkelabhängigkeit der injizierten  $e^-$
  - Streuung  $S$  ?  $S(E, r)$  der  $e^-$
  - Informationen über Transporteigenschaften heißer  $e^-$
  - Epitaktisches Wachstum ? Schottky-Barriere beeinflussen