

Ausarbeitung zum Vortrag im Hauptseminar der Experimentalphysik  
"Nobelpreis-Experimente der letzten 50 Jahre", SS 2005  
Universität Duisburg-Essen, Campus Duisburg

# **Das Elektronen- und das Rastertunnelmikroskop**

(E. Ruska, G. K. Binnig, H. Rohrer 1986)

Nadine van der Schoot  
09.06.2005

# Inhalt

## Das Durchstrahlungsmikroskop (TEM)

- Ernst Ruska
- Optisches Auflösungsvermögen
- Elektronenwellen
- Magnetische Linsen
- Erstes Elektronenmikroskop
- Aufbau des Durchstrahlungsmikroskops
- TEM (Apparatur 1938)
- Thermische Kathoden
- Feldemissionskathode (FEG)
- Polschuhlinse Linsenfehler
- Sphärische Aberration (Öffnungsfehler)
- Beugungsfehler
- Auflösungsvermögen
- Abbildungsmoden
- Bragg-Reflexion
- Beugungsbilder
- Hellfeldbilder (Ruska 1931-1935)
- Hellfeldbilder (aufgenommen mit einem modernen TEM)
- Modernes Elektronenmikroskop HRTEM (high resolution TEM)
- Ausblick: UHRTEM (ultra high resolution TEM)

## Das Rastertunnelmikroskop (STM)

- Heinrich Rohrer, Gerd Binnig
- Tunneleffekt
- Grundidee
- Tunnelstrom
- Steuerung der Spitze
- Constant Height Mode
- Constant Current Mode
- Tunnelspitzen
- Rastertunnelmikroskop 1981
- Erste STM-Bilder (1981)
- 7x7-Struktur Si(111) (heute)
- Beetle-STM
- Nanomanipulation
- Rastersondenverfahren

## Quellen- und Literaturverzeichnis

# Das Durchstrahlungsmikroskop (TEM)

## Ernst Ruska

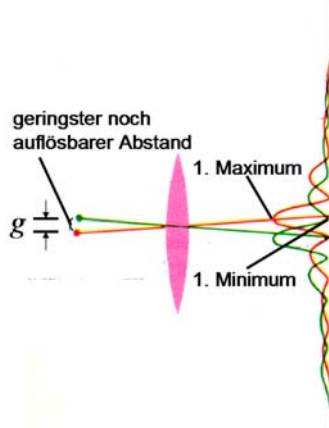


**Abb.1: Ernst Ruska**

Ernst Ruska wurde am 25.12.1906 in Heidelberg geboren. 1925 begann er sein Studium der Elektrotechnik an der technischen Hochschule in München. Nach der Absolvierung seines Vorexamens setzte er sein Studium in Berlin fort. Seine 1929 der Fakultät für Elektrotechnik eingereichte Studienarbeit enthält zahlreiche mittels der kurzen Spule (magnetische Elektronenlinse) aufgenommene, scharfe und vergrößerte Bilder: Die ersten festgehaltenen elektronenoptischen Abbildungen. Anfang 1931 schloss er sein Studium zum Diplom-Ingenieur ab. Nachdem er schon in seiner Studienarbeit gezeigt hatte, dass man mittels der kurzen Spule scharfe und auch vergrößerte Bilder erhalten kann, gelang ihm im Rahmen seiner Doktorarbeit die weitere Vergrößerung mit zwei Abbildungsstufen. Diese im April 1931 benutzte Apparatur aus zwei kurzen Spulen gilt heute als erstes Elektronenmikroskop. Als nächstes war zu zeigen, dass man eine bessere Auflösung erreichen kann als die des Lichtmikroskops. Dies gelang mit Hilfe der Polschuhlinse, die Ernst Ruska ebenfalls im Rahmen seiner Doktorarbeit entwickelte. 1986 bekam er den Nobelpreis in Physik für seine fundamentalen elektronenoptischen Arbeiten und die Konstruktion des ersten Elektronenmikroskops. Schon zwei Jahre später am 27.05.1988 starb er im Alter von 81 Jahren.

## Optisches Auflösungsvermögen

Warum war es überhaupt erstrebenswert, ein Elektronenmikroskop zu konstruieren. Der Grund ist das begrenzte Auflösungsvermögen des Lichtmikroskops. Die Begrenzung des Auflösungsvermögens beruht auf der Wellennatur des abbildenden Lichtes (Beugungserscheinungen).



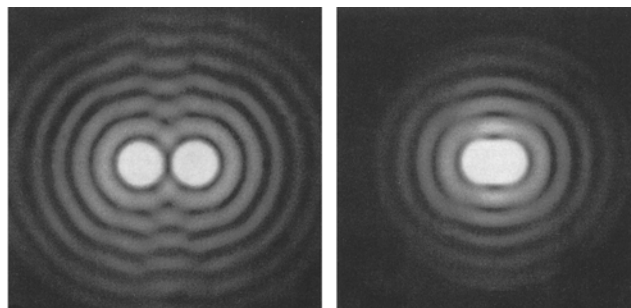
**Abb.2: Rayleigh-Kriterium (Schema)**

Das Rayleigh-Kriterium lautet: Zwei Punkt-Lichtquellen können gerade noch unterschieden werden, wenn das zentrale Maximum des Beugungsscheibchen der einen Quelle mit dem ersten Minimum der anderen Quelle zusammenfällt.

Das Auflösungsvermögen ist definiert als Abstand  $g$  gerade noch trennbarer Objektdetails.

$$g = \frac{0,61 \cdot \lambda}{\sin \alpha}$$

Um ein möglichst gutes Auflösungsvermögen (kleines  $g$ ) zu erreichen, muss man den Öffnungswinkel  $\alpha$  (allgemein: die numerische Apertur) möglichst groß und die Wellenlänge  $\lambda$  möglichst klein wählen.



**Abb.3: Beugungsscheibchen**

Diese beiden Abbildungen zeigen zwei Beugungsscheibchen. Links sind sie getrennt, d.h. aufgelöst. Rechts verschmelzen die Beugungsscheibchen zu einem Punkt, sie sind nicht aufgelöst.

Da die Wellenlänge des sichtbaren Lichtes ungefähr 400-600nm groß ist, erwarten wir die Grenzen des Auflösungsvermögens im  $\mu\text{m}$ -Bereich.

## Elektronenwellen

Bei den Elektronenwellen ist die Wellenlänge abhängig von der Beschleunigungsspannung.

$$\lambda \approx \frac{h}{\sqrt{2 \cdot m \cdot e \cdot U}}$$

Je größer die Beschleunigungsspannung, desto kleiner die Wellenlänge. Bei einer Beschleunigungsspannung von 200kV ergibt sich eine Wellenlänge von  $0,027 \text{ \AA} = 0,0027 \text{ nm}$ .

Diese Wellenlänge ist also um fünf Zehnerpotenzen kleiner als die des sichtbaren Lichtes. Die theoretische Auflösung des Elektronenmikroskops wäre damit um ein Vielfaches höher als die des Lichtmikroskops. Allerdings wird das Auflösungsvermögen (wie weiter unten diskutiert) durch Linsenfehler begrenzt.

Ernst Ruska und seine Mitarbeiter wussten als Ingenieure damals allerdings nichts von dieser These der Materiewellen, die bereits einige Jahre zuvor von de Broglie aufgestellt worden war. Sie hofften zunächst einfach auf die äußerst geringen Abmessungen der Elektronen. Als Ruska im Sommer 1931 erstmals von dieser neuen These hörte, war er zunächst enttäuscht, dass nun auch beim Elektronenmikroskop die Auflösung wiederum durch eine Wellenlänge begrenzt sein könnte.

## Magnetische Linsen

Um einen Elektronenstrahl abzulenken, kann man magnetische oder elektrostatische Linsen verwenden. Dass Ruska sich für magnetische Linsen entschied, war zunächst Zufall. Die bevorzugten Linsen in der Elektronenmikroskopie sind auch heute noch die magnetischen Linsen.

Die ablenkende Kraft bei magnetischen Linsen, ist die Lorentz-Kraft

$$\mathbf{F} = -e (\mathbf{v} \times \mathbf{B})$$

Die Kraft wirkt also senkrecht zur Flugrichtung des Elektrons und senkrecht zum Magnetfeld. Die Elektronen werden dadurch zur optischen Achse hin abgelenkt.

Ein wichtiger Unterschied zur optischen Linse ist, dass der Ort der Linse fest ist, aber nicht die Brennweite. Eine große Vergrößerung (kurze Brennweite), wird durch hohe magnetische Feldstärken erzeugt.

Beim Elektronenmikroskop gibt es nur Sammellinsen, keine Zerstreuungslinsen.

Die Funktion einer magnetischen Linse wird später an einem Beispiel (der Polschuhlinse) erklärt.

## Erstes Elektronenmikroskop

Nachdem Ernst Ruska schon gezeigt hatte, dass elektronenoptische Abbildungen mittels der kurzen Spule (magnetische Elektronenlinse) möglich sind, fragte er sich, ob man solche Bilder, wie in der Lichtoptik, durch eine dahinter geschaltete, zweite Abbildungsstufe weiter vergrößern könne. Dies ist ihm im April 1931 gelungen. Die damals benutzte Apparatur aus zwei kurzen Spulen gilt heute mit Recht als erstes Elektronenmikroskop.

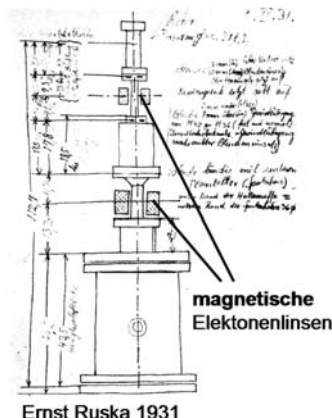


Abb.4: erstes Elektronenmikroskop (Skizze)

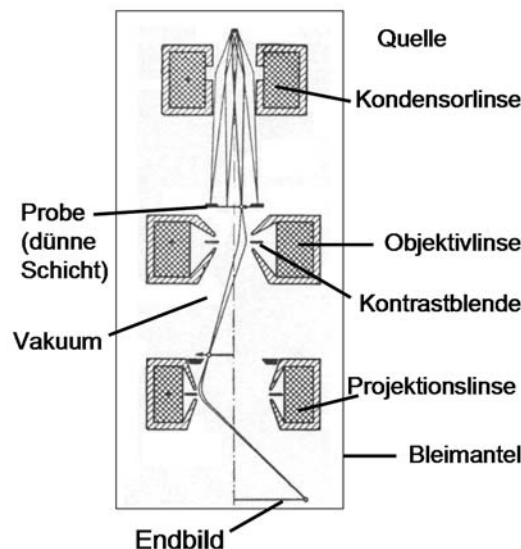
Diese Skizze des ersten Elektronenmikroskops wurde von Ernst Ruska am 9. März 1931 gefertigt. Die Position der beiden magnetischen Linsen, für die zweistufige Abbildung sind in Abb.4 markiert.

Die Gesamtvergrößerung dieses ersten Elektronenmikroskops war allerdings mit 17,4 noch äußerst bescheiden. Trotzdem war dies der erste Nachweis, dass man mit Elektronenstrahlen durchstrahlbare Objekte abbilden kann. Allerdings gab es noch einige zu lösende Probleme.

- Selbst Platin- oder Molybdännetze wurden bei einer für nur 17fache Vergrößerung erforderlichen Bestrahlungsdichte so heiß, dass sie schmolzen. Ernst Ruska bemerkte bei seinen folgenden Arbeiten aber, dass auch sehr dünne Objekte noch hinreichende Kontraste ergaben, wobei die Probe wesentlich weniger aufgeheizt wurde.

- Außerdem musste Ernst Ruska zeigen, dass man mit dem Elektronenmikroskop eine bessere Auflösung erreichen kann als mit dem Lichtmikroskop. Dazu entwickelte er die Polschuhlinse, deren Magnetfeld auf einen so kurzen Bereich der Spulenachse zusammengedrängt ist, dass kurze Brennweiten möglich werden, wie sie für stark vergrößerte Bilder der Objekte in nicht zu großem Abstand hinter der Spule erforderlich sind.

## Aufbau des Durchstrahlungsmikroskops



**Abb.5: Aufbau des Durchstrahlungsmikroskops**

Die Elektronenkanone (Quelle) besteht aus Kathode, Wehnelt-Zylinder und Anode. In diesem Teil des Durchstrahlungsmikroskops werden die Elektronen erzeugt und zu einem Elektronenstrahl gebündelt. Die Kondensatorlinse sorgt dafür, dass die Probe ausgeleuchtet wird, indem sie den Elektronenstrahl auf die Probe fokussiert. Mit Hilfe der Objektivlinse wird der Abbildungsmodus eingestellt (Beugung, Hellfeld). Die Blende hinter der Objektivlinse begrenzt den Strahl, indem sie stark gestreute Elektronen ausblendet. Die Projektionslinse weitet den Strahl auf, so dass sich ein vergrößertes Bild ergibt. Das Bild der Probe kann auf einem Fluoreszenzschirm betrachtet werden. Im TEM muss ein hohes Vakuum erzeugt werden, um zu verhindern, dass die Elektronen an den Gasmolekülen gestreut werden.

Die Apparatur ist von einem Bleimantel umgeben, der die Umwelt vor erzeugter Röntgenstrahlung schützt. Diese kann entstehen, wenn die Elektronen auf die Wände oder die Probe auftreffen.

## TEM ( Apparatur 1938)



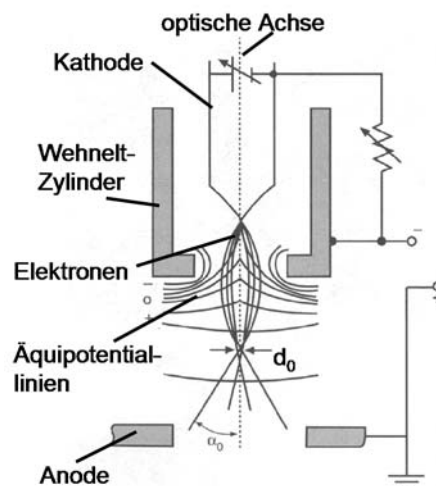
**Abb.6: Durchstrahlungsmikroskop 1938**

Hier sieht man ein Elektronenmikroskop aus dem Jahr 1938. Damals benutzte man als Quelle Glühkathoden, arbeitete mit Beschleunigungsspannungen bis 75kV und erreichte 30.000 fache Vergrößerung.

## Thermische Kathoden

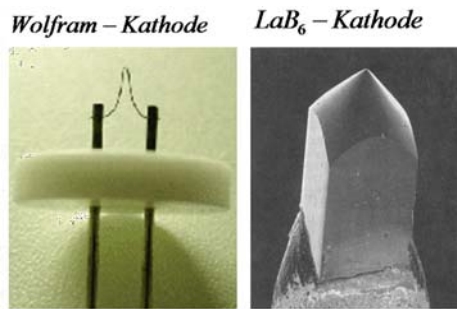
Im TEM werden hauptsächlich zwei Arten von Elektronenquellen verwendet, thermische Emissionsquellen und Feldemissionskathoden (s.u.).

Die Emission von Elektronen bei einer thermischen Kathode erfolgt durch Heizen der Kathode.



**Abb.7: thermische Kathode (Schema)**

Die Elektronenkanone besteht im Wesentlichen aus der Kathode, dem Wehnelt-Zylinder und der Anode. Da zwischen Anode und Kathode eine hohe Spannung angelegt ist, werden die Elektronen in Richtung der Anode beschleunigt. Am Wehnelt-Zylinder liegt ein negatives Potential an, das die Elektronen im sog. cross-over bündelt.

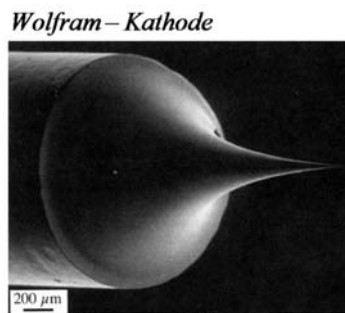


**Abb.8: thermische Kathoden**

Typische Materialien, die als Quelle für thermische Emission benutzt werden, sind Wolframdraht und Lanthanhexaborit ( $\text{LaB}_6$ )-Kristalle. Die Austrittsarbeit von Wolfram liegt bei einer Energie von 4,5eV, die von  $\text{LaB}_6$  bei 2,4eV. Demnach wird die Wolframspitze bei einer Temperatur von 2700K betrieben und die  $\text{LaB}_6$ -Quelle bei 1700K. Während beim Wolfram Krümmungsradien der Spitze von 0,1mm erreicht werden, liegen die des  $\text{LaB}_6$ -Kristalls im  $\mu\text{m}$ -Bereich. Das hat zur Folge, dass die Elektronen beim Austritt aus der Wolfram-Kathode stärker gefächert werden als bei der  $\text{LaB}_6$ -Kathode. Ein weiterer Vorteil der  $\text{LaB}_6$ -Kathode besteht darin, dass sie eine vergleichsweise hohe Lebensdauer besitzt. Eine Wolframspitze liefert ca. 100h Elektronen und eine  $\text{LaB}_6$ -Kathode ca. 500h. Die  $\text{LaB}_6$ -Kathode besitzt allerdings auch Nachteile: Zum einen ist der Kristall durch plötzliche Temperaturschwankungen leicht zerstörbar und zum anderen benötigt man zu seinem Betrieb ein Vakuum von ca.  $10^{-4}\text{Pa}$ , während Wolfram-Kathoden bei  $10^{-2}\text{Pa}$  betrieben werden kann.

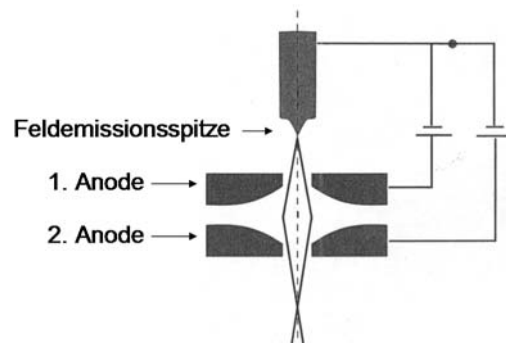
## Feldemissionskathode (FEG)

Die Feldemissionskathode emittiert Elektronen, wenn sich ein starkes elektrisches Feld nahe der Quelle befindet.



**Abb.9: Feldemissionskathode**

Um die Spannung klein zu halten, endet die Kathode in einer feinen Spitze. Typisches Material, aus der eine Feldemissionskathode besteht, ist Wolfram.

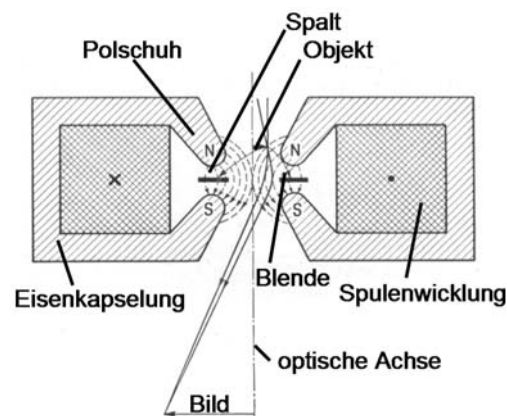


**Abb.10: Feldemissionskathode (Schema)**

Die erste Anode besitzt gegenüber der Feldemissionsspitze ein positives Potential von einigen kV. Diese Erzeugungsspannung ermöglicht es den Elektronen, aus der Spitze zu tunneln. Die zweite Anode beschleunigt die Elektronen mit einer Beschleunigungsspannung von 100kV oder mehr. Das kombinierte Feld der beiden Anoden führt dazu, dass sich die Elektronenstrahlen wie bei einer elektrostatischen Linse überkreuzen (s. Abb.10).

Die Stromdichte der Feldemissionskathoden ist enorm hoch. Durch die extrem kleine Quellgröße ist der Elektronenstrahl außerdem kohärent. Für alle Anwendungen, die eine intensive, kohärente Quelle benötigen, ist die FEG ideal. Allerdings ist es nicht möglich, große Probenbereiche zu beleuchten, ohne an Energiedichte zu verlieren. Unter diesen Umständen ist eine Thermische-Kathode von Vorteil. Außerdem müssen Feldemissionskathoden im UHV betrieben werden.

## Polschuhlinse



**Abb.11: Polschuhlinse (Schema)**

Die von Strom durchflossene zylinderförmige Spule ist von einem Eisenmantel umgeben. Man verwendet weichmagnetisches Eisen, um Hysterese-Effekte möglichst niedrig zu halten. Der Eisenmantel ist in der Mitte von einem ringförmigen Spalt unterbrochen (Polschuhe), so dass dort die magnetischen Feldlinien bevorzugt austreten. Durch die Polschuhe wird das inhomogene Magnetfeld „verdichtet“, wodurch eine kürzere Brennweite und somit eine höhere Auflösung erreicht wird. Ernst Ruska erreichte damals Brennweiten von 3mm für Elektronenstrahlen mit Beschleunigungsspannungen von 75.000V.

## Linsenfehler

Das Elektronenmikroskop hat genau wie das Lichtmikroskop Linsenfehler. Sie bestimmen sein Auflösungsvermögen. Von den 11 vorkommenden Aberrationen sind folgende Bildfehler besonders wichtig:

- Beugungsfehler (s.o.)
- Sphärische Aberration (Öffnungsfehler): Nur achsnah, parallel einfallende Strahlen schneiden sich genau im Brennpunkt.
- Chromatische Aberration: Die Brennweite einer Linse hängt von der Wellenlänge ab. Da die Elektronen eine bestimmte Wellenlängenverteilung besitzen, zeigen die Elektronenwellen mit kleinerer Wellenlänge eine kürzere Brennweite als die mit großer Wellenlänge.

- Astigmatismus: Die brechende Wirkung der Linse ist für schräg zur optischen Achse einfallende Lichtstrahlen nicht mehr rotationssymmetrisch zum Haupt- bzw. Mittelpunktstrahl.

Insgesamt gesehen sind die Linsenfehler der Elektronenlinsen erheblich größer als die der Lichtoptik.

Am wichtigsten ist die Korrektur der Linsenfehler der Objektivlinse, da diese Fehler von den nachfolgenden Linsen mit abgebildet und dadurch auch vergrößert werden.

## Sphärische Aberration (Öffnungsfehler)

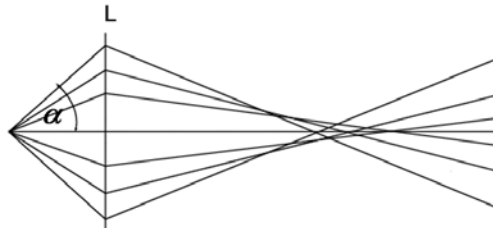


Abb.12: sphärische Aberration (Schema)

Die meisten Linsenfehler lassen sich korrigieren. Chromatische Aberrationen und andere Linsenfehler spielen für das Auflösungsvermögen in der Praxis deshalb nicht die begrenzende Rolle.

Der Fehler der sphärischen Aberration lässt sich allerdings nicht wie in der Lichtoptik durch Zerstreulinsen kompensieren, da es in der Elektronenoptik keine solchen Linsen gibt. Durch die sphärische Aberration wird also das praktisch erreichbare Auflösungsvermögen mitbestimmt. Die durch den Öffnungsfehler gegebene Auflösungsgrenze  $g_s$  ist:

$$g_s = C_s \cdot \alpha^3$$

, wobei  $C_s$  ein Koeffizient der sphärischen Aberration und  $\alpha$  der Aperturwinkel (Öffnungswinkel).  $\alpha$  muss also möglichst klein gehalten werden, um den Linsenfehler  $g_s$  zu reduzieren.

## Beugungsfehler

Andererseits ist, wie schon erwähnt wurde, die Auflösungsgrenze durch die Wellennatur der Elektronen bedingt:

$$g_B = \frac{0,61 \cdot \lambda}{\sin \alpha}$$

$g_B$  bezeichnet man als Beugungsfehler. Hierbei ist, anders als bei der durch die sphärische Aberration gegebenen Auflösungsgrenze, für ein möglichst gutes Auflösungsvermögen eine möglichst große Apertur  $\alpha$  erwünscht.

## Auflösungsvermögen

Aus Öffnungsfehler und Beugungsfehler resultiert das effektive Auflösungsvermögen:

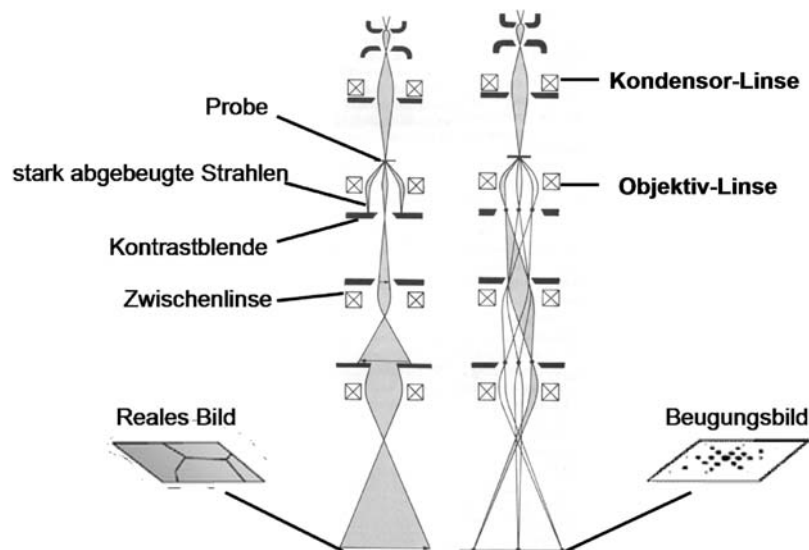
$$g = g_s + g_B$$

Das durch Variation von  $\alpha$  minimal mögliche  $g_{\min}$  lässt sich durch Differentiation berechnen und stellt die theoretische Auflösungsgrenze des Elektronenmikroskops dar.

$$g_{\min} = A \cdot \sqrt[4]{C_S \cdot \lambda^3}$$

A ist eine Konstante mit  $A=0,43$ . Wählt man für  $C_S$  einen typischen Wert von  $C_S=1\text{mm}$ , so kann man für eine Beschleunigungsspannung von  $100\text{kV}$  die theoretische Auflösungsgrenze des Elektronenmikroskops berechnen. Sie liegt bei  $g_{\min} = 2,04 \text{ \AA}$ .

## Abbildungsmoden



**Abb.13: Hellfeldmodus/Feinbereichsbeugung (Schema)**

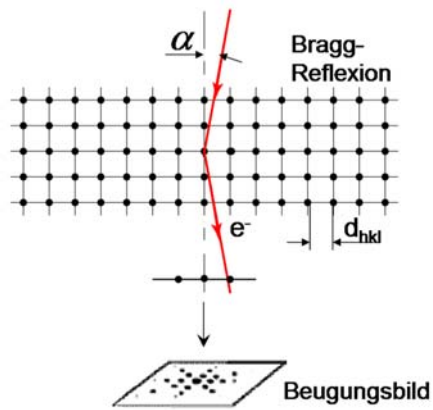
Hier ist noch einmal der schematische Aufbau des Durchstrahlungs-Elektronenmikroskops zu sehen. Daran kann man die verschiedenen Abbildungsmoden erklären.

Auf der rechten Seite ist der Strahlengang für den Beugungsmodus dargestellt. Auf dem Leuchtschirm beobachtet man das Beugungsbild. Die linke Seite zeigt, vereinfacht dargestellt, den Strahlengang für den Hellfeldmodus. Die Kontrastblende gestattet die Auswahl der Elektronen, die zur Bilderzeugung beitragen. Im Hellfeldmodus (links) werden die stark abgebeugten Strahlen ausgeblendet, so dass nur die schwach abgebeugten Strahlen, der so genannte Hauptstrahl (0. Maximum) zur Bildentstehung beiträgt.

Durch Verändern der Zwischenlinsen-Brennweite kann zwischen Hellfeldabbildung und Beugungsbild umgeschaltet werden. So wird entweder die Bildebene oder die Brennebene des Objekts scharf abgebildet. Bei der Hellfeldabbildung entsteht ein dreistufig vergrößertes reales Bild.

## Bragg-Reflexion

Ähnlich wie in der Röntgenbeugung werden auch Elektronen an Gitterebenen „reflektiert“ (Bragg-Reflexion).

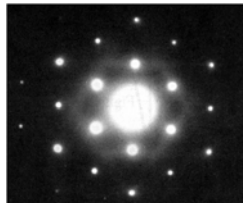


**Abb.14: Bragg-Reflexion (Schema)**

Wegen der geringen Wellenlänge der Elektronen vereinfacht sich die Bragg-Bedingung zu  $n \cdot \lambda \approx 2 \cdot d_{hkl} \cdot \alpha$  ; mit  $\alpha \approx 0,5^\circ$  .

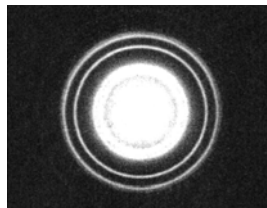
## Beugungsbilder

Bei Einkristallinen Proben treten scharfe Reflexe, in Richtungen auf, die durch die Braggsche Gleichung bestimmt sind.



**Abb.15: Beugungsbild eines Al-Einkristalls**

Bei polykristallinen Proben ordnen sich die Reflexe aufgrund des statistischen Charakters der Kristallorientierungen zu konzentrischen Kreisen.



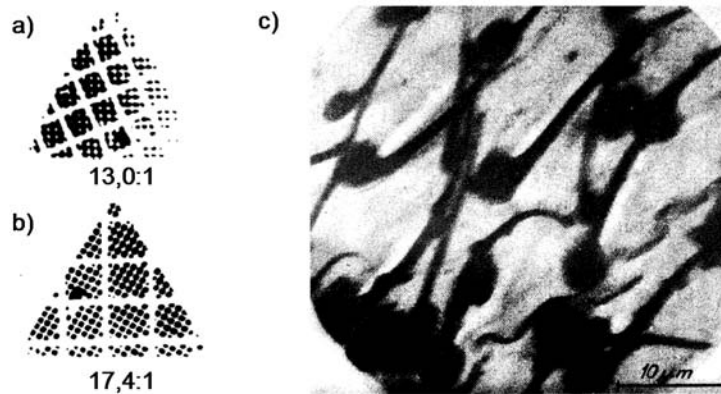
**Abb.16: Beugungsbild eines Au-Vielkristalls**

Amorphe Proben weisen strukturarme, breit verwaschene Ringstrukturen auf.



**Abb.17: Beugungsbild amorpher Carbons**

## Hellfeldbilder (Ruska 1931-1935)

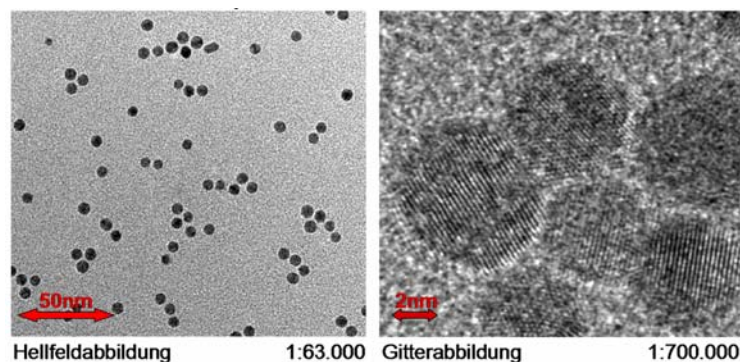


**Abb.19: Hellfeldbilder**

- a) einstufige Vergrößerung eines Platinnetzes
- b) zweistufige Vergrößerung eines Platinnetzes
- c) Flügelhaut der Hausfliege

a) und b) sind die ersten Hellfeldbilder Ruskas. Sie bewiesen damals, dass man elektronenoptische Abbildungen durch eine zweite Abbildungsstufe weiter vergrößern kann. c) ist die Aufnahme einer biologischen Probe (Flügelhaut der Hausfliege), welche Studenten Ruskas im Jahr 1935 anfertigten. Es wurde mit Beschleunigungsspannungen von 60kV gearbeitet und 2200fache Vergrößerung erzielt.

## Hellfeldbilder (aufgenommen mit einem modernen TEM)



Quelle: Olga Dmitrieva

**Abb.20: Eisen-Platin Nanopartikel**

Auf den obigen Probenbildern sind Eisen-Platin-Partikel auf einer Kohlenstoffolie zu sehen; sie sind mit dem HRTEM (s.u.) aufgenommen worden. Die typische Größe dieser Nanopartikel liegt zwischen 5 und 10nm. Auf dem Bilder rechts kann man einzelne Netzebenen erkennen.

Außerdem sind mit dem HRTEM analytische Messungen auf Nanometerskala möglich, d.h. die qualitative und quantitative Bestimmung der Zusammensetzung des abgebildeten Probenbereiches.

## **Modernes Elektronenmikroskop HRTEM (high resolution TEM)**



**Abb.18: HRTEM**

Auf dem Foto ist ein Philips Tecnai HRTEM zu sehen. Die Elektronenkanone ist eine Feldemissionskathode, es besitzt eine Beschleunigungsspannung von 200kV und erreicht eine Punktauflösung von 0,24nm. Seine höchste mögliche Vergrößerung ist 910.000:1.

## **Ausblick: UHRTEM (ultra high resolution TEM)**



**Abb.21: UHRTEM**

Das UHRTEM besitzt eine Auflösung im sub-Angström Bereich. Dies wird ermöglicht durch Korrekturlinsen für die sphärische Aberration und einem Monochromator, welcher den chromatischen Linsenfehler reduziert. Er ist in die Elektronenquelle integriert und stabilisiert dort die Hochspannung. So erreicht man, dass die Elektronen hinreichend monoenergetisch sind.

# Das Rastertunnelmikroskop (STM)

Heinrich Rohrer, Gerd Binnig



Abb.22: Heinrich Rohrer, Gerd Binnig

Heinrich Rohrer (links auf dem Foto) und Gerd Binnig (rechts auf dem Foto) haben 1981 das Rastertunnelmikroskop (STM) entwickelt und bekamen 1986 für dessen Konstruktion den Nobelpreis.

## Tunneleffekt

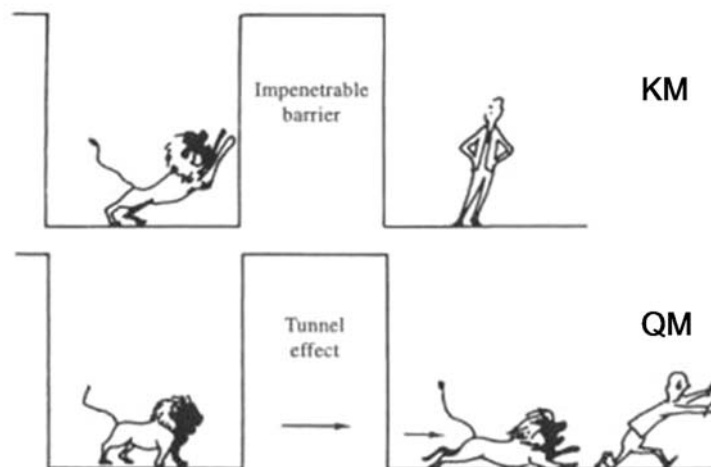


Abb.23: Tunneleffekt

Der Tunneleffekt basiert auf den Welleneigenschaften von Teilchen. Die Theorie des Tunnel-effekts in der Quantenmechanik besagt, dass ein Teilchen eine Barriere, deren potentielle Energie höher ist als die Gesamtenergie des Teilchens, mit einer Wahrscheinlichkeit, die nicht null ist, überwindet.

In der klassischen Mechanik haben Teilchen keinen Wellencharakter. Die Wahrscheinlichkeit für diesen Vorgang ist dann null, d.h. es ist unter diesen Bedingungen unmöglich, dass das Teilchen die Barriere überwindet.

# Grundidee

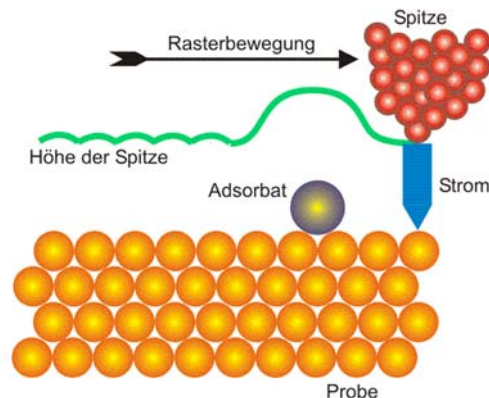


Abb.24: Grundidee des STM

Im Wesentlichen besteht das STM aus einer Spitze und einer Probe, zwischen denen eine Spannung anliegt. Eine Voraussetzung bei dieser Methode ist, dass die Probe elektrisch leitfähig ist. Die Spitze wird bis auf etwa 1nm an die Oberfläche angenähert. Da zwischen Spitze und Probe ein Potential angelegt ist, fließt ein Tunnelstrom. Der Tunnelstrom besitzt eine exponentielle Abhängigkeit vom Abstand zwischen Spitze und Probe. Durch Abrastern der Oberfläche erhält man topographische Informationen.

## Tunnelstrom

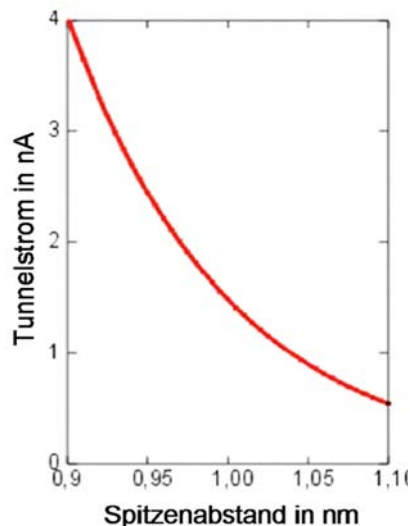


Abb.25: exponentielle Abhängigkeit des Tunnelstroms  $I_T$  vom Abstand  $s$

In der Nacht des 16. März 1981, erhielten Binnig und Rohrer den ersten klaren Beweis für eine exponentielle Abhängigkeit des Tunnelstroms  $I_T$  vom Abstand  $s$  zwischen Spitze und Probe, die für den Tunneleffekt charakteristisch ist. Der Tunnelstrom  $I_T$  ist gegeben durch

$$I_T \propto \exp\left(-s \cdot \sqrt{\Phi \cdot 2m \cdot \frac{4\pi}{h}}\right),$$

wobei  $s$  der Abstand zwischen Probe und Spitze,  $\phi$  die Tunnelbarrierehöhe,  $h$  die Plank-Konstante und  $m$  die freie Elektronenmasse ist.

## Steuerung der Spitze

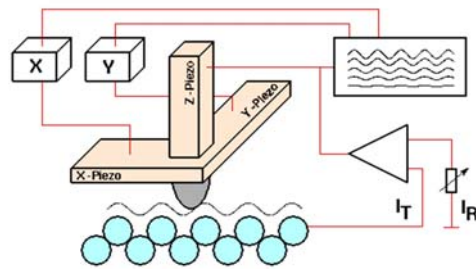


Abb.26: Steuerung der Spitze

Die Messsonde kann mit atomarer Präzision auf der Probe positioniert werden. Dies gelingt mit „Motoren“ aus Piezokristallen. Solche Kristalle lassen sich mit einer elektrischen Spannung kontrolliert verformen. Es gibt zwei Sorten solcher Nanomotoren, so genannte Walker zur Grobjustierung und Röhre Scanner für kleinere, noch präzisere Bewegungen.

Der Röhre Scanner besteht aus einem Piezo-Kristall in Form einer Röhre, die eine Innenelektrode und eine in vier Quadranten aufgeteilte Außenelektrode hat. Durch eine elektrische Spannung zwischen der Innen- und allen vier Außenelektroden wird die Röhre gestreckt oder gestaucht. Die vier Außenelektroden können aber auch unterschiedliche Spannungen zur Innenelektrode haben. So kann eine Seite des Scanners gedehnt und die andere Seite gestaucht werden, wodurch sich der Scanner verbiegt. Auf diese Weise können die Messsonde oder die Probe, von elektrischen Spannungen gesteuert, auf den Bruchteil eines Atomdurchmessers genau positioniert werden, und zwar in allen drei Raumrichtungen.

## Constant Hight Mode

Man unterscheidet zwischen zwei verschiedenen Abbildungsarten, „constant current“ und „constant hight“ Modus.

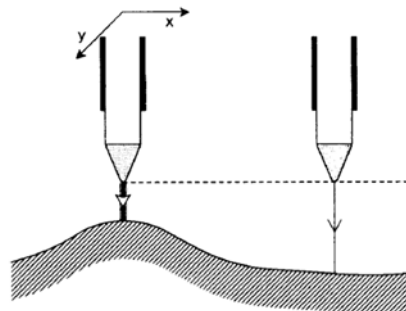
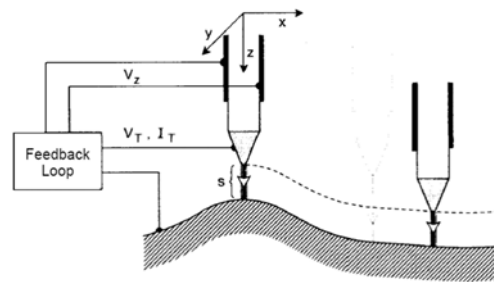


Abb.27: constant hight Mode

Im „constant hight“ Modus wird die vertikale Position der Spitze konstant gehalten. Auf Grund des Höhenprofils der Probenfläche wird man an jedem Messpunkt einen anderen Tunnelstrom messen. In diesem Modus ist eine hohe Scangeschwindigkeit möglich, allerdings kann er Aufgrund der konstanten z-Auslenkung der Spitze nur auf atomar glatten Oberflächen verwendet werden.

## Constant Current Mode



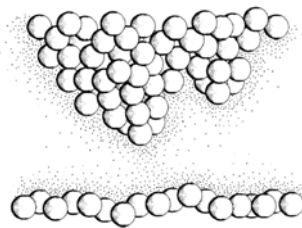
**Abb.28: constant current Mode**

Im „constant current“ Modus wird der Abstand die Spitze zur Probe durch einen Piezo-Kristall so geregelt, dass ein konstanter Tunnelstrom fließt. Dieser Modus bietet sich für Oberflächen mit großen Höhenänderungen an, allerdings ist durch das ständige Nachregeln des Abstandes die Scangeschwindigkeit niedrig.

## Tunnelspitzen

Die Spitze ist das wichtigste Element des Rastertunnelmikroskops. Sie beeinflusst die erreichbare Scangeschwindigkeit, Auflösung, Bildschärfe und die messbare Ladungsverteilung.

Die Spitze sollte möglichst schlank, glatt und starr sein und nicht von einer Oxidschicht bedeckt sein, da der Ohmsche Widerstand sehr leicht größer sein könnte als der Tunnelwiderstand, so dass gar kein Tunnelstrom zustande kommt. Des Weiteren sollte die Spitze chemisch und elektrochemisch isoliert sein, um Leckströme zu vermeiden (das Ende der Spitze ist natürlich genau wie der Anschluss nicht isoliert, da sonst gar kein Zustandekommen des Tunnelstromes möglich wäre).



**Abb.29: Spitze/Probe (Schema)**

Die Spitze ist ohne spezielle Behandlung immer ziemlich rau und führt zum Vorhandensein von Minitips (s. Abb.). Die extreme Abhängigkeit des Tunnelstroms vom Abstand zwischen Spitze und Probe selektiert dann den Bereich der Spitze, der der Probe am nächsten ist.

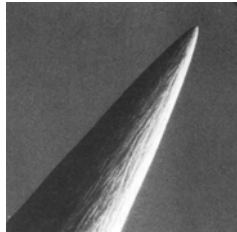
Der Strom sollte praktisch nur von dem vordersten Atom der Spitze, im günstigsten Fall nur aus einem bestimmten Orbital des vordersten Atoms fließen. Dies definiert den Durchmesser des Tunnelstrom-Fadens und somit die laterale Auflösung zu atomaren Dimensionen. Die im Schema gezeigte zweite Spitze sitzt etwa zwei Atome weiter zurück und trägt nur etwa den millionsten Teil zum Strom bei.

Inzwischen gibt es die verschiedensten Möglichkeiten Spitzen herzustellen.



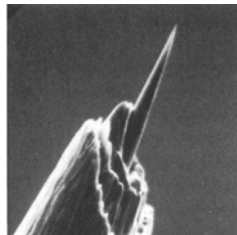
**Abb.30: Platin-Iridium Spitze**

Auf dem obigen Bild sieht man eine Pt-Ir-Spitze. Platin-Iridiumspitzen werden durch das Schleifen über einen Untergrund oder durch das Schneiden mit einem Seitenschneider hergestellt. Auch mit solchen Spitzen erreicht man teilweise atomare Auflösung.



**Abb.31: Spitze hergestellt durch elektrochemisches Ätzen**

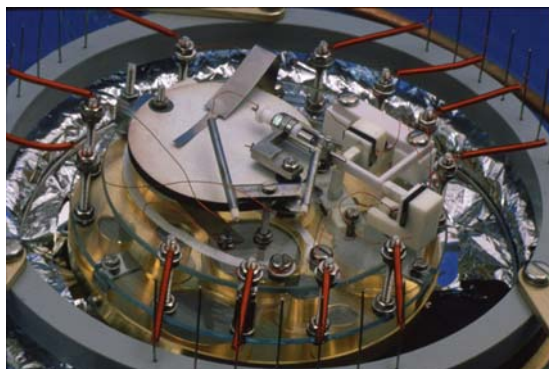
Dieses Bild zeigt eine Spitze, hergestellt durch elektrochemisches Ätzen in einer Lösung. Außer diesen Verfahren, gibt es noch die Möglichkeit Spitzen durch Focus-Ion-Beam-Technik herzustellen (s. Bild unten).



**Abb.32: Spitze hergestellt mit Focus-Ion-Beam-Technik**

Die Auflösung kann oft durch leichtes Aufsetzen der Spitze auf die untersuchende Oberfläche, oder indem man die Spitze hohen elektrischen Feldstärken aussetzt ( $10^8\text{V/cm}$ ), nochmals erhöht werden. Es besteht jedoch die Gefahr, dass durch diese Methoden asymmetrische Spitzen oder Spitzen mit 2 Atomen am Ende erzeugt werden. Als geeignete Materialien haben sich Wolfram, Platin-Iridium und Gold erwiesen.

## Rastertunnelmikroskop 1981



**Abb.33: erstes STM (1981)**

Hier ist das erste Rastertunnelmikroskop von 1981 zu sehen. Binnig und Rohrer bauten zuerst diese sehr komplizierte Version eines STM's in einer UHV-Kammer. Zur Vibrationsisolation benutzten sie eine Supraleiter-Schwebeaufhängung.

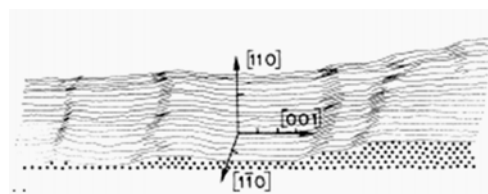
Die Apperatur erwies sich als so kompliziert, dass es nie benutzt wurde. Stattdessen kam ein anderes Instrument zum Einsatz: ein Exsikkator als Vakuumkammer und eine einfachere Version einer Supraleiter-Schwebeaufhängung. Erst später stellte sich heraus, dass die Supraleiter Schwebeaufhängung gar nicht nötig war. Es reichte eine Aufhängung an Gummibändern.

Zur Erreichung atomarer Auflösung wurden damals folgende weitere Maßnahmen ergriffen: Das STM wurde in eine UHV-Apperatur platziert, um eine Schwingungsübertragung durch Luftmoleküle zu verhindern und Messungen an sauberen Oberflächen durchführen zu können. Tiefe Temperaturen gewährleisteten geringe thermische Drift und kleine thermische Längenfluktuationen, so wurden starke Längenänderungen von Probe und Spitze vermieden. Mit piezoelektrischem Material als reibungsfreiem elektromechanischem Wandler ist es möglich, die Spitze auf atomarer Skala zu bewegen.

## Erste STM-Bilder (1981)

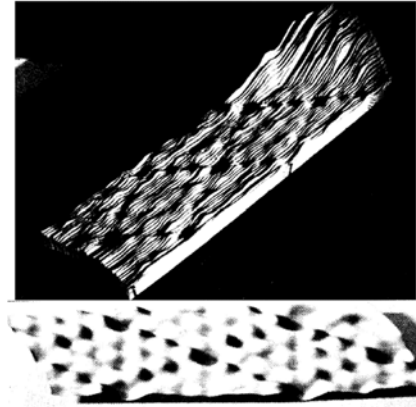
1981, als der Aufbau des STM's gerade in seiner Anfangsphase steckte, gab es ein äußerst faszinierendes und schwieriges Problem in der Oberflächenphysik, nämlich zu verstehen, warum die Si(111)-Oberfläche eine 7x7-Struktur bildet und sie nachzuweisen. Erste Abschätzungen ergaben, dass die 7x7-Struktur mit dem STM auflösbar sein sollte. Binnig und Rohrer haben sich dieser Aufgabe intensiv gewidmet, aber zunächst ohne Erfolg. Das Problem war, die Oberfläche geeignet zu präparieren.

Erfolgversprechender waren die STM-Untersuchungen am Au-Einkristall, speziell der (110)-Oberfläche, von der man wusste, dass sie eine 1x2-Rekonstruktion zeigt. Allerdings hatten sie entgegen ihrer Erwartungen mit der Auflösung zu kämpfen, denn Gold wechselt schon bei Annäherung im atomaren Bereich von der Oberfläche zur Spitze. Trotzdem lieferten diese Experimente die ersten STM- Bilder, die atomare Ketten mit atomarer Auflösung senkrecht zu den Ketten zeigten. Diese Arbeiten erregten zunächst noch nicht viel Aufmerksamkeit.



**Abb.34: 1x2-Rekonstruktion Au (110)**

Im Herbst 1982 begannen Binnig und Rohrer den zweiten "7x7-Versuch", wobei sie dieses Mal eine andere Oberflächenpräparation benutzten. Diese Versuche waren diesmal erfolgreicher. Die 7x7 Struktur konnte überall beobachtet werden, wo immer die Oberfläche glatt war.

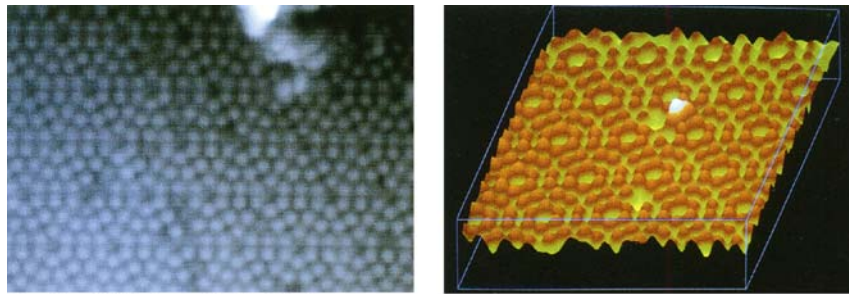


**Abb.35: 7x7-Rekonstruktion Si(111)**

Um die Aufmerksamkeit der Kollegen zu erregen, „bastelten“ sie ein Reliefmodell mit Schere, Plexiglas und Nägeln aus den Schreiberlinien zusammen (s.o. oberes Bild). Die bearbeitete Aufsicht der ursprünglichen Schreiberlinien diente zur Analyse und Diskussion (s.o. unteres Bild).

## 7x7-Struktur Si(111) (heute)

Zum Vergleich sehen wir hier aktuelle Projektionen der 7x7-Struktur.

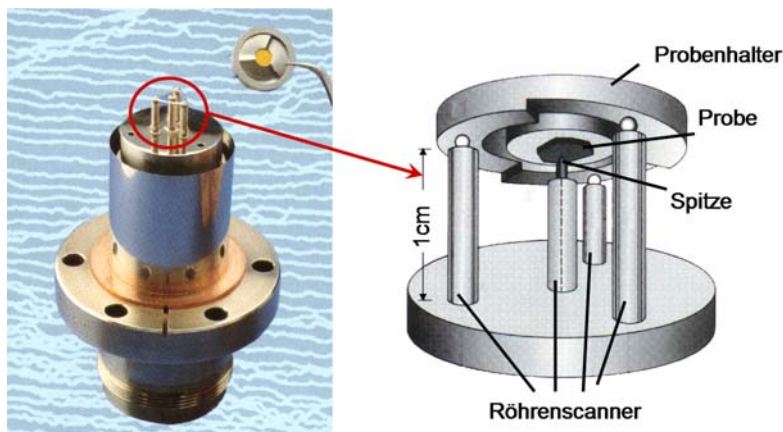


Quelle: H.Niehus, KFA Jülich

**Abb.36: 3D-Projektion 7x7-Struktur Si(111)**

Das Bild links zeigt die unbearbeiteten Rohdaten. Mit spezieller Software kann man heutzutage auch 3D-Projektionen bekommen (rechts).

## Beetle-STM

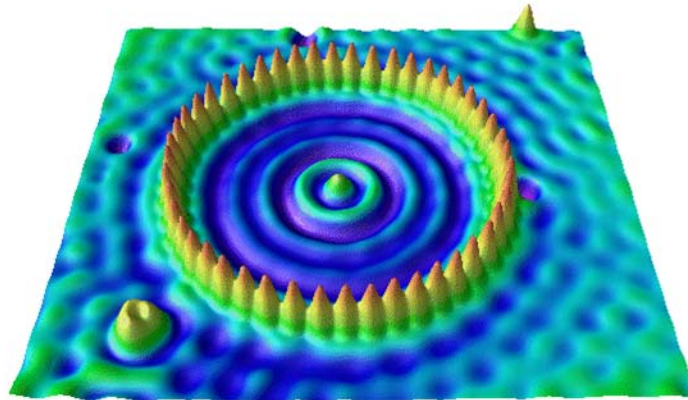


**Abb.37: Beetle-STM**

Es gibt die verschiedensten Typen von STM-Geräten, sie sind einfacher und kleiner geworden. Auf dem Foto sehen wir ein modernes Rastertunnelmikroskop, das Beetle-STM. 1984 wurden erstmals Bilder gezeigt, die bei gewöhnlichem Atmosphärendruck aufgenommen waren.

Das Schema zeigt den Aufbau des Beetle-STMs. Beetle heißt Käfer. Dieses STM wird so genannt, weil der Pobenhalter beweglich auf drei Beinen steht, drei Röhre Scanner, die die Position der Probe verändern können. Die Spitze steht ebenfalls auf einem Röhre Scanner.

## Nanomanipulation



Quelle: Don Eigler, IBM

**Abb.38: Kreisförmige Anordnung von Eisenatomen auf Cu(111)-Oberfläche**

Die einfachste Form der Nanomanipulation mit einem STM ist, die Spitze einfach auf die Oberfläche aufzusetzen und so gezielt „Löcher“ zu erzeugen. Durch ein Bewegen der Spitze während des Aufsetzens können auch Striche in die Oberfläche gekratzt werden. Erhebungen der Oberfläche können geformt werden, indem an einer Stelle die Spitze auf die Oberfläche aufgesetzt wird; dabei nimmt die Spitze Material auf. Dann wird gezielt an den gewünschten Stellen durch Tunnelspannungs-Impulse das Material wieder an die Probe abgegeben. So ist das obere Bild entstanden.

Hier sieht man eine kreisförmige Anordnung von Eisenatomen auf einer Cu(111)-Oberfläche. Sie bewirken, dass sich ringförmige stehende Elektronenwellen in der Cu-Oberfläche ausbilden. Die Eisenatome bilden einen Quantentopf, welche die Elektronenwellen reflektieren.

## Rastersondenverfahren

Nach der Erfindung des Rastertunnelmikroskops 1981, sind aus diesem Verfahren eine Reihe weiterer Rastersondenverfahren entwickelt worden:

- Rastertunnelmikroskopie (STM) und Spektroskopie (STS) seit 1981
- Raster-Nahfeldmikroskopie (SNOM) seit 1982
- Rasterkapazitätsmikroskopie seit 1984
- Raster-Wärmemikroskopie (SThM) seit 1985
- Rasterkraftmikroskopie (AFM) und Kraft-Spektroskopie seit 1986
- Magnetische Kraftmikroskopie (MFM) seit 1987
- Reibungskraftmikroskopie (LFM) seit 1987
- Nahfeld-Akustikmikroskopie seit 1989
- Raster-Ionenleitfähigkeitsmikroskopie seit 1989

## Quellen- und Literaturverzeichnis

- Transmission Electron Microscopy, D. Williams and B. Carter
- Elektronenmikroskopische Methodik, G. Schimmel
- Durchstrahlungs-Elektronenmikroskopie fester Stoffe, E. Hornbogen
- Einführung in die Elektronenmikroskopie, M. Heimendahl
- Das freie Elektron in Physik und Technik, C. Ramsauer
- Scanning Probe Microscopy and Spectroskopie, R. Wiesendanger
- Dtv-Atlas zur Physik 1, H. Breuer
- Optik, Bergmann Schäfer
- Experimentalphysik 2, Demtröder
- Physikalische Blätter 43, (1987) Nr.7
- Physikalische Blätter 50, (2000) Nr.11
- Physikalische Blätter 55, (1999) Nr.6
- Physikalische Blätter 50, (1994) Nr.9
- <http://www.greier-greiner.at>
- <http://www.weltderphysik.de/themen/stoffe/materialien/kristalle/nanotechnologie/>
- <http://pen.physik.uni-kl.de/>