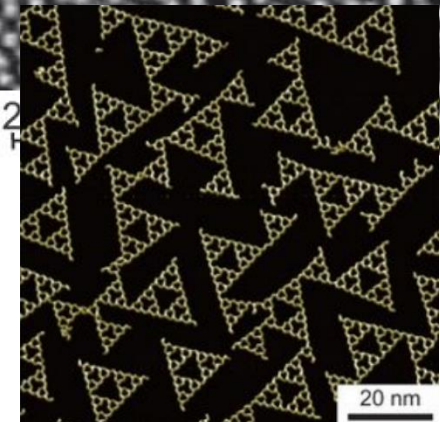
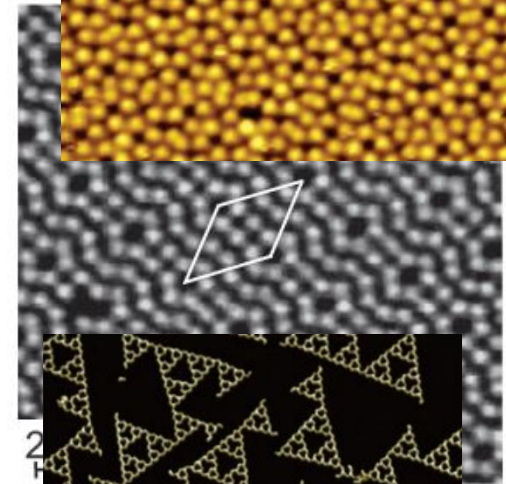
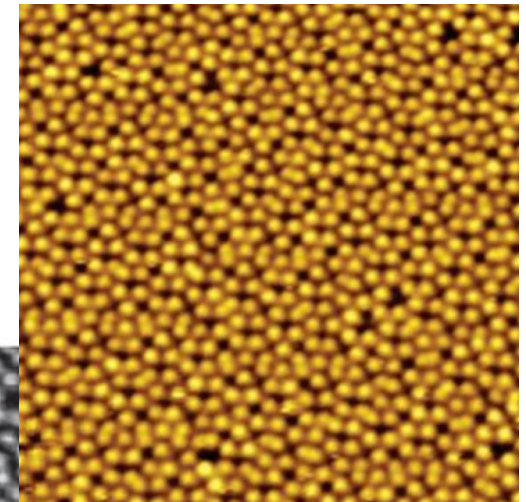
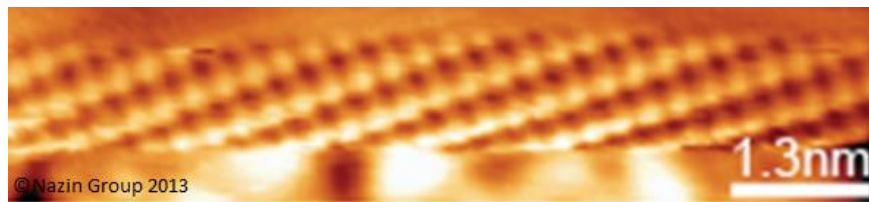
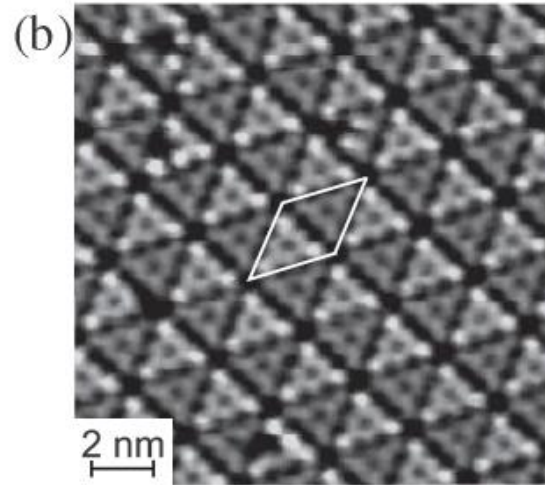
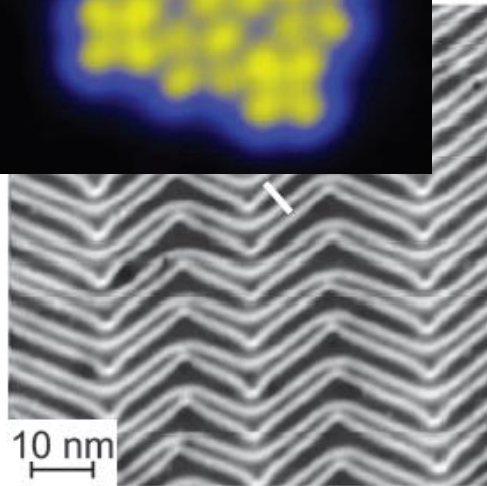
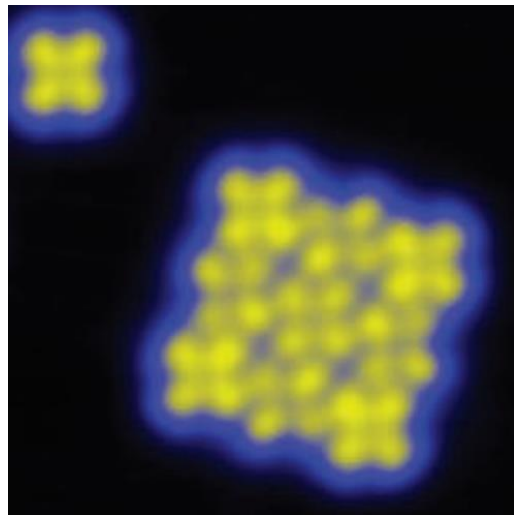
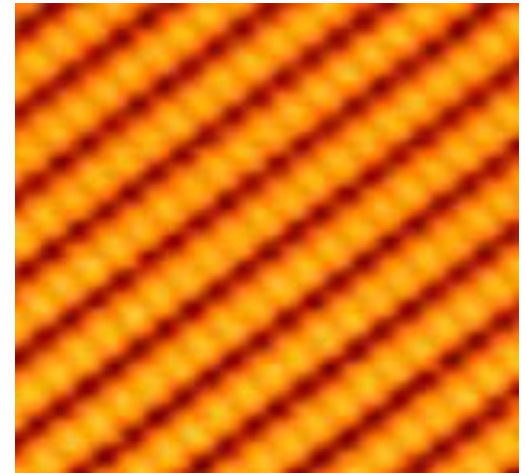
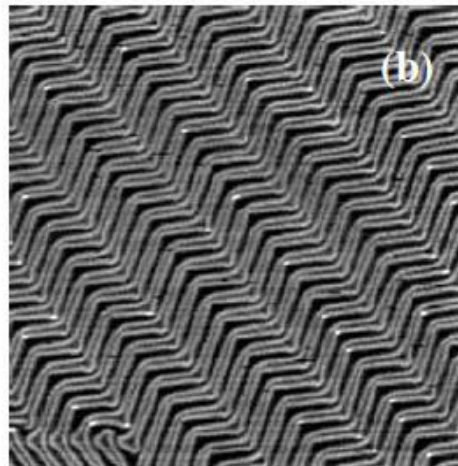
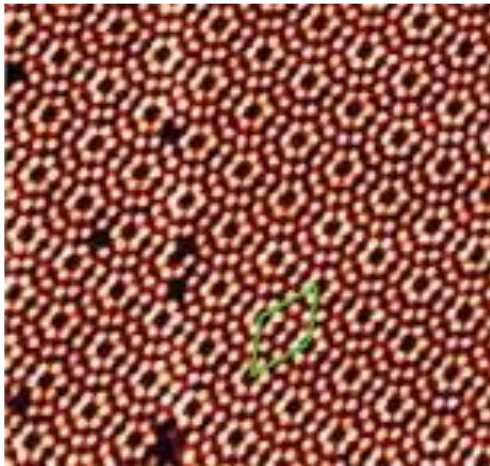


Vorlesung 8 Rastertunnelmikroskopie





Übersicht über Kapitel 3

3. Methoden der Oberflächenphysik

3.1 Kristallpräparation

3.2 Chemische Oberflächenanalyse

3.3 Beugungsmethoden

3.4 Frühe Realraumabbildung

3.5 Transmissionselektronenmikroskopie

3.6 Rasterelektronenmikroskopie

3.7 Rastertunnelmikroskopie

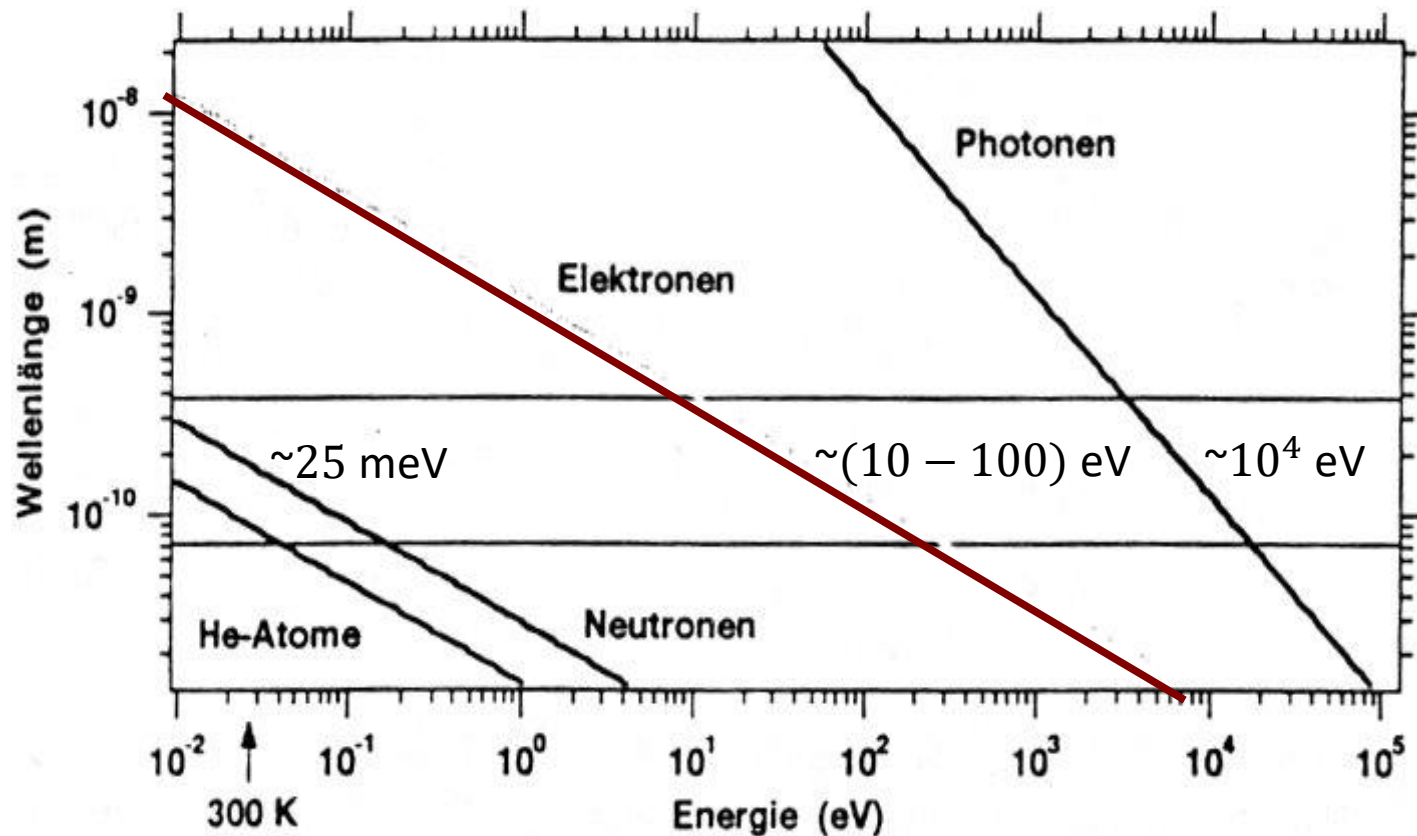
3.8 Rasterkraftmikroskopie

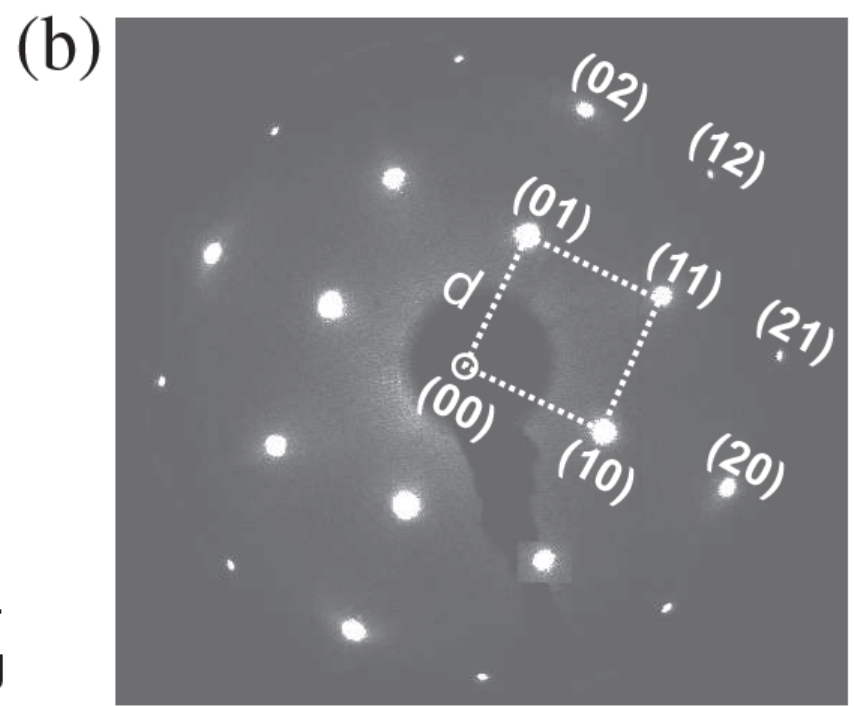
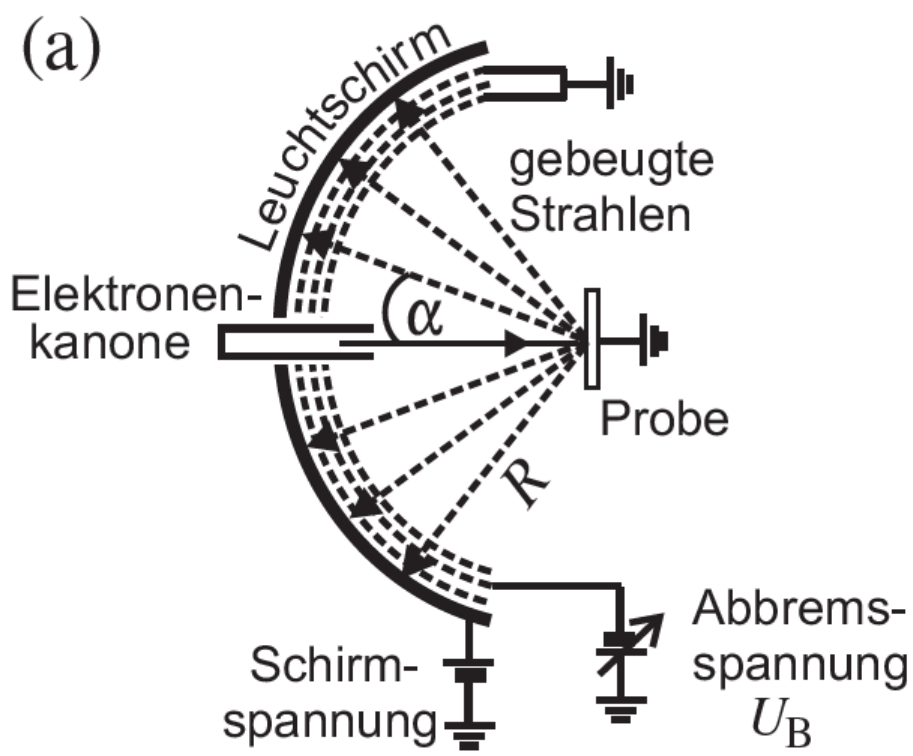
....

Lernziele

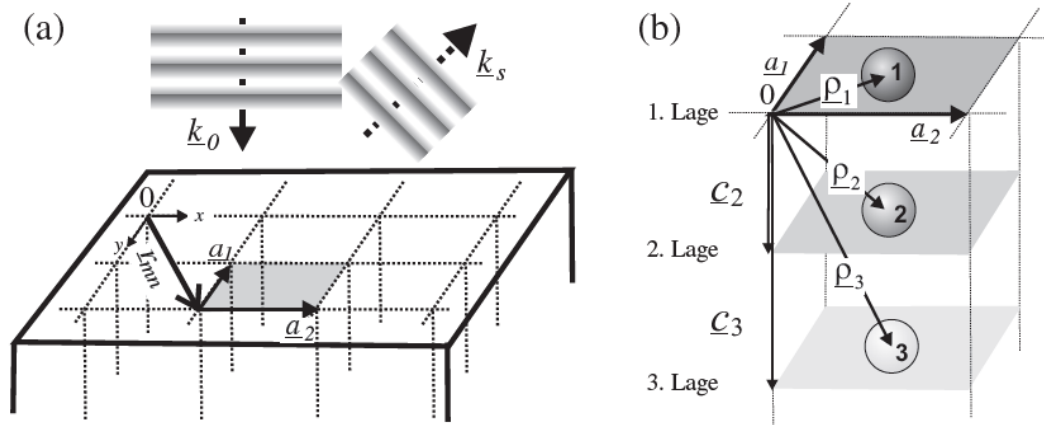
- Vertraut werden mit früheren Methoden zu Abbildungen im Realraum
- Verständnis zum Aufbau eines Rastertunnelmikroskops
- Tunnel-Theorie

Die de Broglie Wellenlänge





3.3 Beugungsmethoden



$$\Delta \underline{k} = \underline{k}_s - \underline{k}_0.$$

$$A = \sum_j f_j(\underline{k}_0, \underline{k}_s) e^{-i \Delta \underline{k} \cdot \underline{\rho}_j} \sum_{mn} e^{-i \Delta \underline{k} \cdot \underline{r}_{mn}}$$

$$I = |A|^2 = \underbrace{\left| \sum_j f_j(\underline{k}_0, \underline{k}_s) e^{-i \Delta \underline{k} \cdot \underline{\rho}_j} \right|^2}_{|\mathcal{F}|^2} \cdot \underbrace{\left| \sum_{mn} e^{-i \Delta \underline{k} \cdot \underline{r}_{mn}} \right|^2}_{|\mathcal{G}|^2} \equiv |\mathcal{F}|^2 \cdot |\mathcal{G}|^2$$

Formfaktor oder Strukturfaktor

Gitterfaktor

Überstrukturen im reziproken Raum

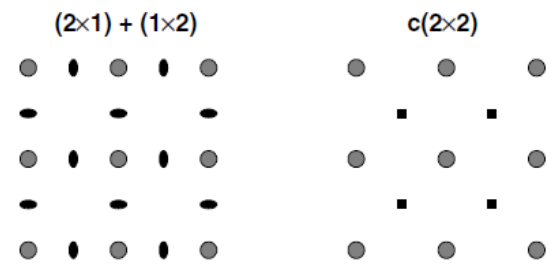
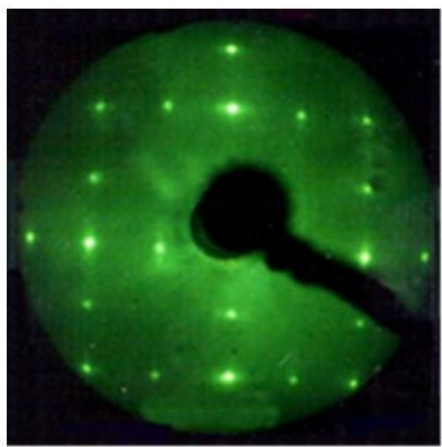
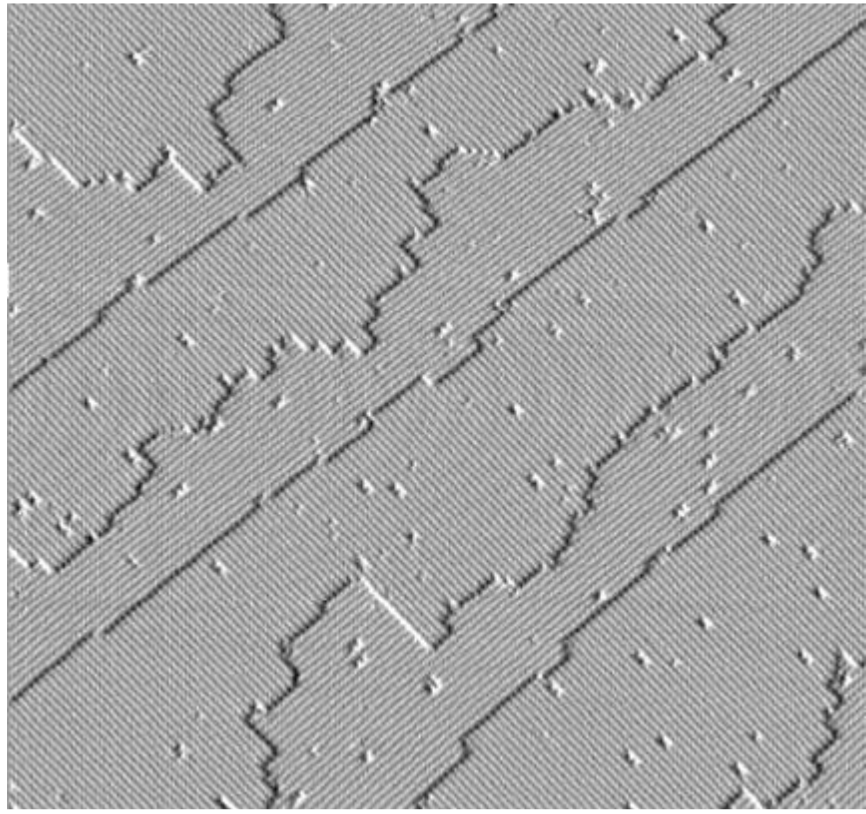


Fig.1.7. Diffraction pattern of two domains of a (1×2) superlattice and a $c(2 \times 2)$ superlattice| on a (100) surface of a cubic material.

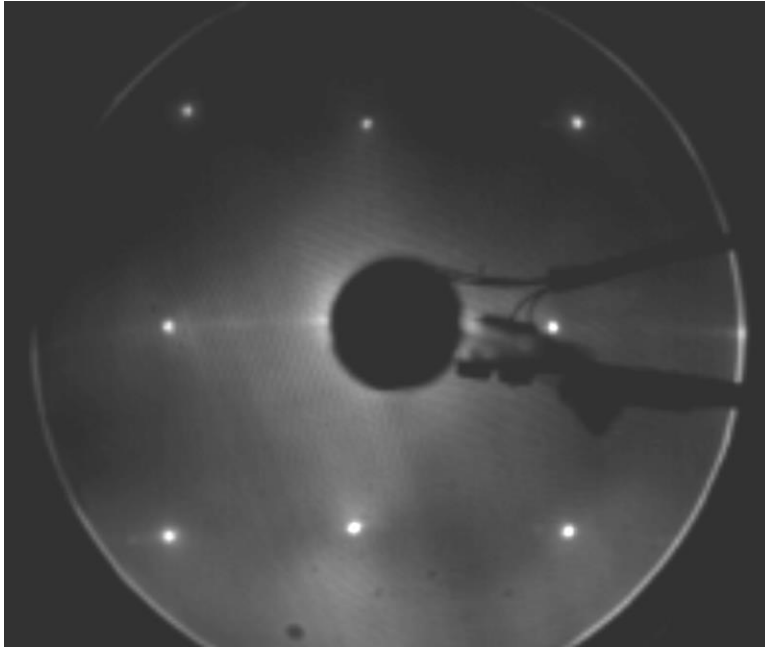
Low Energy Electron
Diffraction (LEED) pattern
einer Si(100) Oberfläche



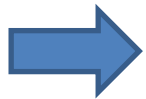
Stufen auf Si(100)



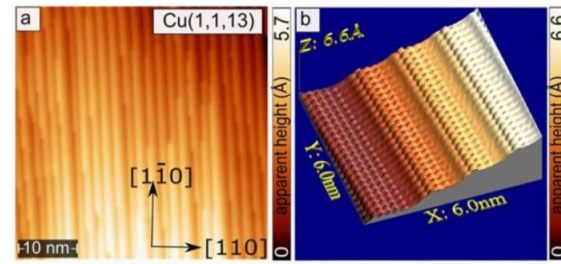
3.3 Beugungsmethoden



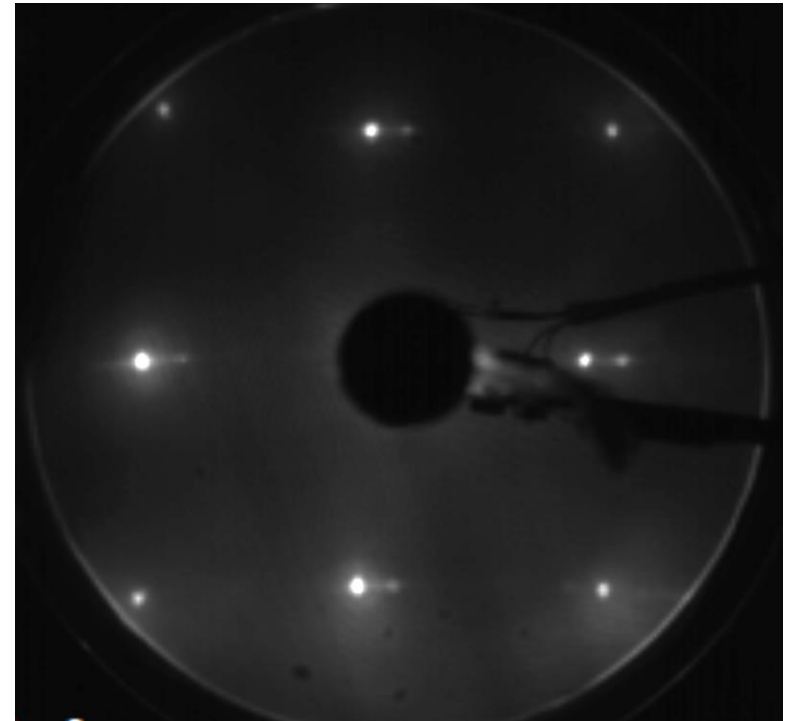
Cu(001) E= 78 eV



SPA LEED (Spot Profile Analysis)
- Man erhält Informationen
über die genaue
Beschaffenheit der Oberfläche



Cu(1,1,13)



3.3 Beugungsmethoden

Dynamic scattering theory

- Durch Berücksichtigung aller Streumöglichkeiten und der korrekten Geometrie, kann die Profilintensität von LEED-IV quantitativ vorausgesagt werden
- Vielfachstreuung und die Abnahme der Amplitude beim Durchgang in tiefere Schichten.

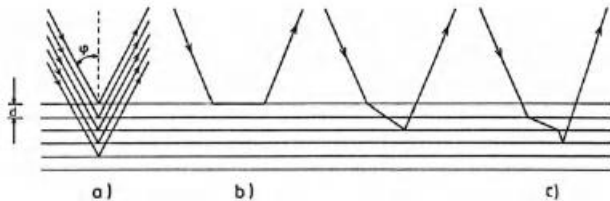


Abb. 3.7.3
Streuprozesse für die Intensitätsberechnung
a) Einfachstreuung
b) Zweifachstreuung in einer Schicht
c) Mehrfachstreuung

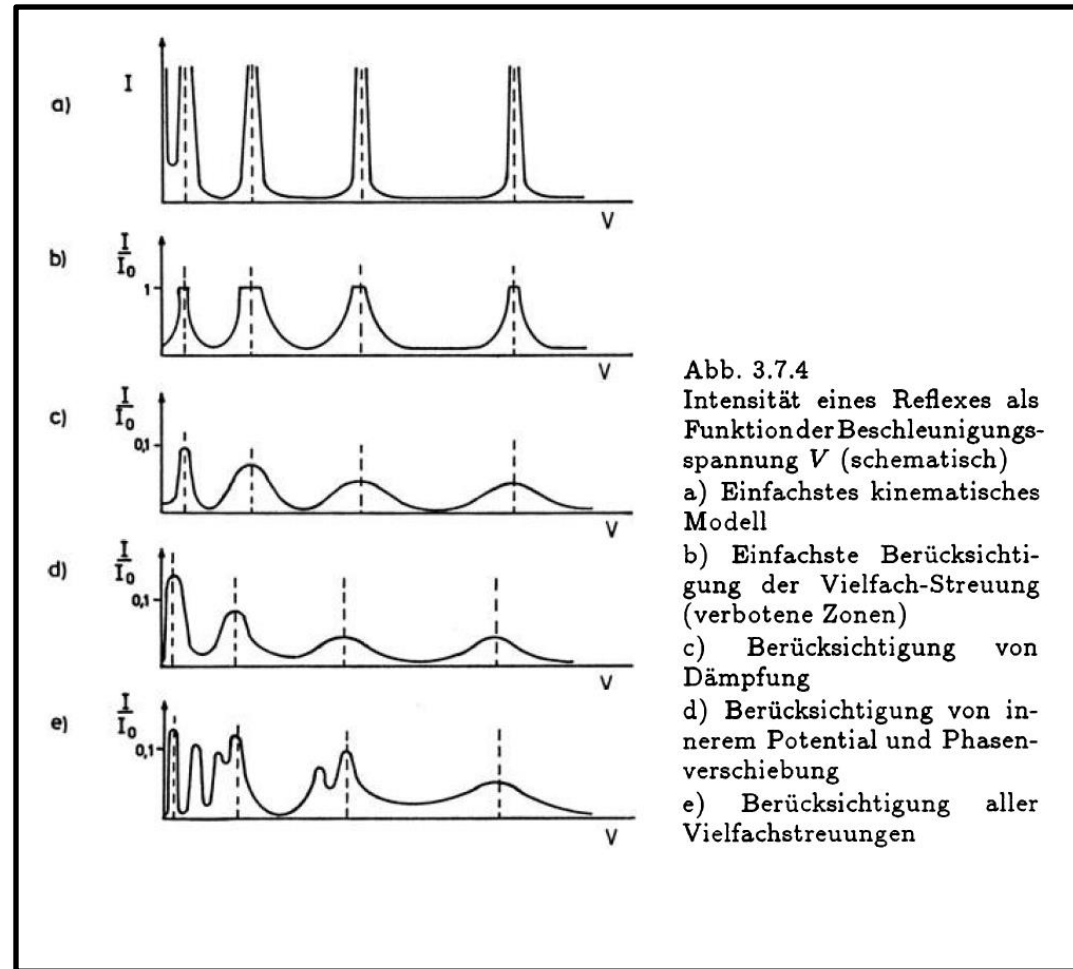
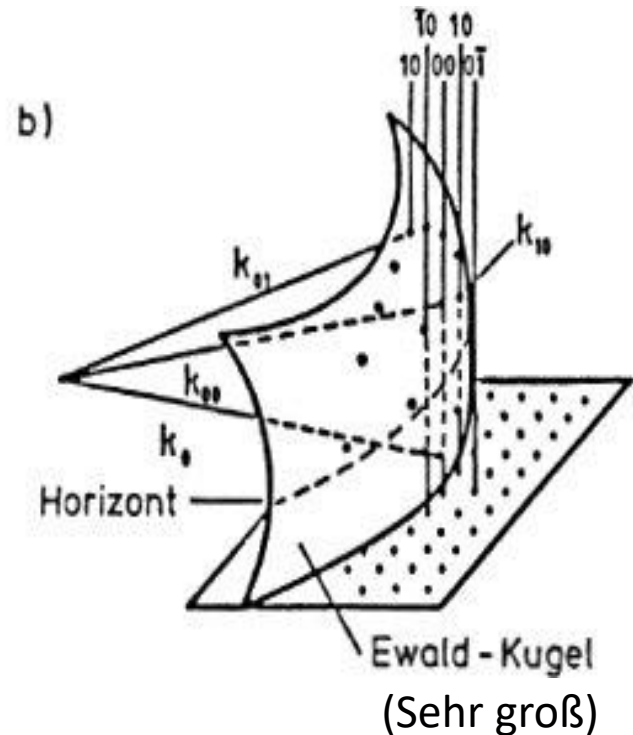


Abb. 3.7.4
Intensität eines Reflexes als Funktion der Beschleunigungsspannung V (schematisch)
a) Einfachstes kinematisches Modell
b) Einfachste Berücksichtigung der Vielfach-Streuung (verbotene Zonen)
c) Berücksichtigung von Dämpfung
d) Berücksichtigung von innerem Potential und Phasenverschiebung
e) Berücksichtigung aller Vielfachstreuungen

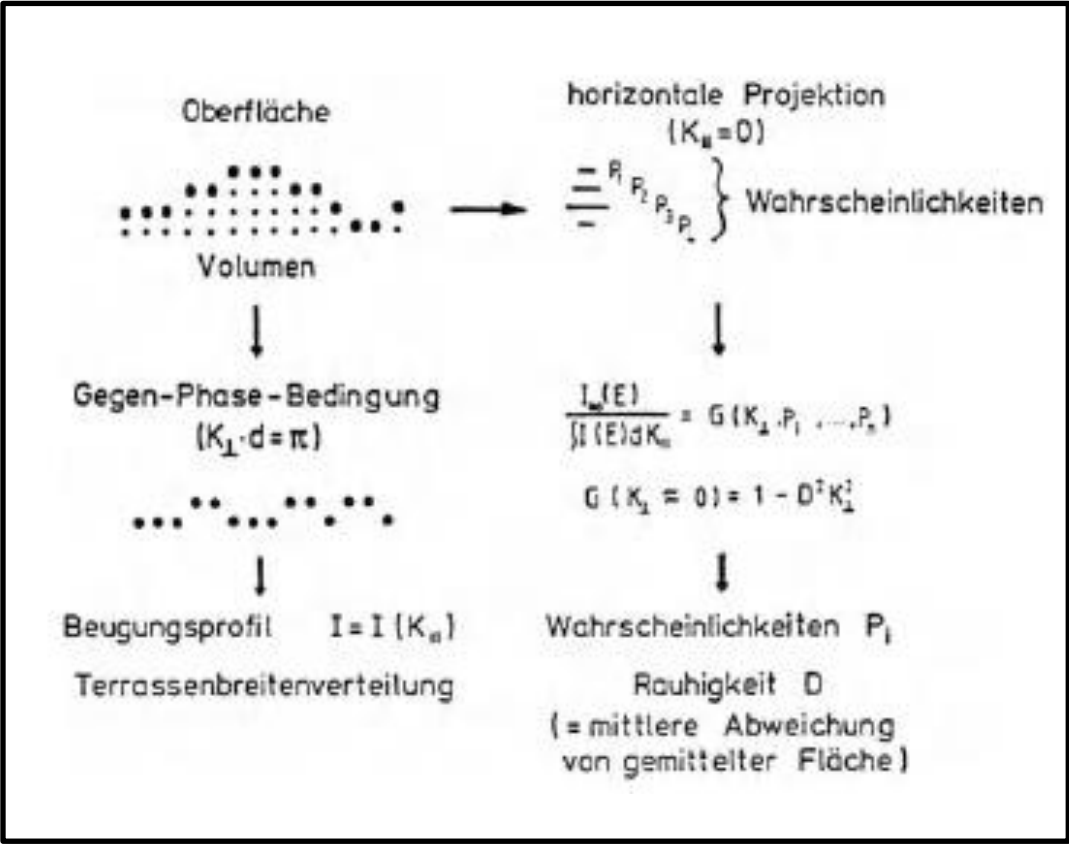
Khalil Zakeri-Lori und Philip Willke, Vorlesung „Oberflächenphysik“



- Henzler, S. 136

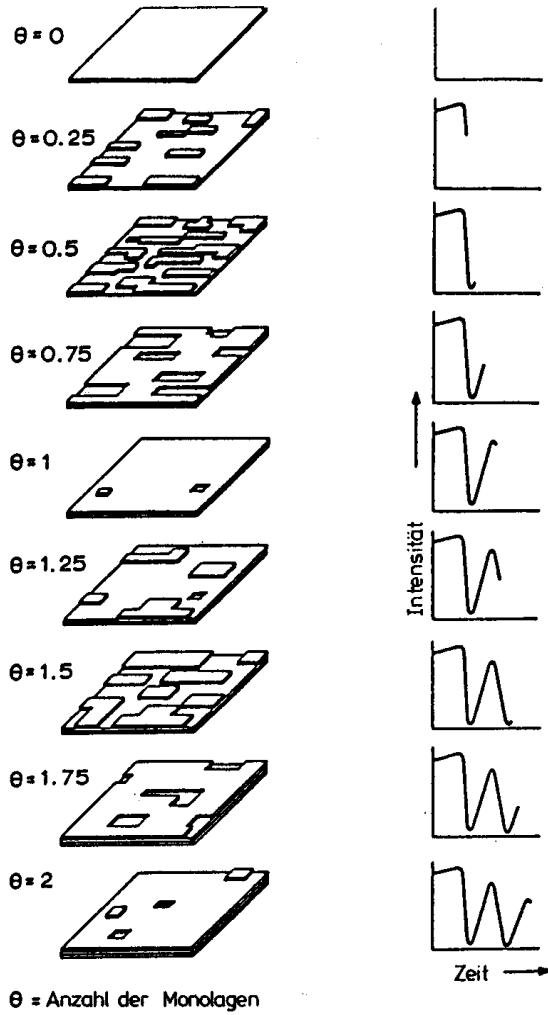
3.3 Beugungsmethoden

RHEED-Beugungsbilder von GaAs(110)- Flächen

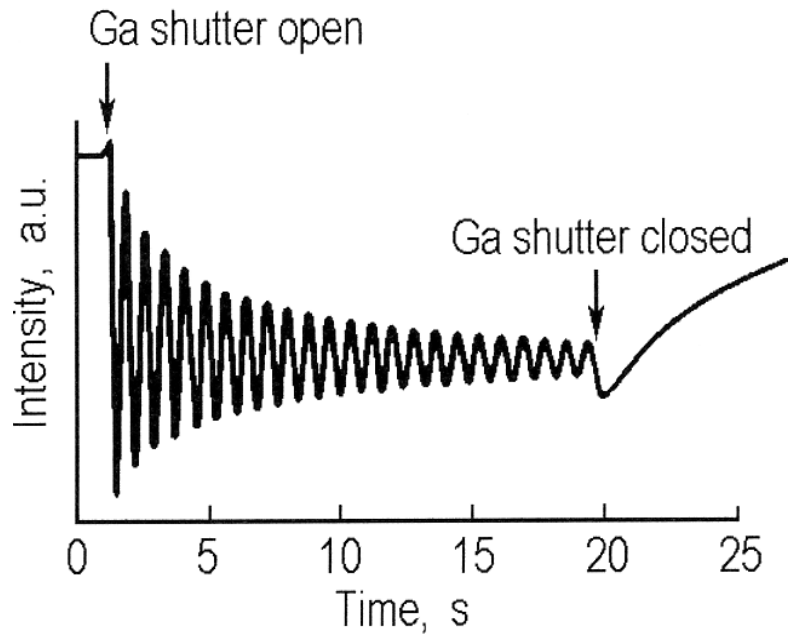


→ erhebliche Rauigkeit

Reflection High Energy Electron Diffraction (RHEED)

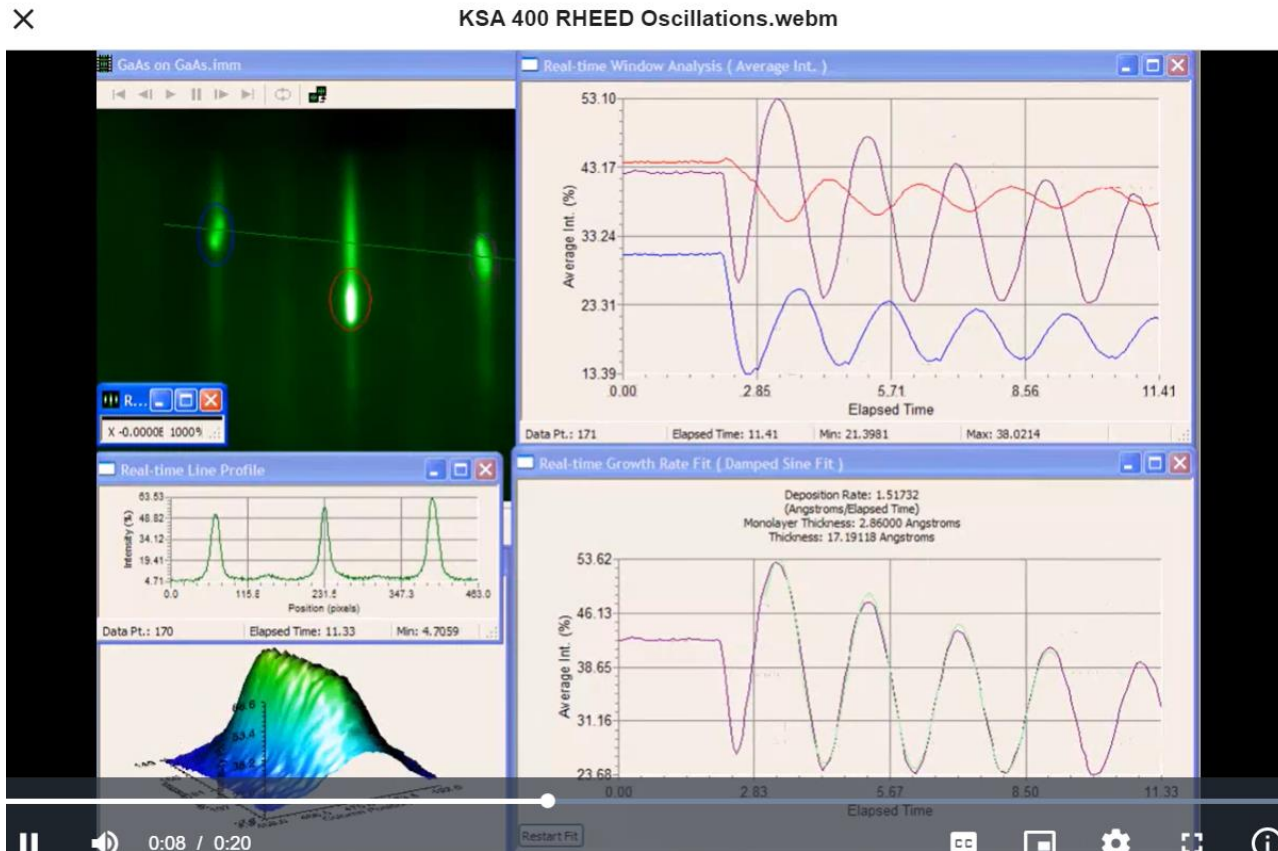


RHEED-Oszillationen
(während Kristallwachstum)



3.3 Beugungsmethoden

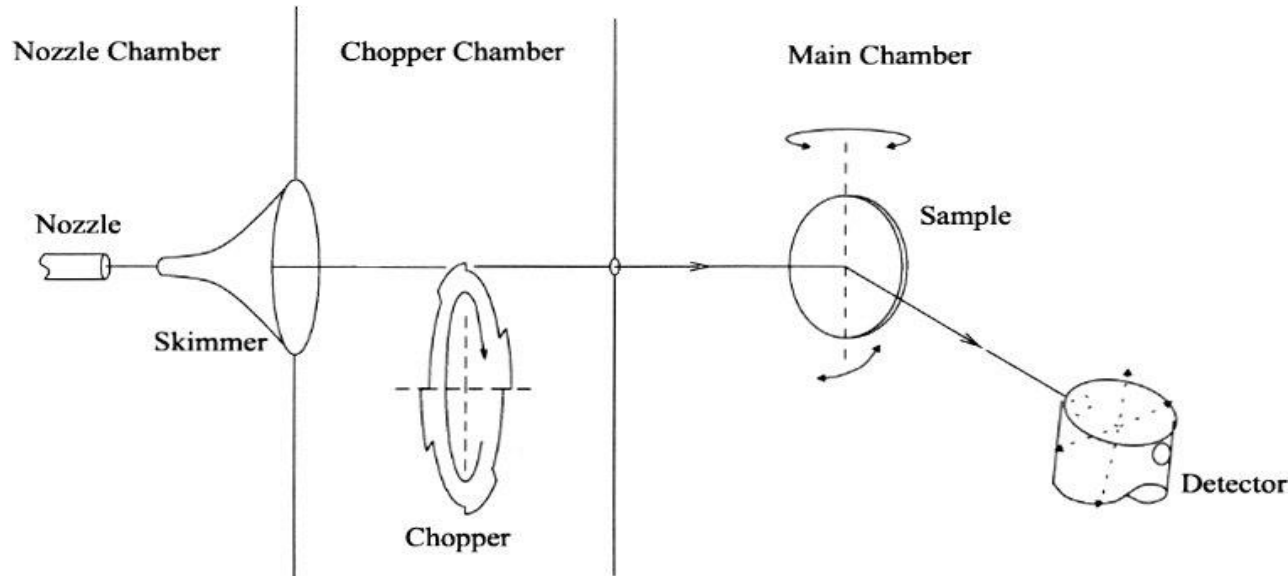
https://en.wikipedia.org/wiki/Reflection_high-energy_electron_diffraction



Heliumstreuung (TEAS)

Heliumstreuung (TEAS)

Thermal Energy Atom Scattering (TEAS)



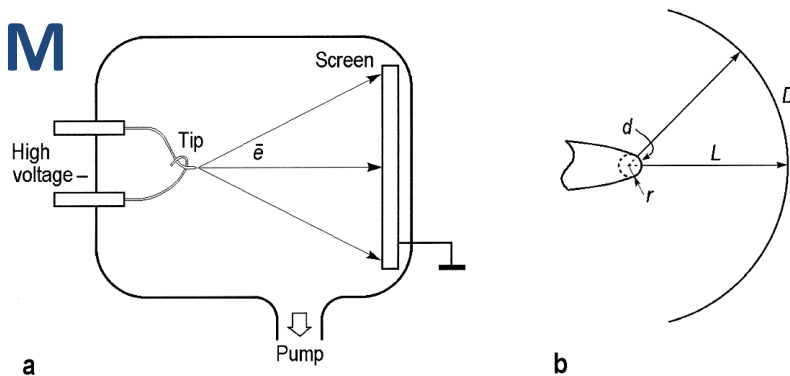
- Hauptsächlich mit den Atomen H, He, Ne und den Molekülen H₂, HD und D₂ durchgeführt.
- kleineren Masse → stärkere Streuung und wenig reaktiv

- He-Atom-Strahl: $\Delta E/E \sim 2\%$
- Einfallsendergie: 10-60 meV
- elastische und inelastische (time-of-flight) Messungen möglich

3.4 Frühe Abbildungstechniken im Realraum

Feldemissionsmikroskopie (FEM) und Feldionenmikroskopie (FIM)

FEM



Vergrößerung = L / r
(bis etwa 20 Å; wegen thermischer
Geschwindigkeit der Elektronen)

- Scharfe Nadel mit mittlerem Radius von 10 - 100 nm
- Elektrisches Feld ($U = 1\text{-}10\text{ keV}$)
- Felderhöhung an der Spitze

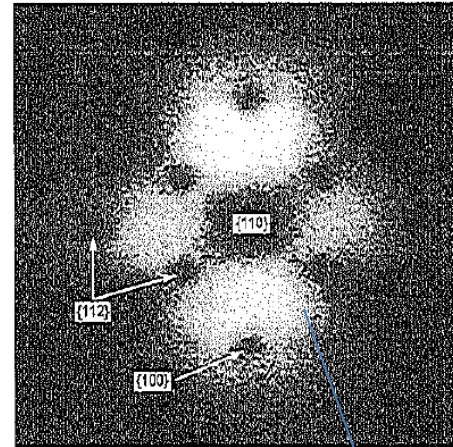
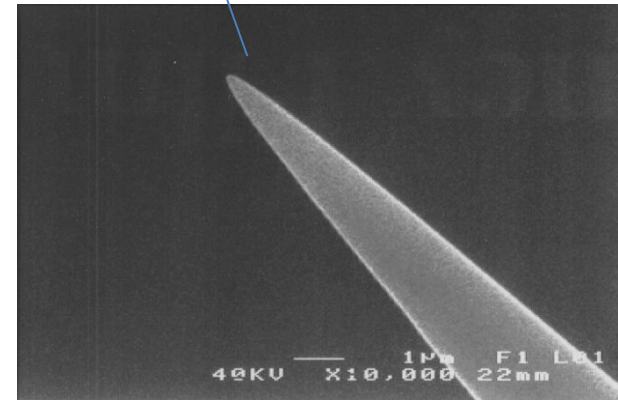
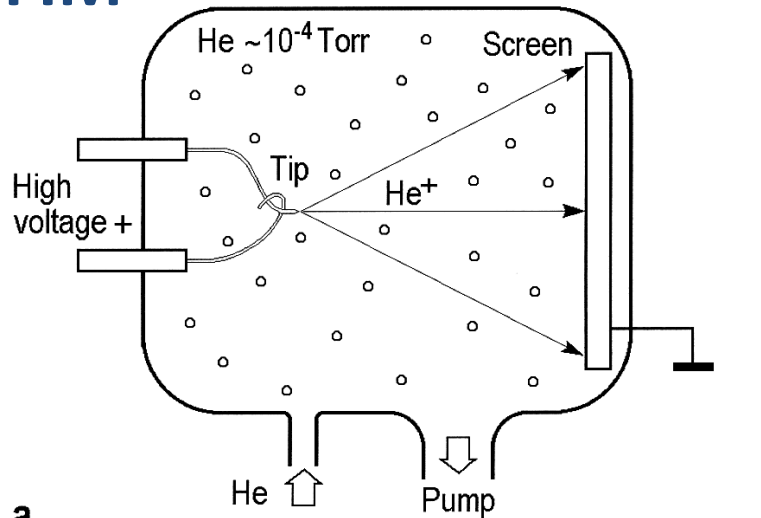


Fig. 7.2. Field emission microscopy pattern of a clean $\{110\}$ oriented tungsten surface, showing the location of various crystal planes (after Müller [7.1])

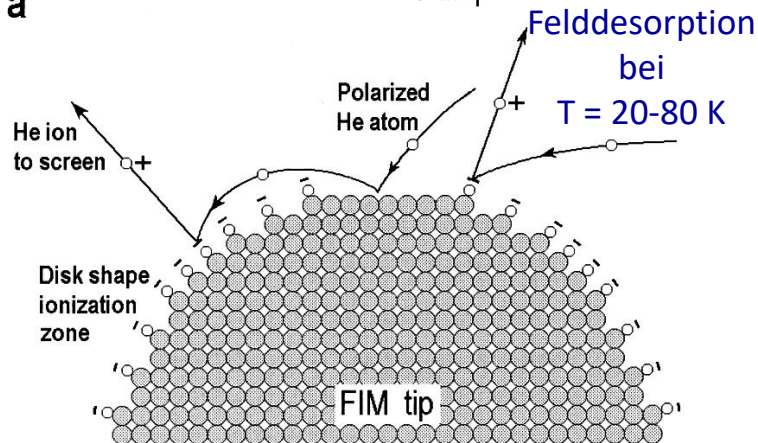


Feldemissionsmikroskopie (FEM) und Feldionenmikroskopie (FIM)

FIM



a



b

○ Helium atom ● Metal atom

- Ähnlich wie FEM, aber unter Anwesenheit eines „Imaging Gas“ (z.B. He oder Ne bei 10^{-2} Pa)
- Spitzenpotential ist jetzt positiv
- Auflösung bis etwa 1-3 Å (atomare Auflösung)
- Polarisierung der He Atome durch das Starke Feld

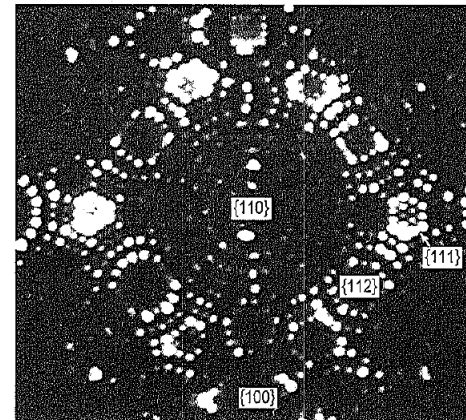
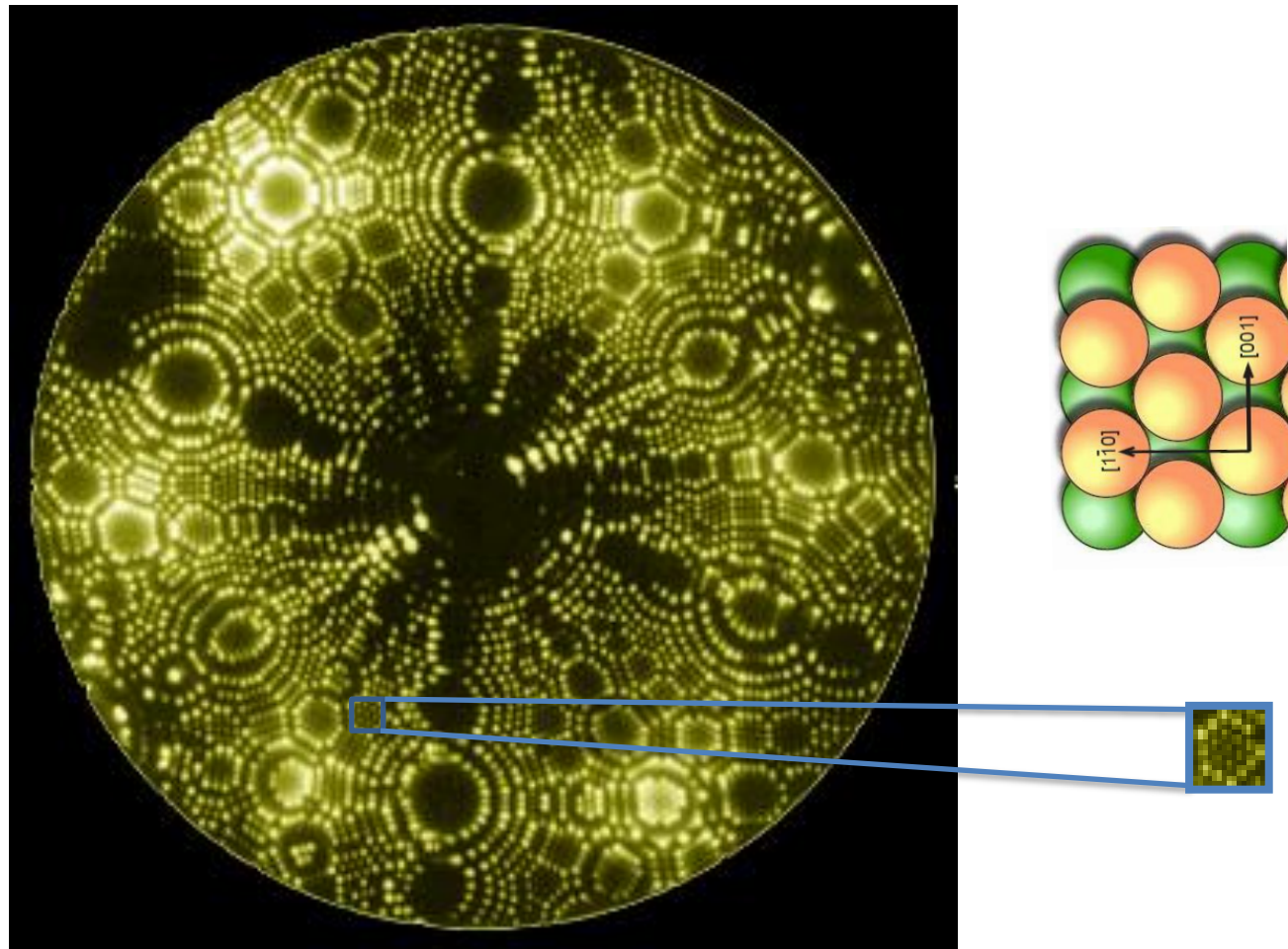


Fig. 7.4. FIM image of a W tip of radius ~ 120 Å acquired at 21 K using a He-H₂ mixture as the imaging gas (after Tsong and Sweeney [7.3])

3.4 Frühe Abbildungstechniken im Realraum

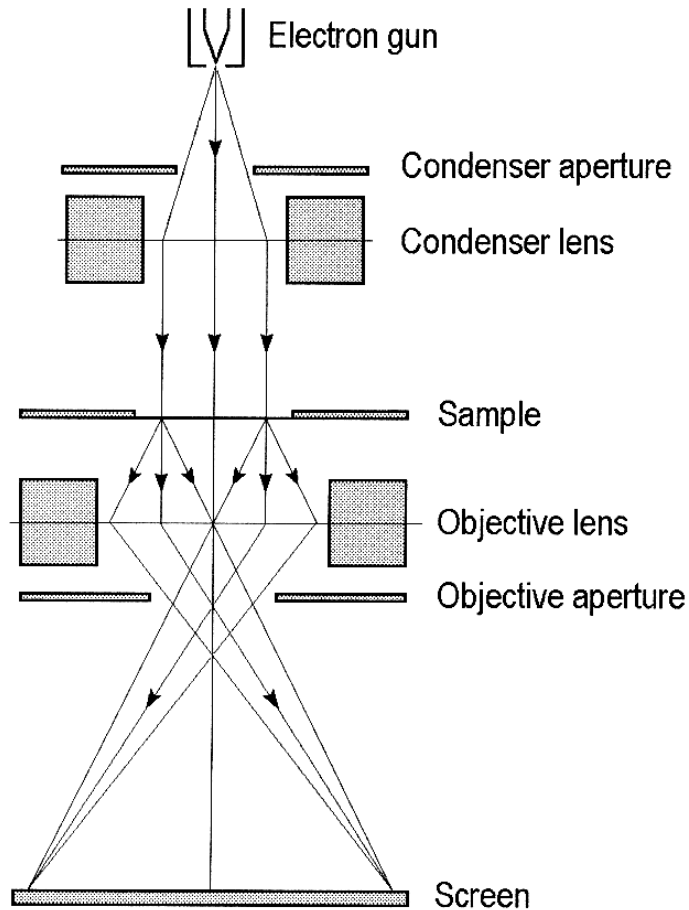
Feldionenmikroskopie (FIM)



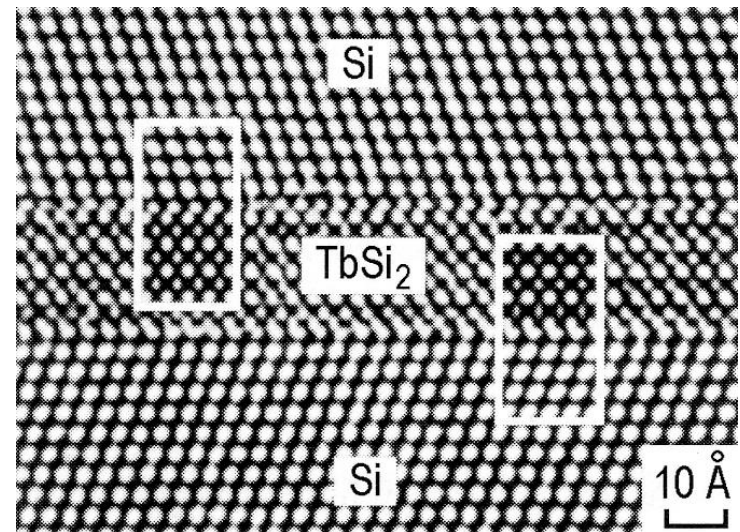
FIM-Aufnahme einer W-Spitze
(helle Punkte entsprechen Atomen)

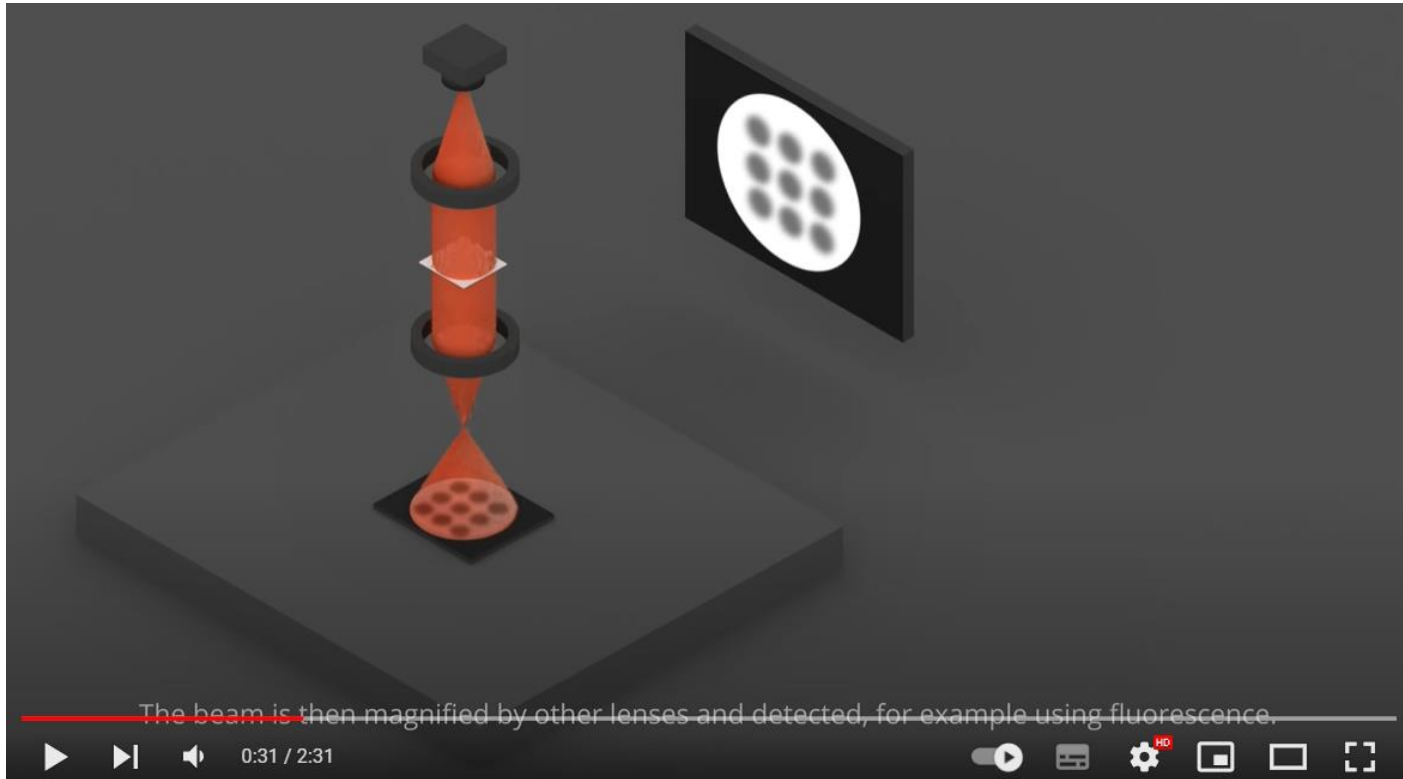
3.5 Transmissionselektronenmikroskop

TEM



- Elektronen ($E_{\text{kin}} = 50\text{-}200 \text{ keV}$) durchstrahlen Probe ($d = 100\text{-}1000 \text{ \AA}$)
- Funktionsweise analog zu optischem Mikroskop (jedoch magnetische Linsen)
- Beugungslimit: $0,5 \lambda / \sin \alpha \approx 2 \text{ \AA}$ (idealisiert)
- Nicht anwendbar bei dicken Proben

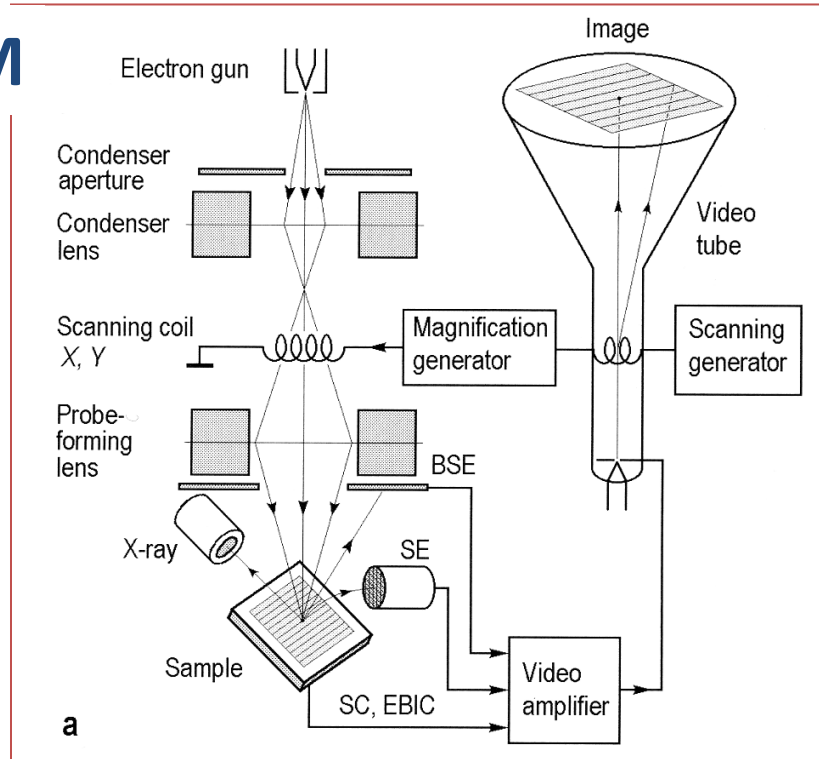




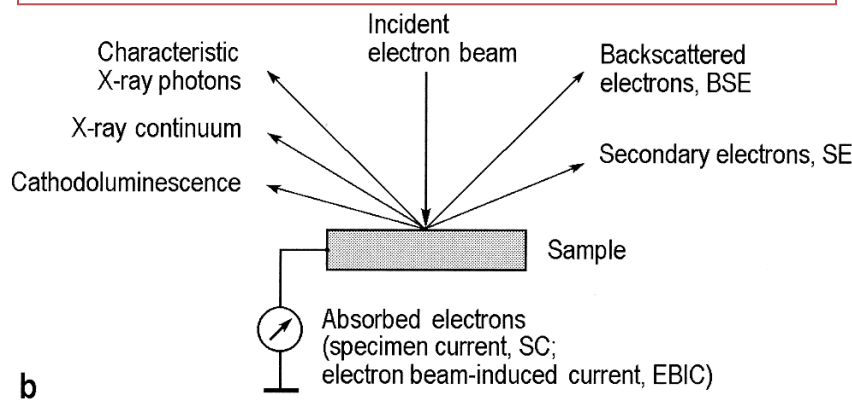
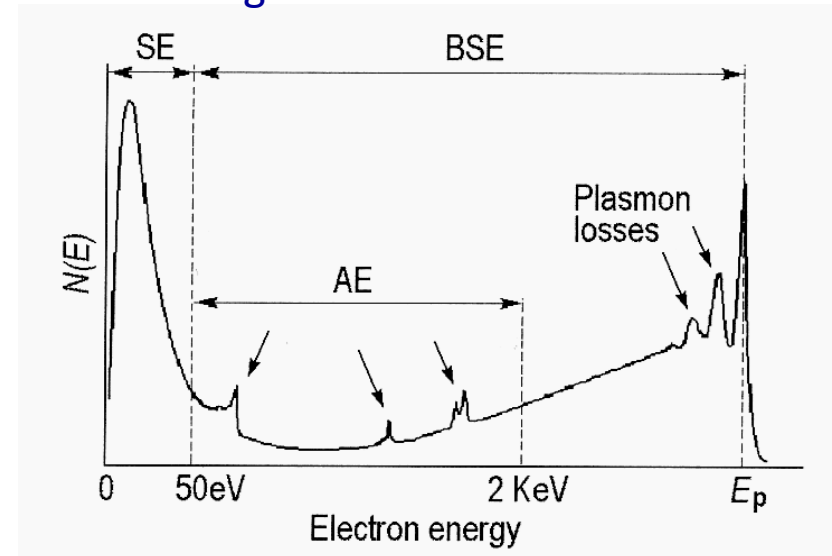
<https://www.youtube.com/watch?v=fQJYuTpK8Fs>

3.6 Rasterelektronenmikroskop

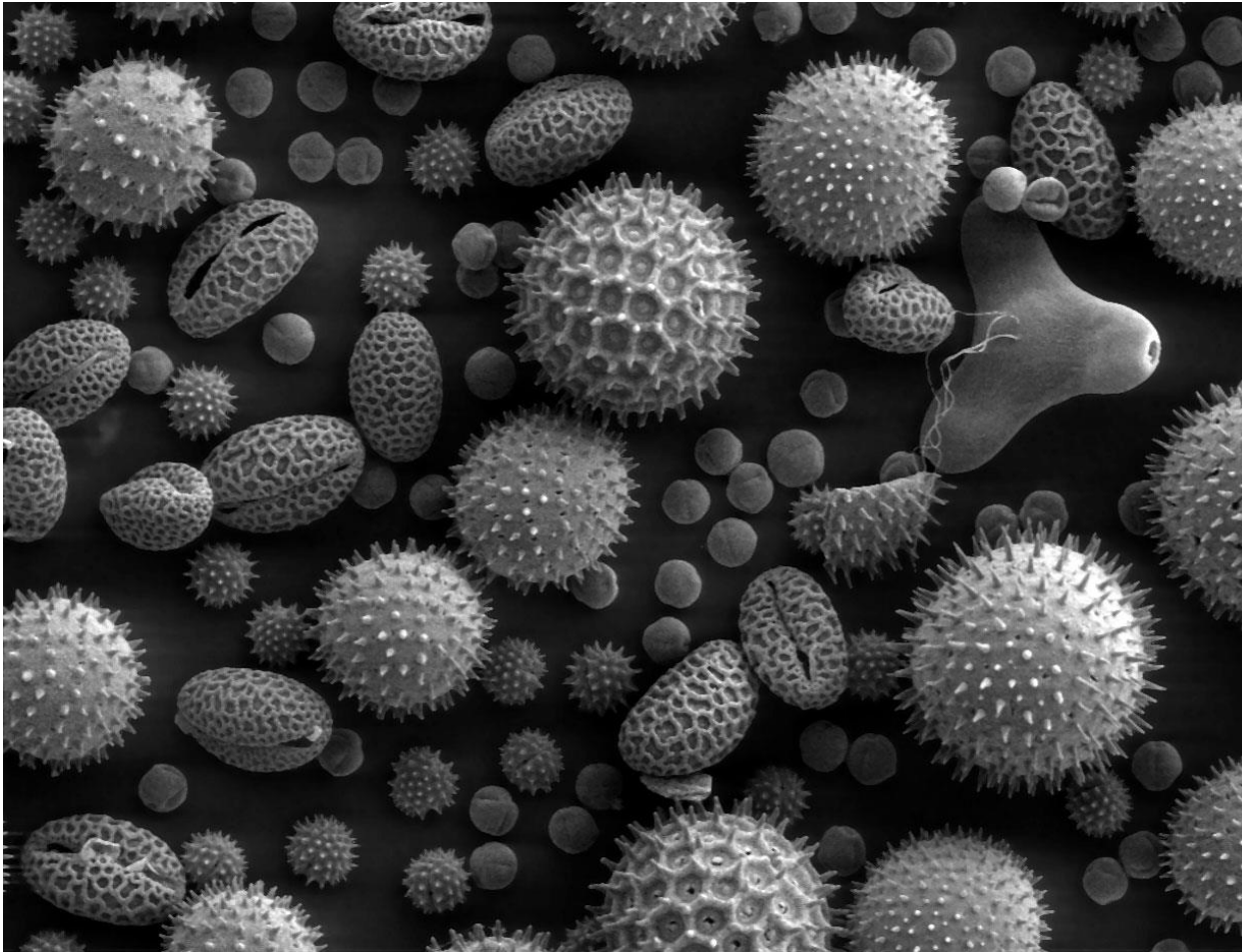
SEM



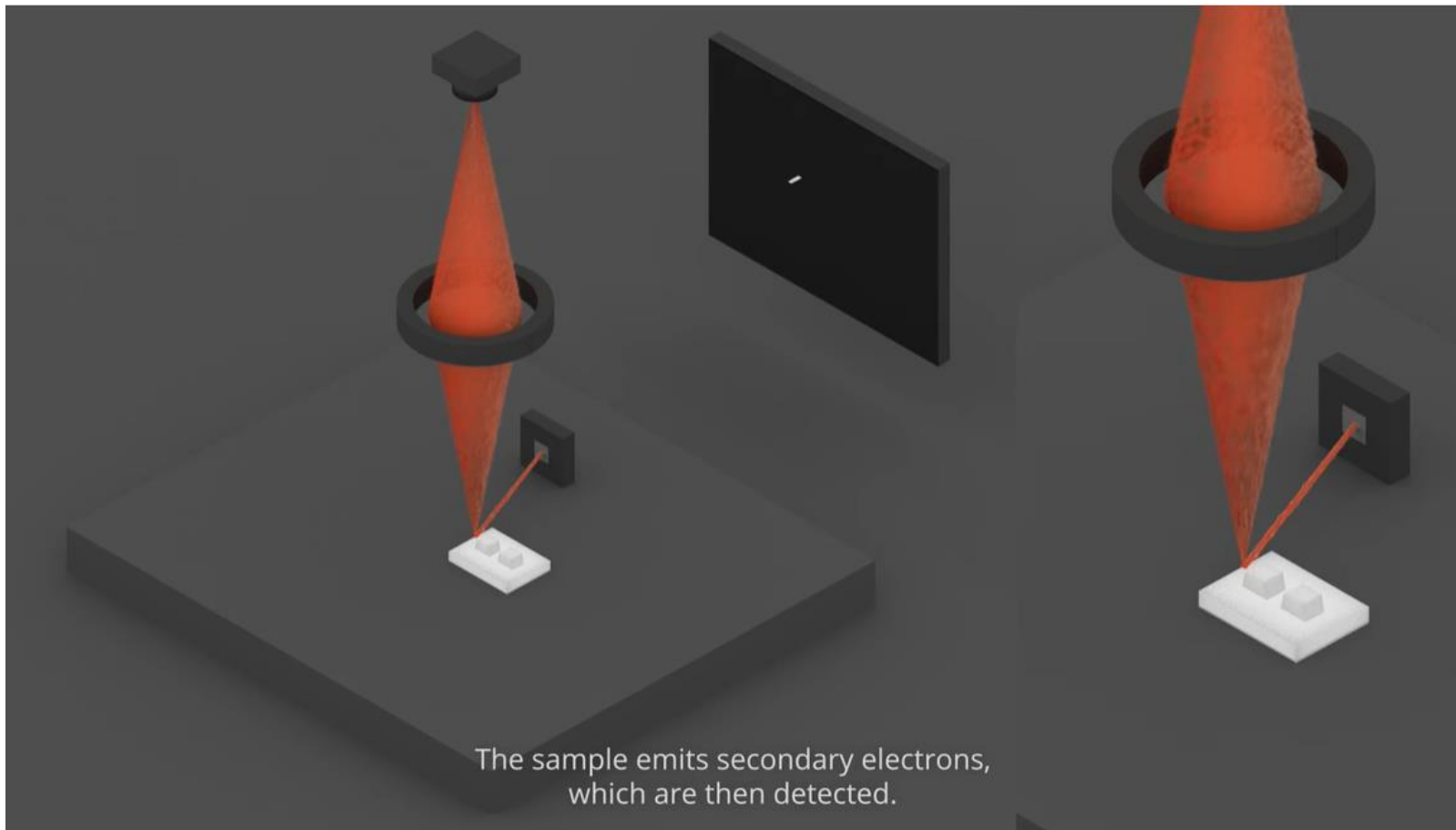
- Elektronenstrahl (1-10 keV) fokussiert auf Probe (Durchmesser 10-100 Å)
- Rastern des Strahls
- Nachweis von zurückgestreuten Elektronen, Auger-Elektronen (elementspezifisch), oder Fluoreszenz-Röntgenphotonen
- Abbildung auf Bildschirm



SEM



https://en.wikipedia.org/wiki/Scanning_electron_microscope



<https://www.youtube.com/watch?v=uQ1gClkCblQ>

3.7 Rastertunnelmikroskopie

Der “Topografiner”: Ein Instrument zur Messung der Mikrotopographie einer Oberfläche

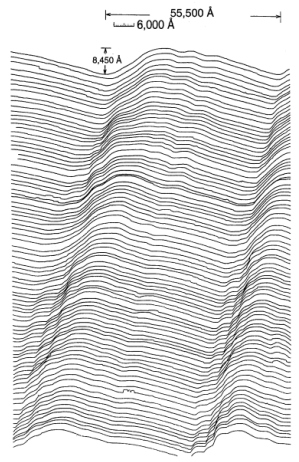
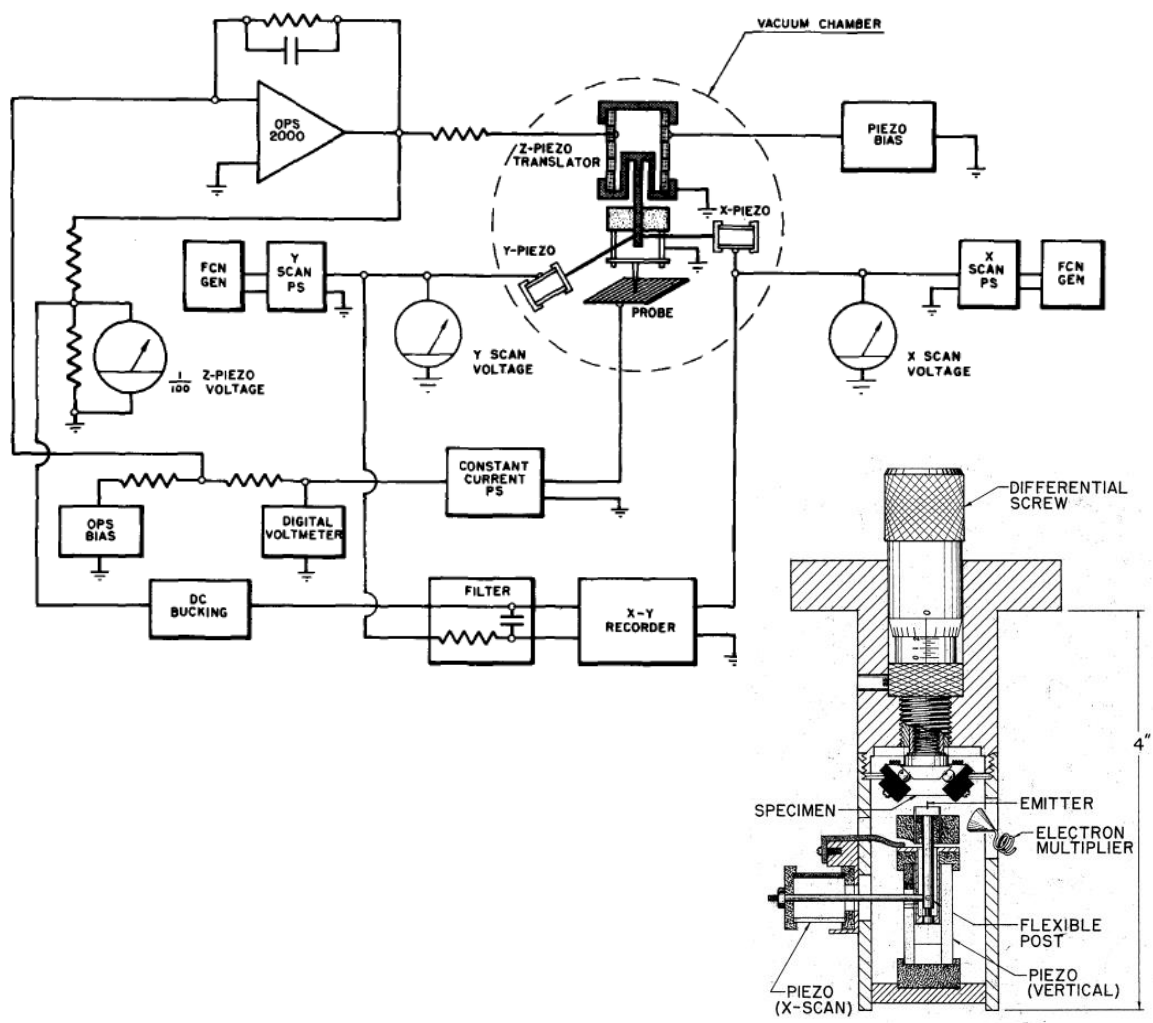


Fig. 4. Topographic map of ruled diffraction grating with the Topografiner. Labeled distances are in angstroms. 1 Å = 0.1 nm. (From Ref. [1]).



Russell Young, John Ward, and Fredric Scire

3.7 Rastertunnelmikroskopie

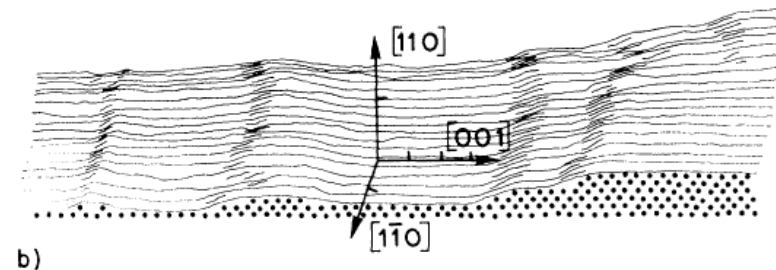
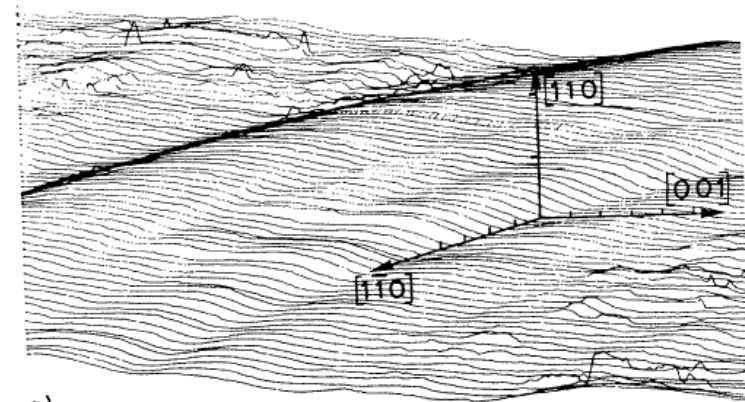
Erfindung der Rastertunnelmikroskopie Nobel Preis für Physik 1986



Heinrich Rohrer und Gerd Binnig

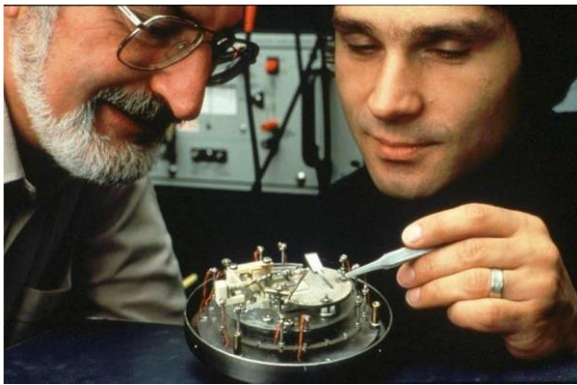
- atomare Auflösung in z-Richtung
- laterale atomare Auflösung

atomare Stufen auf Au(110)



3.7 Rastertunnelmikroskopie

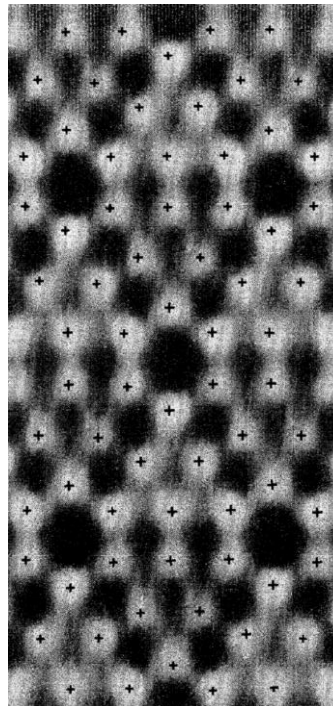
Erfindung der Rastertunnelmikroskopie Nobel Preis für Physik 1986



Heinrich Rohrer und Gerd Binnig

- atomare Auflösung in x,y und z-Richtung

Si111 7x7



2 Stunden nach der
Nobelpreis-Ankündigung

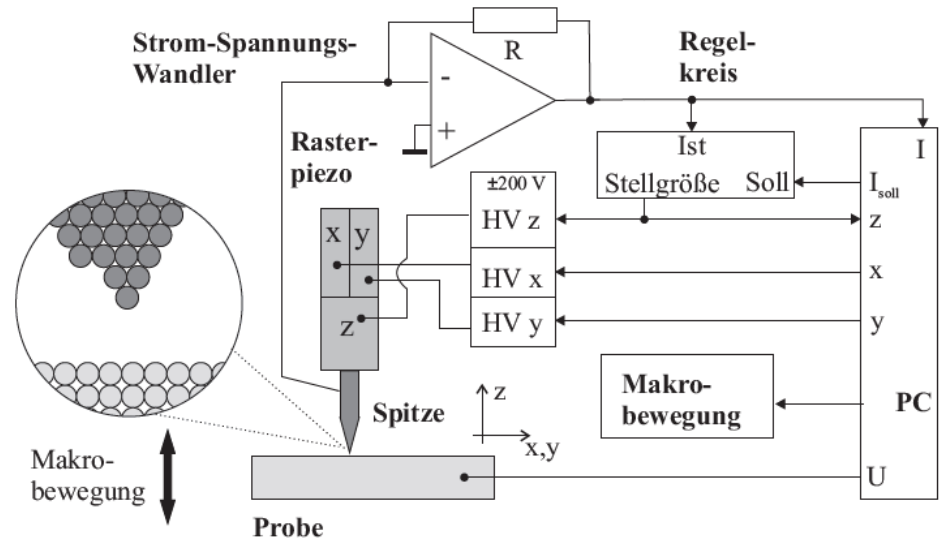
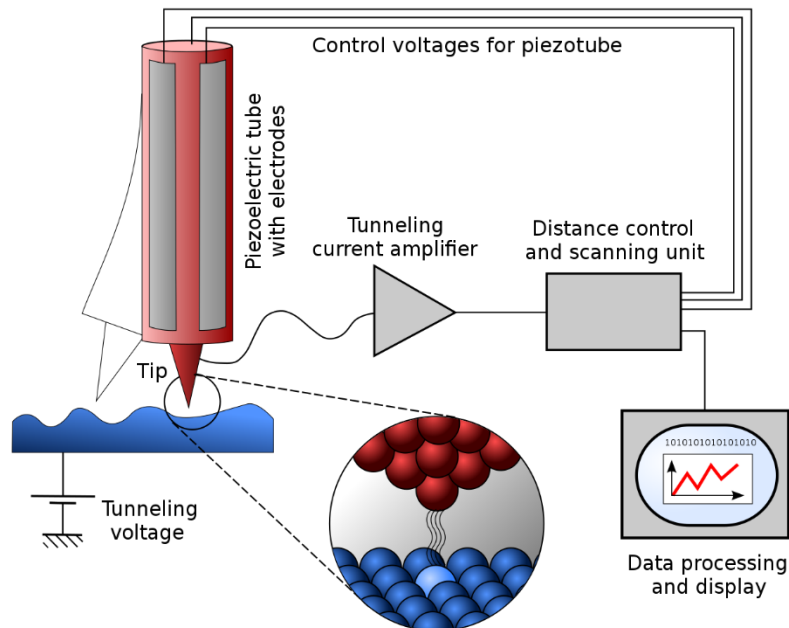


Binnig, Rohrer et al. Phys. Rev. Lett. 50(2) 1983

3.7 Rastertunnelmikroskopie

Prinzip

- Misst atomare **und** elektronische Struktur der Probe (und der Spitze...)
- Spitze wird in die Nähe der Oberfläche einer zu untersuchenden Probe gebracht und „gerastert“
- Die Wechselwirkung zwischen Probe und Spitze wird mit Hilfe eines Regelkreises konstant gehalten (Tunnelstrom oder Kraft)
- Ein RTM (STM) misst den quantenmechanischen Tunnelstrom



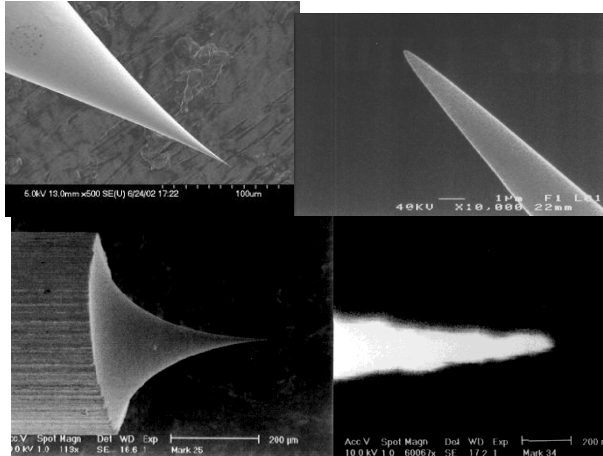
Wiki

Fauster, S. 128

3.7 Rastertunnelmikroskopie

Zutaten

- **Spitze:** Spitzen aus Wolfram oder einer Platin-Iridium-Legierung – geformt durch elektrochemischen Ätzprozess oder auch nur durch einfaches Zerreißen oder Schneiden des Drahtes geformt
- **IU-Konverter:** Messung des Tunnelstroms: Tunnelstrom ~ 10 pA bis 1 μ A kann durch einen Operationsverstärkerschaltungen in eine Spannung verwandelt werden.
- **Tunnelspannung:** liegt im Bereich von wenigen Millivolt bis einigen Volt und kann über einen Digital-Analog-Wandler vom PC realisiert werden.



Scharfe und regelmäßige Spitzen durch Ätzen eines W Drahts

Verstärker der Fa. Femto

VARIABLE GAIN LOW NOISE CURRENT AMPLIFIER DLPCA-200



Products | Current Amplifiers | Variable Gain up to 500 kHz - DLPCA

<https://www.femto.de/en/products/current-amplifiers/variable-gain-up-to-500-khz-dlpga.html>

3.7 Rastertunnelmikroskopie

Literatur

STM Ibach S. 55

Henzler S. 114 - 116

Fauster S. 127 – 134

Chen: Introduction to Scanning Tunneling Microscopy

ausgiebige Webseite zu STM der FAU Erlangen

<https://www.archive.fkp.physik.nat.fau.eu/methoden/stmtutor/stmpage.html>

Tunneleffekt:

<https://www.youtube.com/watch?v=K64Tv2mK5h4>

Typ, der sein eigenes STM Zuhause gebaut hat

<https://dberard.com/>

Videos über das Nanocar Race

<https://av.tib.eu/media/50309>