

Elektronenmikroskopie II

Yolita Eggeler

Microscopy of Nanoscale Structures & Mechanisms (MNM),
Laboratorium für Elektronenmikroskopie (LEM),
Gebäude 30.25, Raum 215; Tel: 608-43724; Email: yolita.eggeler@kit.edu

1. Rasterelektronenmikroskopie

1.1 Funktionsprinzip des Rasterelektronenmikroskops

1.2 Wechselwirkung zwischen Primärelektronen und Probe

1.3 Apparative Aspekte

1.4 Abbildungsmodi

Abbildung mit Rückstreuelektronen

Abbildung mit Sekundärelektronen

Channeling (Orientierungskontrast)

EBSD: Electron Backscatter Diffraction

1.5 Environmental (Niederdruck) Rasterelektronenmikroskopie

1.6 Abbildung mit elektronenstrahlinduzierten Strömen (EBIC: electron-beam induced currents)

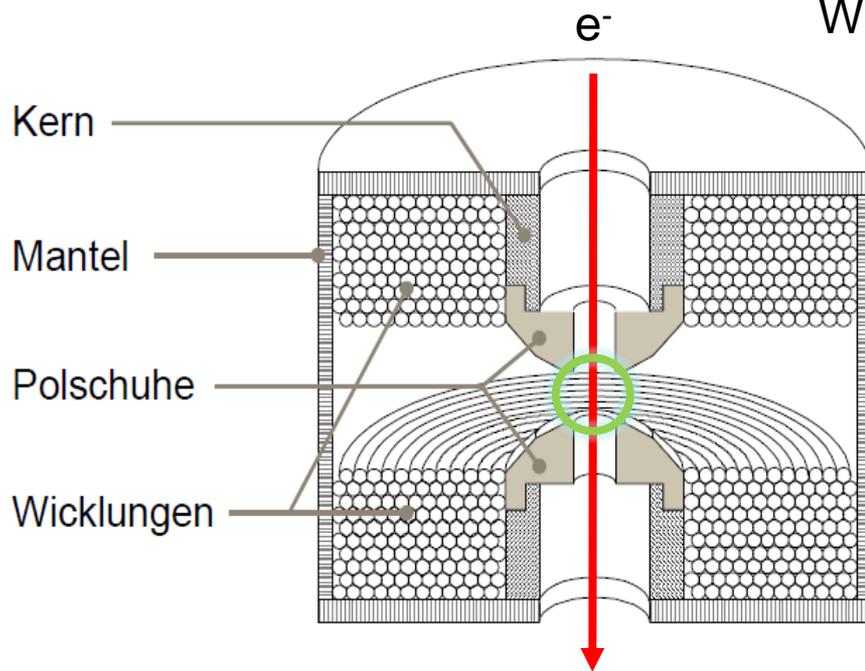
1.7 Kathodolumineszenz

1.8 Prüfen elektronischer Bauelemente

1.9 Elektronenstrahlolithographie

1.3 Apparative Aspekte

Magnetische Elektronenlinsen



Magnetfeldstärke (B) in einer Spule mit Windungen (N), Länge (L) und Stromfluss (I):

$$\vec{B} = \mu_0 * N * \frac{I}{L}$$

μ_0 : magnetische Permeabilität des Vakuums

Lorentzkraft

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

\vec{v} : Elektronengeschwindigkeit
 \vec{B} : Magnetfeld

- Einfache Elektronenlinsen in Rasterelektronmikroskopen bestehen oft nur aus einer Spule
- Bewegung der Elektronen auf Spiralbahnen
- Variation der Magnetfeldstärke und Brennweite durch Änderung des Linsen(spulen)stroms
- Magnetfeld hat fokussierende Wirkung
- Elektronenlinsen haben schlechte optische Eigenschaften: starker Öffnungsfehler und starker Farbfehler sowie zahlreiche Abbildungsfehler höherer Ordnung

1.3 Apparative Aspekte

Abbildungsfehler

d_s : Fehlerscheibchen mit dem kleinsten Durchmesser (disk of least confusion)

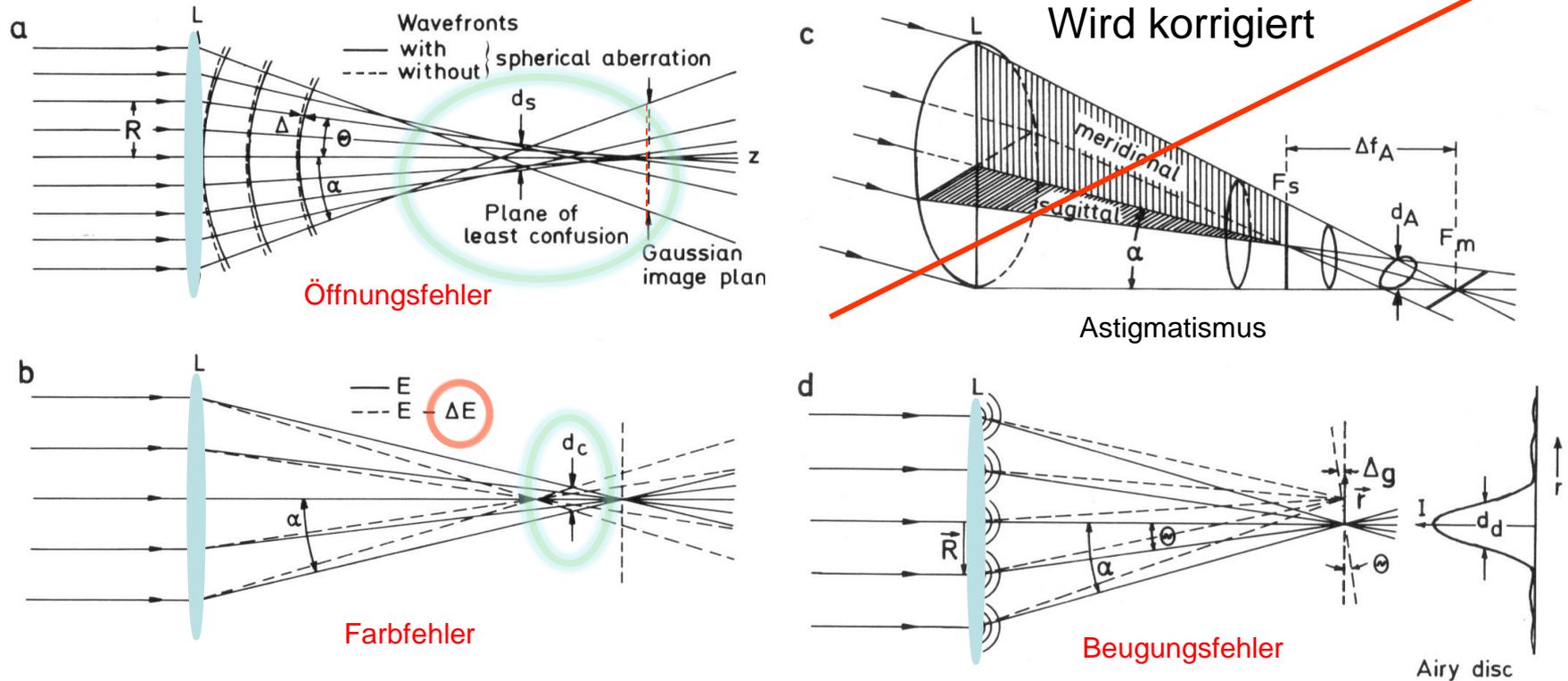
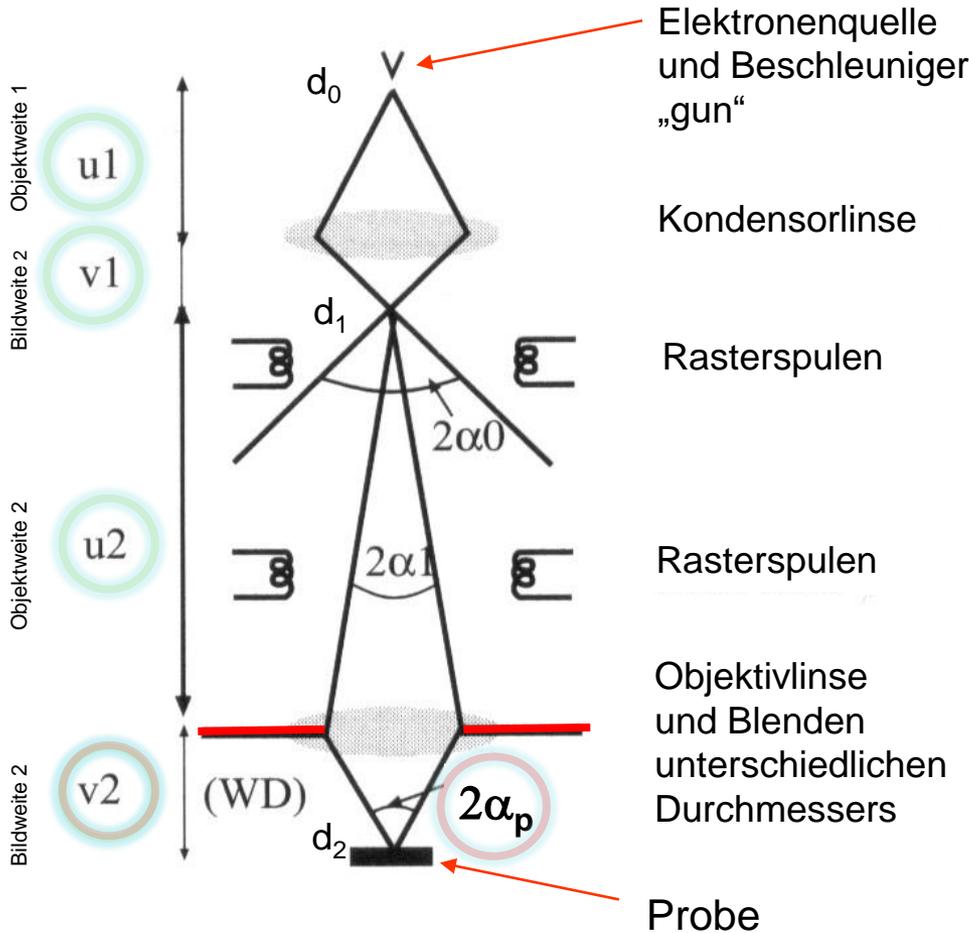


Fig. 2.9a–d. Lens aberration of an electron lens: (a) spherical and (b) chromatic aberration, (c) axial astigmatism and (d) diffraction error disc

L. Reimer, Scanning Electron Microscopy, Abb.2.29

1.3 Apparative Aspekte

Geometrischer Strahldurchmesser: d_2



Ziel: verkleinerte Abbildung der Elektronenquelle auf die Probenoberfläche.

Geometrische Optik:

$$d_1 = d_0 \cdot \frac{v_1}{u_1}$$

$$d_2 = d_1 \cdot \frac{v_2}{u_2}$$

v_2 : Arbeitsabstand

d_0 : Durchmesser der Quelle

$v_1 + u_2 = \text{konst}$

Strahldurchmesser wird durch Nutzer festgelegt durch

a) Anregung (Brennweite) der Kondensorlinse „spot size“

b) Arbeitsabstand

($v_2 = \text{WD}$ „working distance“)

P.J. Goodhew, J. Humphreys, R. Beanland,
„Electron Microscopy and Analysis“, Abb.5.11

1.3 Apparative Aspekte

Strahldurchmesser auf der Probe d_p

$$d_p = \sqrt{d_2^2 + d_s^2 + d_c^2 + d_b^2}$$

d_2 : Geometrischer Strahldurchmesser auf der Probenoberfläche durch Verkleinerung der Quelle

d_s : Durchmesser des Öffnungsfehlerscheibchens („disk of least confusion“)

d_b : Durchmesser des Beugungsfehlerscheibchens

d_c : Durchmesser des Farbfehlerscheibchens

$$d_p = \sqrt{C_o^2 \frac{1}{\alpha_p^2} + \frac{1}{4} C_s^2 \alpha_p^6 + \left(C_c \frac{\Delta E}{E_0} \right)^2 \alpha_p^2 + \frac{[0.6\lambda]^2}{\alpha_p^2}}$$

$$\sin \alpha_p = \frac{r}{WD} \approx \alpha_p$$

α_p : Öffnungswinkel des Strahlenbündels durch Objektivblendenradius r (bis zu 100 μm) und Arbeitsabstand WD (einige mm) gegeben

C_s : Öffnungsfehlerkonstante der Objektivlinse

C_c : Farbfehlerkonstante der Objektivlinse

E_0 : Primärelektronenenergie

ΔE : Halbwertsbreite der Energieverteilung der Primärelektronen

1.3 Apparative Aspekte

Zusammenhang zwischen **geometrischem Strahldurchmesser d_2** , **Strahlstrom I_p**
Und Konvergenzwinkel α_p :

$$I_p = \frac{\pi}{4} d_2^2 j_p = \frac{\pi^2}{4} \beta d_2^2 \alpha_p^2$$

$$d_2 = \left(\frac{4I_p}{\pi^2 \beta} \right)^{\frac{1}{2}} \frac{1}{\alpha_p} = C_o \frac{1}{\alpha_p}$$

$$\beta = \frac{j_p}{\pi \alpha_p^2} = \text{konst}$$

β : Richtstrahlwert = Konstante (Charakteristikum der Elektronenquelle)

j_p : Strahlstromdichte

Wichtige Faktoren für minimal erreichbaren Strahldurchmesser:

- Linsenqualität C_s , C_c (wenige 1 mm für gute REM Linsen)
- Eigenschaften des Elektronenemitters ($\Delta E, \beta$)

1.3 Apparative Aspekte

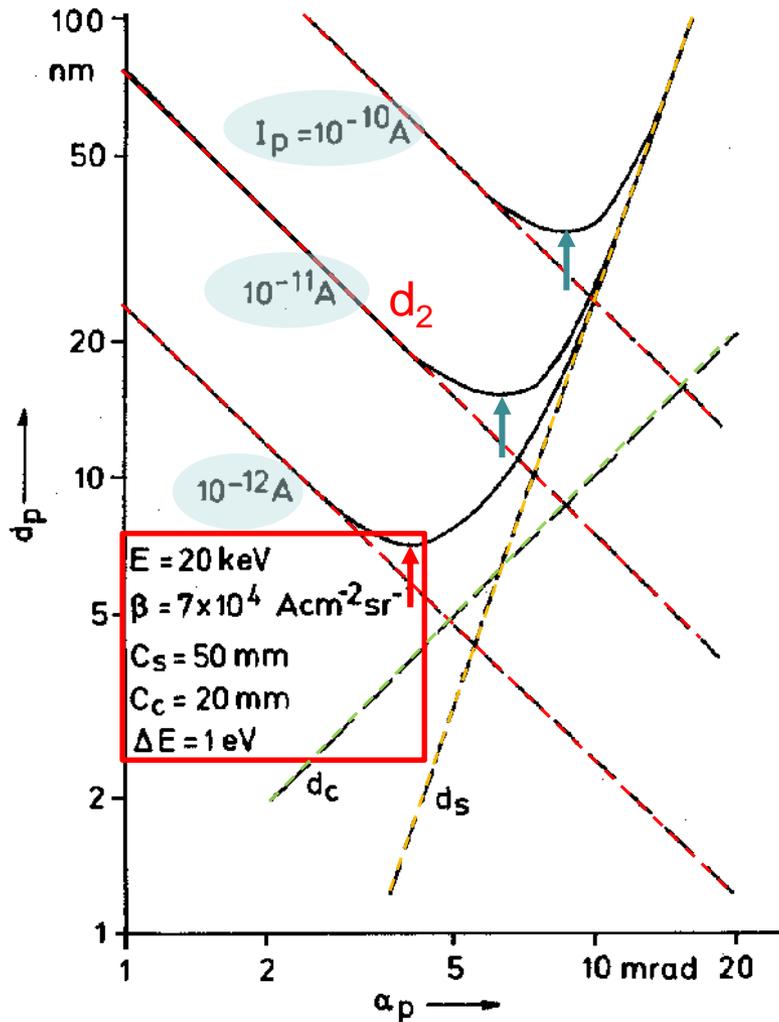


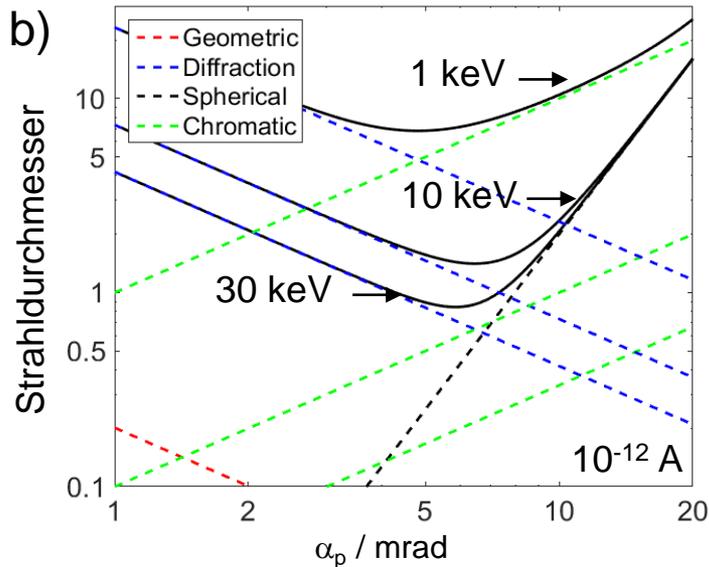
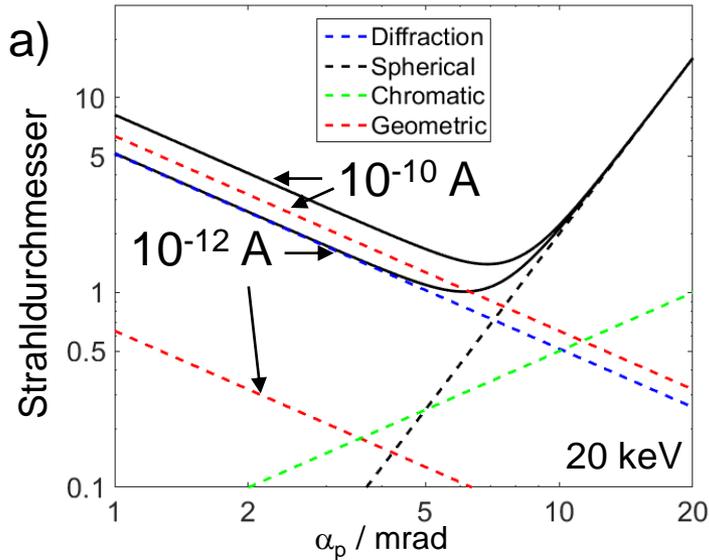
Fig. 2.12. Electron-probe diameter d_p as a function of electron-probe aperture α_p for different values of constant electron-probe current I_p

- Öffnungsfehler und geometrischer Strahldurchmesser relevant für d_p für gegebene Eigenschaften von Linse und Elektronenquelle
- Farbfehler und Beugungsfehler ($\sim 0.6 \lambda / \alpha_p$) sind hier vernachlässigbar
- Es gibt optimalen Wert von α_p für minimalen Strahldurchmesser

I_p kann wegen Reduzierung des Signal/Rausch-Verhältnisses nicht beliebig verkleinert werden!

Gezeigte Daten für veraltetes System
 Heute: bessere Linsen (kleinere C_s, C_c)
 bessere Elektronenquellen (höhere β)

1.3 Apparative Aspekte



Strahldurchmesser als Funktion des Konvergenzwinkels α_p für

- a) Unterschiedliche Strahlströme I_p
- b) Unterschiedliche Elektronenenergien

- Öffnungsfehler und Beugungsfehler für Strahldurchmesser relevant bei hohem E_0 and β
- Farbfehler wichtig für niedrige E_0
- Geometrischer Durchmesser vernachlässigbar für moderate I_p

I_p kann wegen Reduzierung des Signal/Rausch-Verhältnisses nicht beliebig verkleinert werden!

Daten für ein typisches, gutes, FEG-REM:

$$C_S = 4 \text{ mm}$$

$$C_C = 2 \text{ mm}$$

$$\Delta E = 0.5 \text{ eV}$$

- (a) $\beta = 1 \cdot 10^8 \text{ A}/(\text{cm}^2\text{sr})$
- (b) $\beta = 1 \cdot 10^9 \text{ A}/(\text{cm}^2\text{sr})$

Feedback loop:

1. Welche Linsen Abbildungsfehler kennen Sie, die die Auflösung der Abbildung beeinflussen?
2. Welche vier Beiträge sind wichtig zur Berechnung des Strahldurchmessers auf der Probe ?
3. Der Durchmesser welches Fehlerscheibchen dominiert den Gesamtrahldurchmesser bei kleinen Konvergenzwinkeln?

Zusammenfassung

- Beschreibung der Winkelabhängigkeit elastischer und inelastischer Streuprozesse durch differentielle Streuquerschnitte
- Elastischer Rutherford Streuquerschnitt mit Berücksichtigung der Abschirmung durch die Elektronenhülle (screened Rutherford Streuquerschnitt)
- Streuung hochenergetischer Elektronen stark vorwärtsgerichtet; starker Abfall der Streuwahrscheinlichkeit mit zunehmendem Streuwinkel
- Modellierung von Elektronentrajektorien durch Monte Carlo Simulationen
- Elektronenlinsen bestehen aus geeignet dimensionierten magnetischen (oder in geringerem Maße elektrischen) Feldern
- Eigenschaften von Elektronenlinsen stark durch Abbildungsfehler beeinträchtigt (Öffnungsfehler, Farbfehler, Beugungsfehler)
- Die Elektronenoptik im Rasterelektronenmikroskop dient zur Abbildung (Verkleinerung der Größe!) der Elektronenquelle auf die Probenoberfläche
- Berechnung des Strahldurchmessers unter Berücksichtigung von Abbildungsfehlern, Beugung und Richtstrahlwert