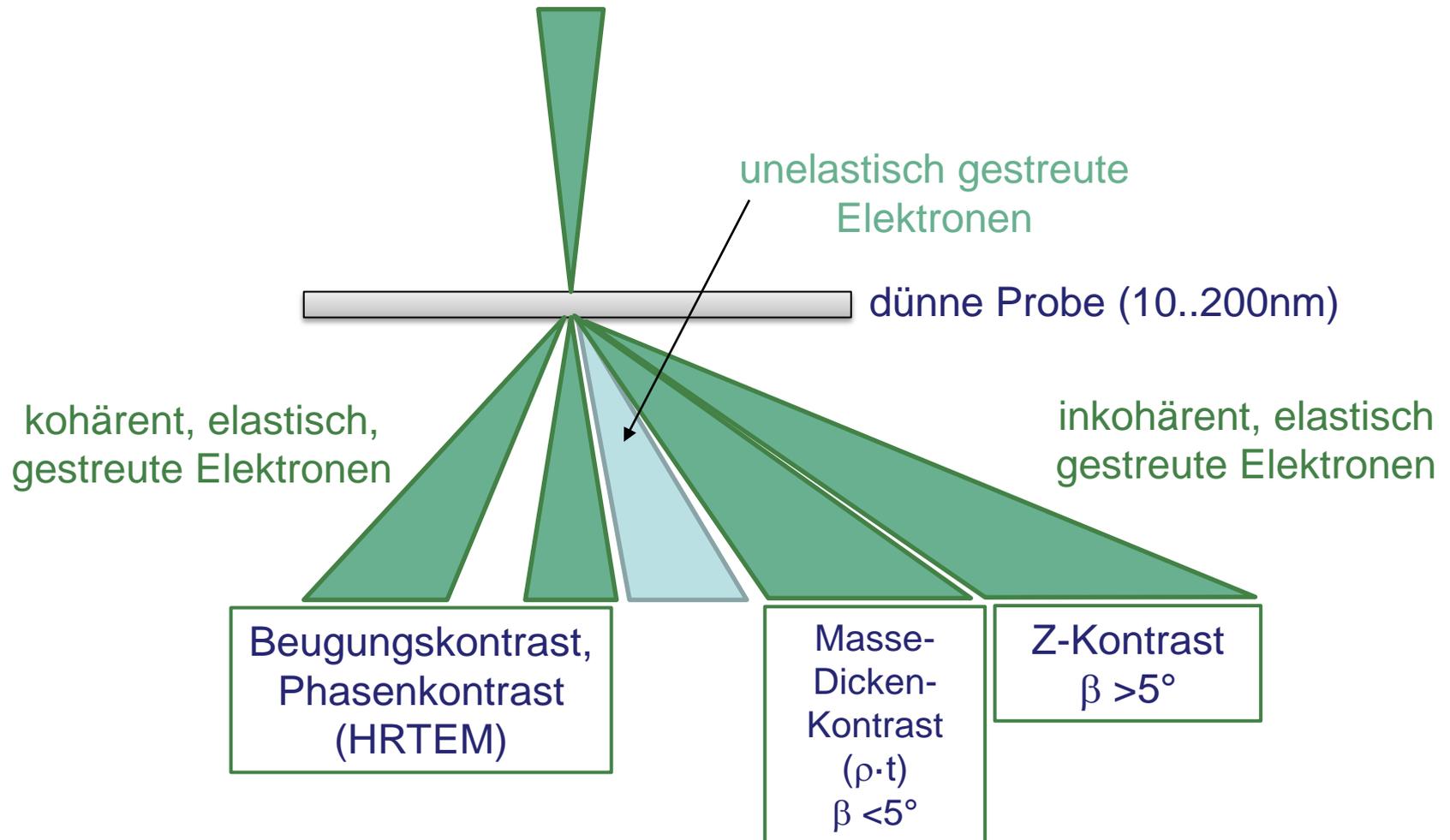


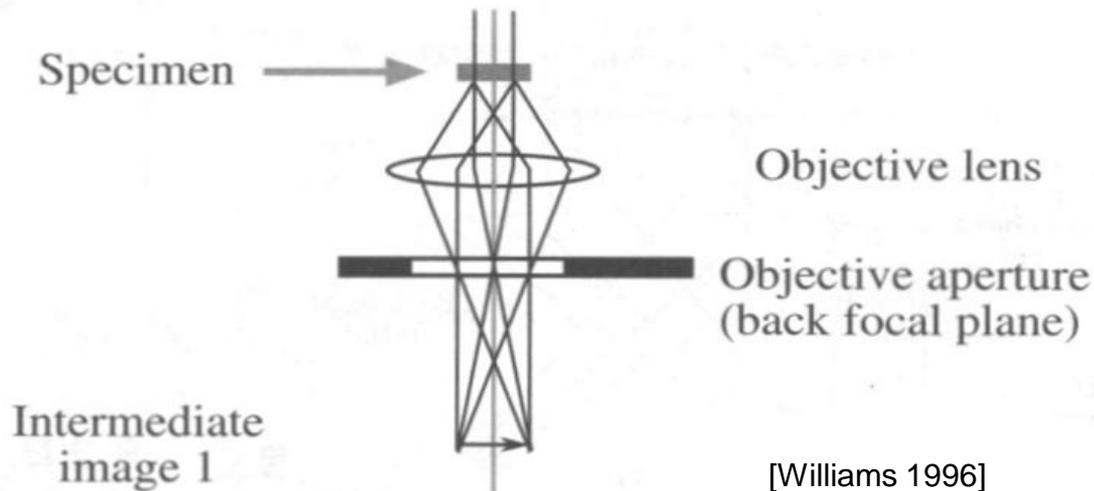
5. Kontrasttheorie

kohärente Primärelektronen ($\sim 200\text{kV}$)



5. Kontrastblende

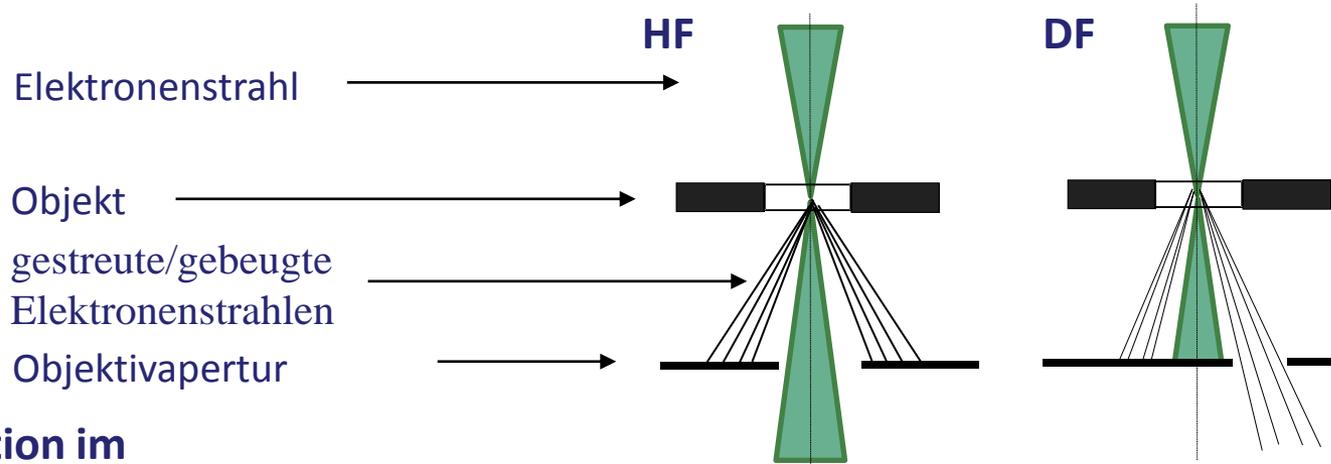
- in der Brennebene der Objektivlinse entsteht die Abbildung der Winkelverteilung der gestreuten Strahlung & das Beugungsbild



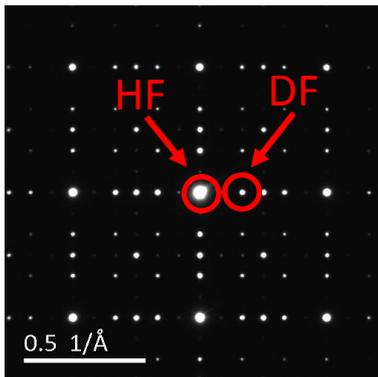
- mit Kontrastblende (Objektivapertur)
 - Elektronen nach Streuwinkel selektieren
 - nur spezielle Strahlen auswählen, die zur Bildentstehung beitragen

5. Kontrastblende

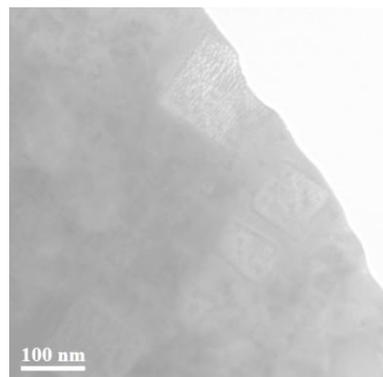
- Hellfeld- (HF) und Dunkelfeld- (DF) Abbildung



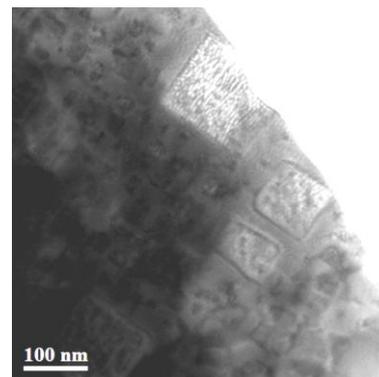
Blendenposition im
Beugungsbild



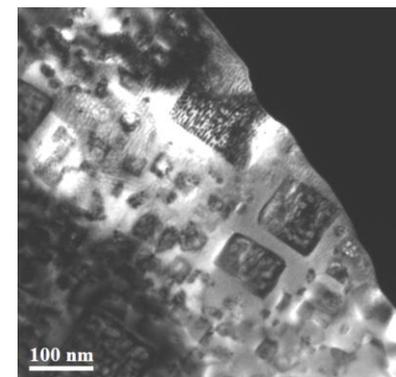
ohne Kontrastblende



HF



DF



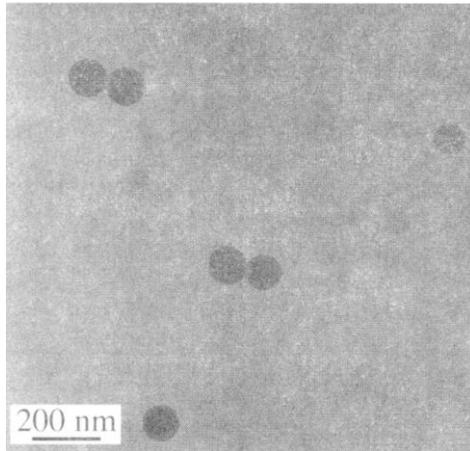
5. Kontrastarten

- Kontrast durch Streuung/Beugung der e^- -Wellen an Probe
 → Richtung, Amplitude & Phase der e^- -Wellen verändert

Amplitudenkontrast

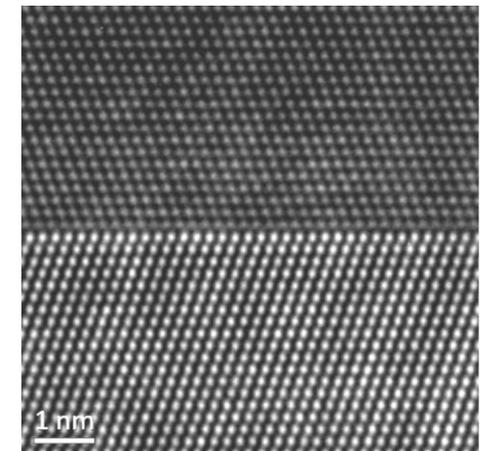
Phasenkontrast (HRTEM)

Masse-Dicken-Kontrast



Je kleiner die Kontrastblende, desto höher der Kontrast
 Ein ausgewählter Strahl reicht zur Abbildung

Beugungskontrast



Streifenmuster durch
 Interferenz von
 mindestens 2 Strahlen

5.1 Masse-Dicken- & Z-Kontrast

$$Q \sim \rho \cdot t \cdot Z^2$$

Q ...Anzahl der Streuereignisse in der Probe

ρ ...Massendichte

t ...Probendicke

Z ...Kernladungszahl

Streuung steigt mit ρ , t, Z \rightarrow „**Streukontrast**“

- mit steigendem ρ sinkt mittlere freie Weglänge der e^-
- mit steigendem t steigt Anzahl der Streuereignisse
- mit Z steigt Streuquerschnitt
- stark streuende Bereiche erscheinen in der HF-Abbildung dunkler im DF heller

5.1 Masse-Dicken- Kontrast

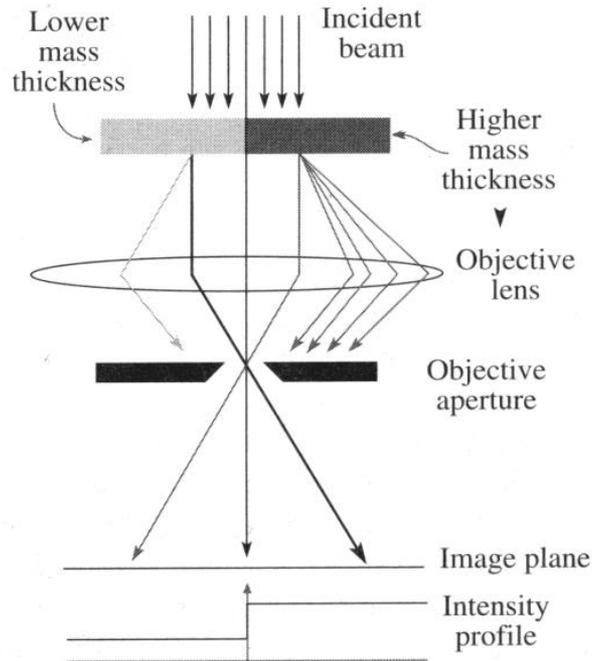
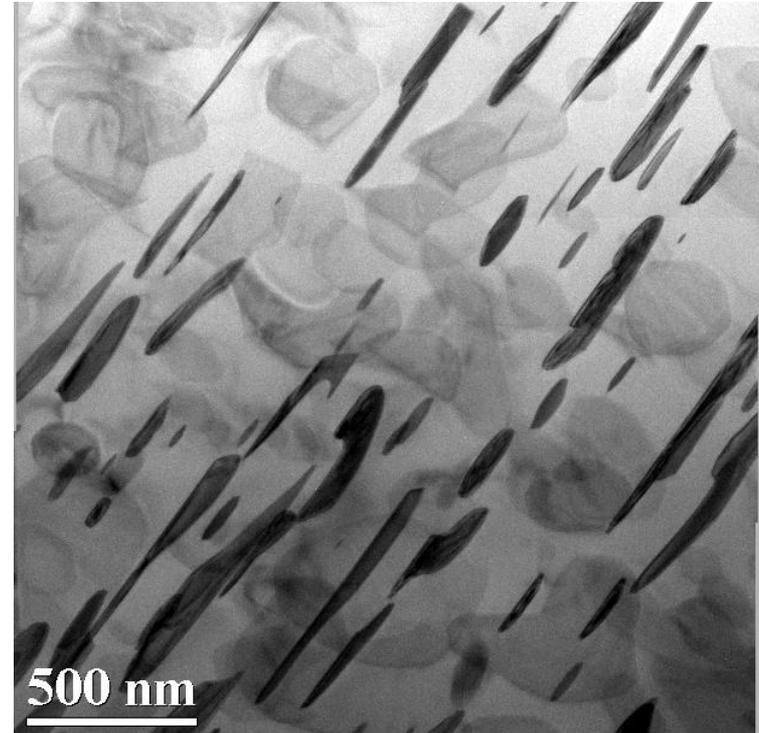


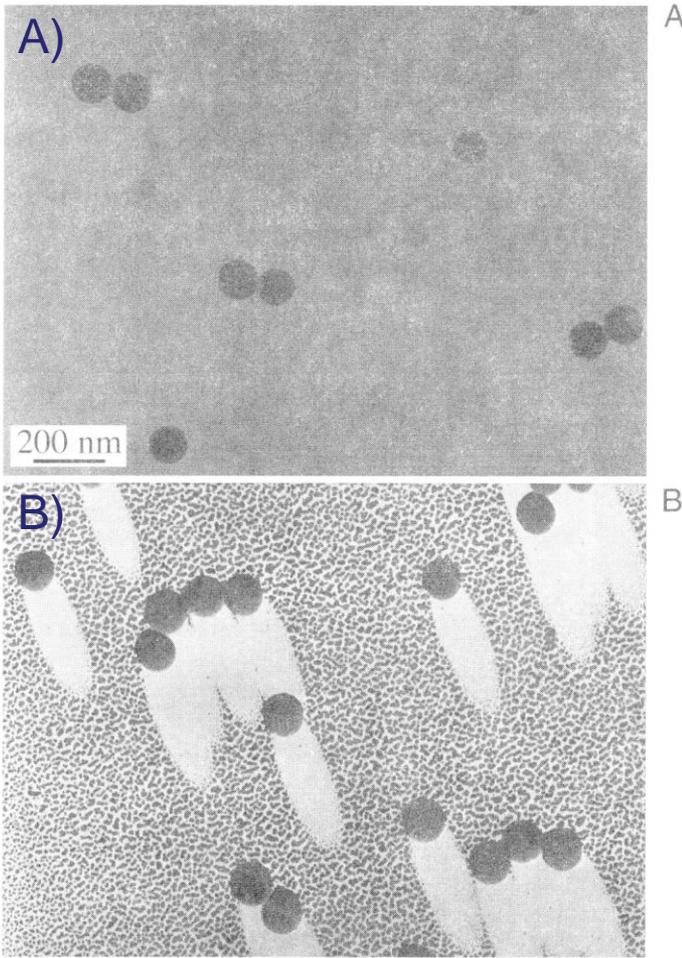
Figure 22.4. Mechanism of mass-thickness contrast in a BF image. Thicker or higher-Z areas of the specimen (darker) will scatter more electrons off axis than thinner or lower-mass (lighter) areas. Thus fewer electrons from the darker region fall on the equivalent area of the image plane (and subsequently the screen), which therefore appears darker in BF images.

[Williams 1996]



plattenartige Al_2Cu Ausscheidungen:

5.1 Z-Kontrast



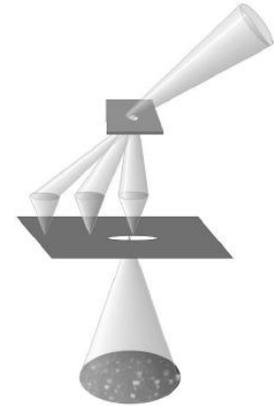
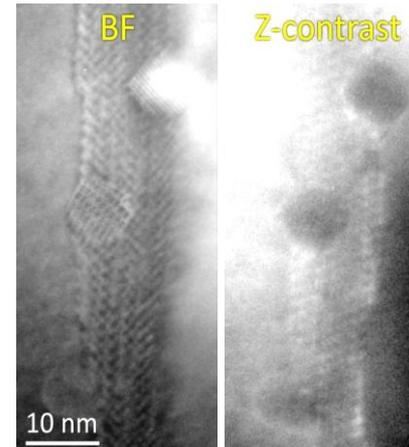
[Williams 1996]

- Latexpartikel auf C-Trägerfilm
- A) reiner Dickenkontrast
- B) Z-Kontrast durch Au-Beschichtung (Shadowing)
- Z-Kontrast ist stärker als Dickenkontrast aufgrund der stärkeren Streuwirkung
- Masse-Dicken-Kontrast in amorphen Materialien dominant

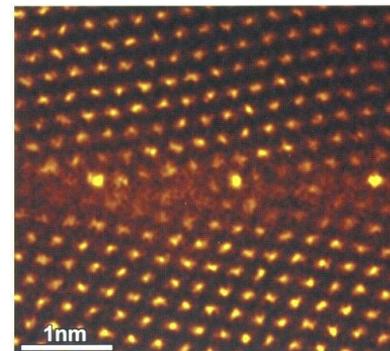
5.1 Z-Kontrast

- Zirkonoxid-Dispersoide in Pt
 - Z-Kontrast über DF-Abbildung
 - Streuwinkel $> 5^\circ$
 - geringe Intensität
→ hohe Belichtungszeiten
-
- effektivere Abbildung des Z-Kontrasts im STEM
→ HAADF
(High Angle Annular Dark Field)
mit atomarer Auflösung

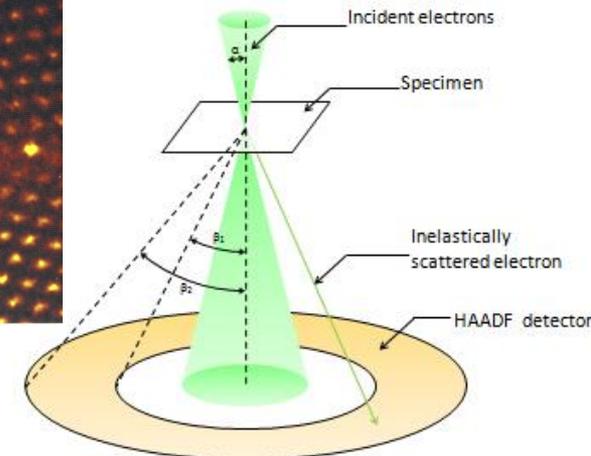
HACDF TEM



HAADF STEM



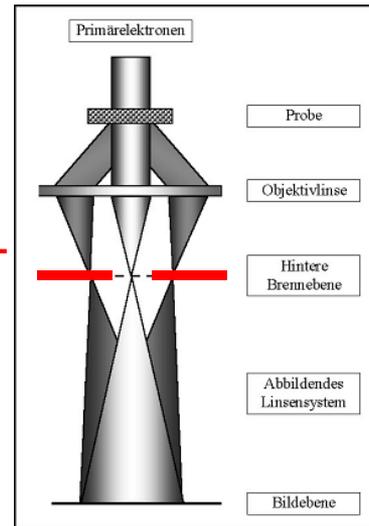
[Ikuhara et al.
Jeol News 08]



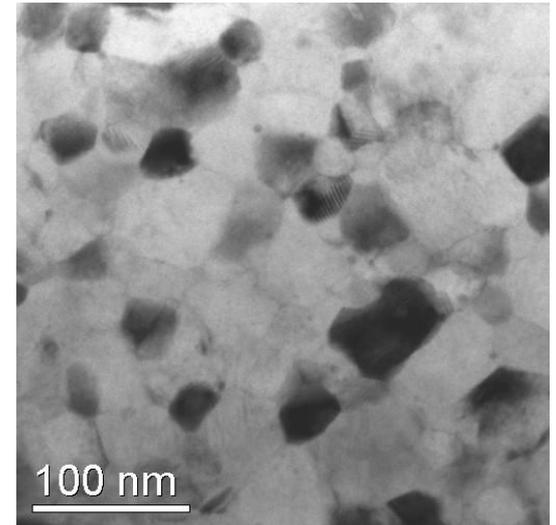
5.2 Beugungskontrast

- dominant in kristallinen Proben
- in Abhängigkeit von ihrer Orientierung erfüllen Kristallite die Bragg-Bedingung → „Orientierungskontrast“
- Kristalle nahe einer niedrig indizierten Zonenachse beugen stark → erscheinen im HF dunkler
- Zur Darstellung des Beugungskontrasts ist die Kontrastblende zwingend notwendig

Kontrast-
blende

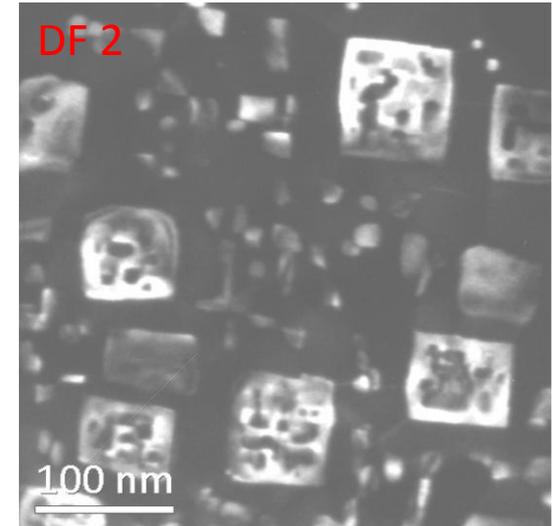
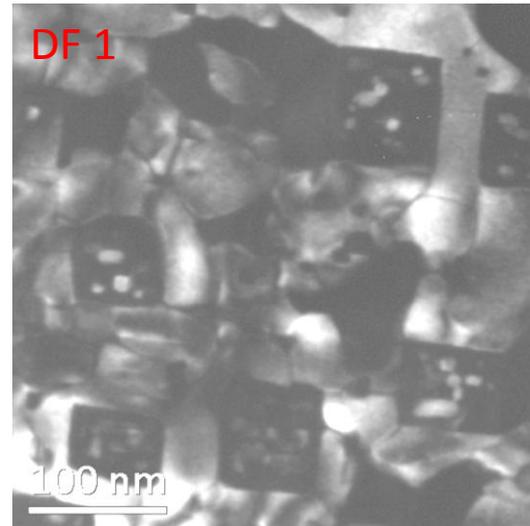
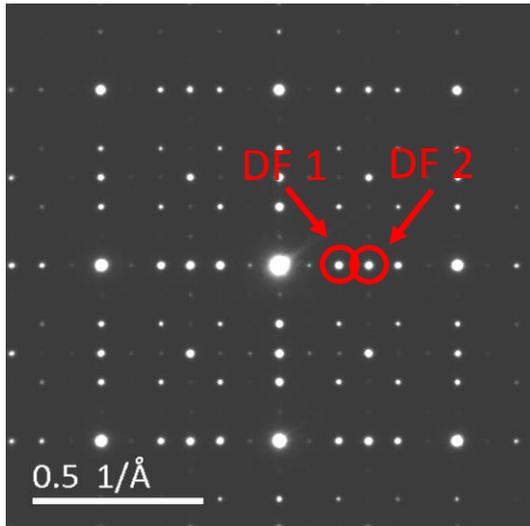


[Kirmse 00]



Einphasiges
nanokristallines Co_7Sm :
Beugungskontrast
zwischen unterschiedlich
orientierten Körnern

5.2 Dunkelfeld DF

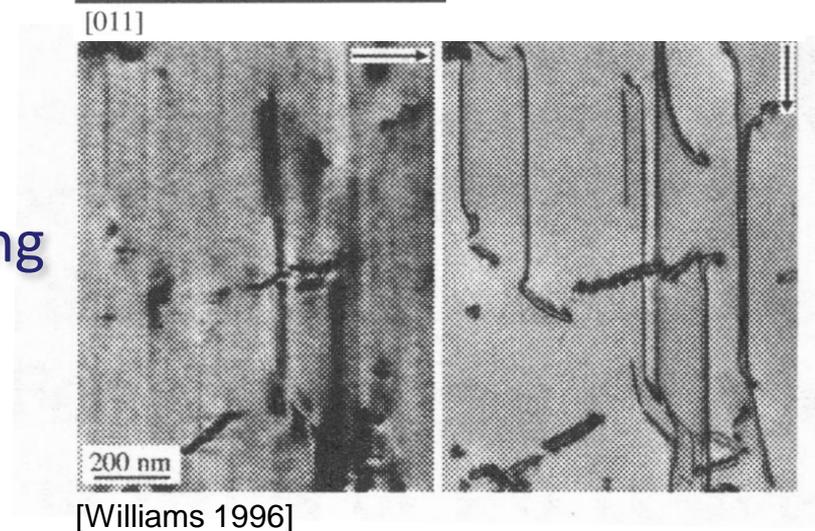
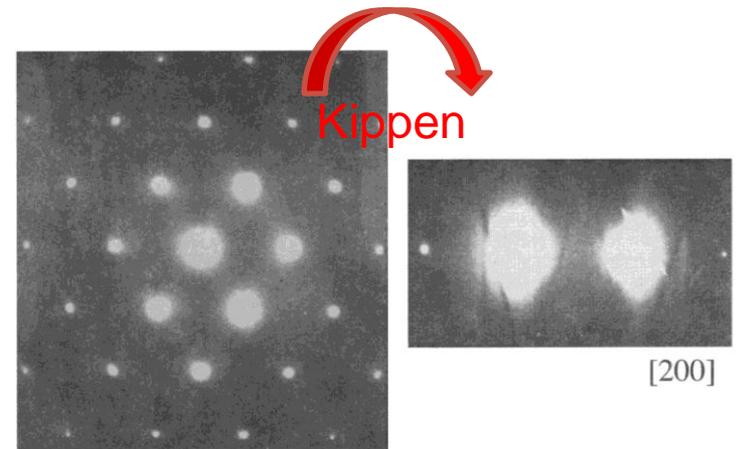


- Effektive Kontrastierung durch auswählen eines Beugungsreflexes mit der Kontrastblende
- Abbildung wird aus ausgewählten gebeugten Reflex generiert
→ nur Probenbereiche, die in diesen Winkelbereich beugen (streuen), werden hell abgebildet

5.2 Zweistrahlfall

- Ein einzelner gebeugter Strahl ist sehr intensitätsstark
→ Kontrast wird im wesentlichen von diesem gebeugten und ungebeugten Strahl bestimmt
- hoher Beugungskontrast
→ einfache Interpretation
- Besonders geeignet zur Darstellung und Analyse von Gitterfehlern

Vielstrahlfall Zweistrahlfall



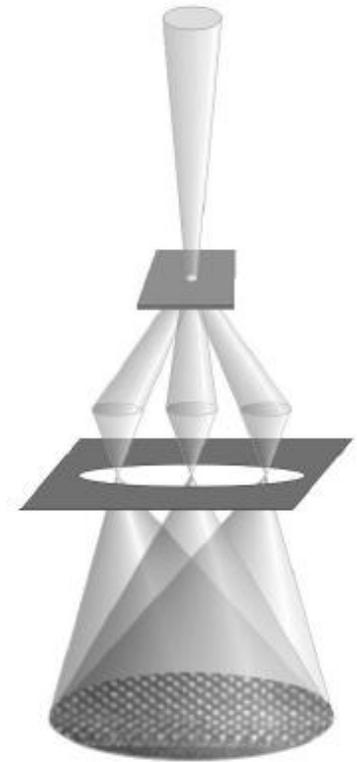
5.3 HRTEM (Phasenkontrast)

- Probe bewirkt Phasenverschiebung der e⁻-Wellen → Interferenzmuster
- Für HRTEM wird der ungebeugte und gebeugte Strahl zur Abbildung verwendet
- Strahlen interferieren miteinander → Phasenkontrast
- Untersuchungen auf atomarer Ebene → Informationslimit $\approx 0,1$ nm

Voraussetzungen:

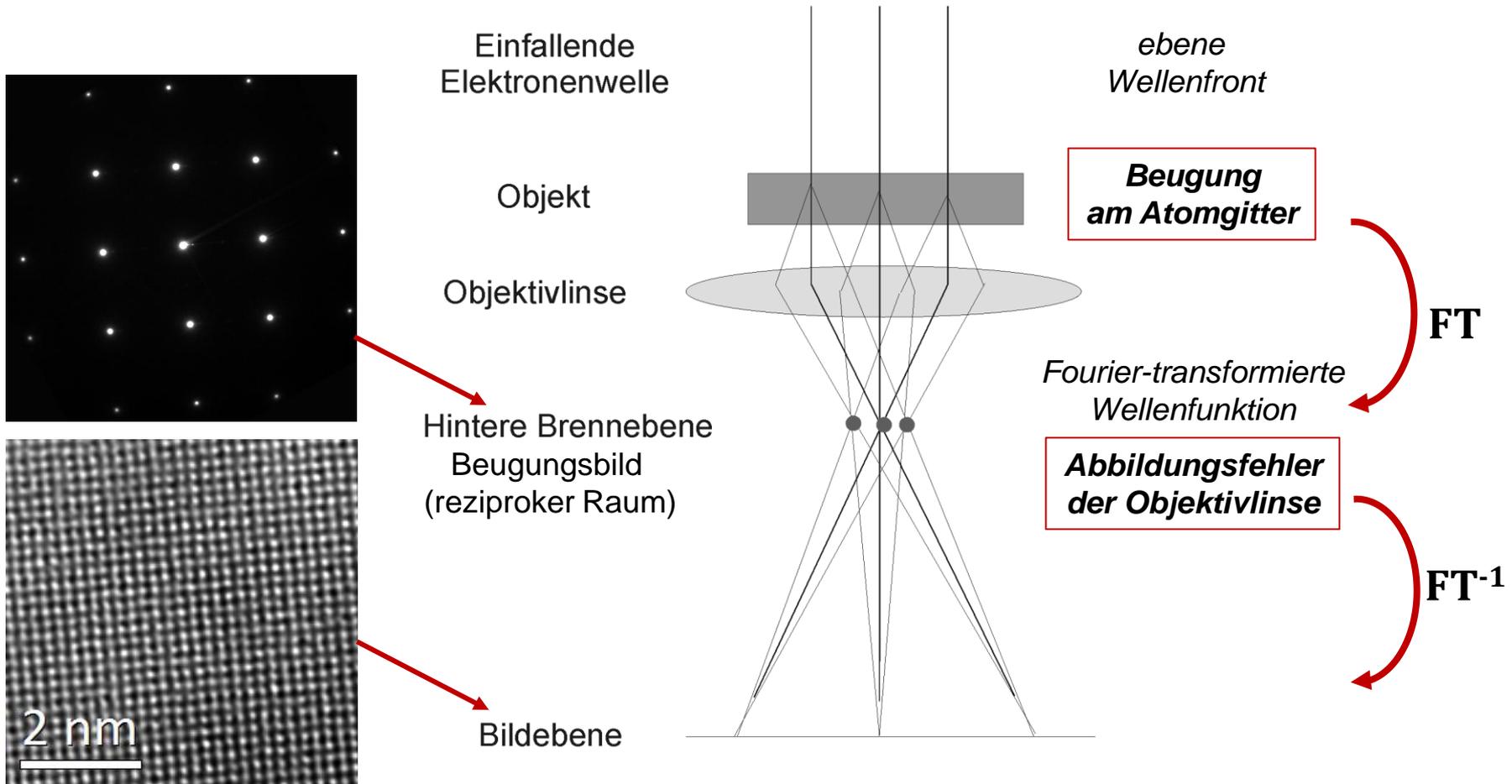
- geringe Fehlerquellen im Abbildungssystem
- Probe muss sehr dünn sein < 50 nm

Hochauflösung
HRTEM



[Biskupek 04]

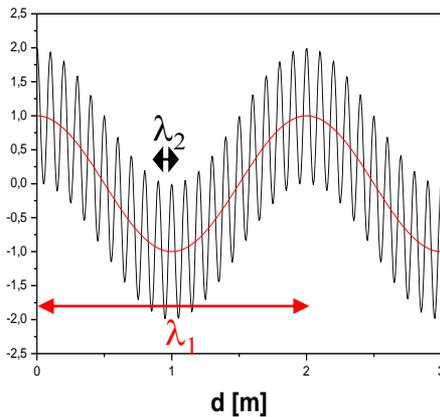
5. HRTEM (Phasenkontrast)



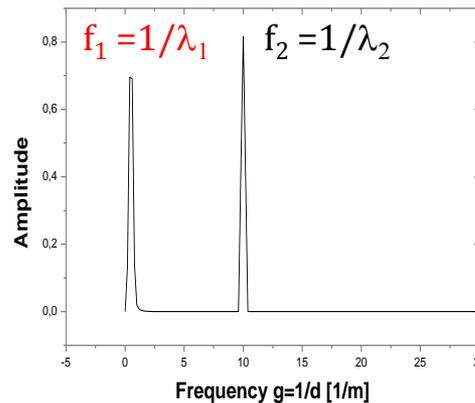
5.3 Fourier Transformation (FT)

- Fourier Transformation: Zerlegung einer periodischen Funktionen in Reihe von sin- & cos -Gliedern

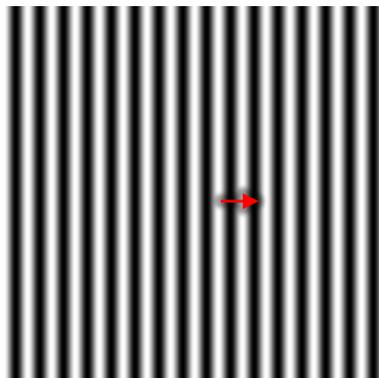
$$I(\vec{r}) = \int A_g(\vec{r}) \cos\{2\pi \vec{g} \cdot \vec{r} + P_g(\vec{r})\}$$



FT



- 1 D



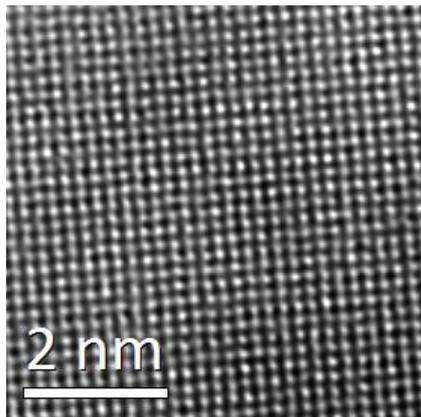
FT



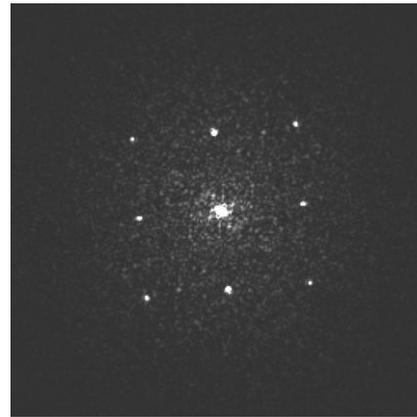
- 2 D
Position der Maxima durch Normale der Schwingung

5.3 Fourier Transformation (FT)

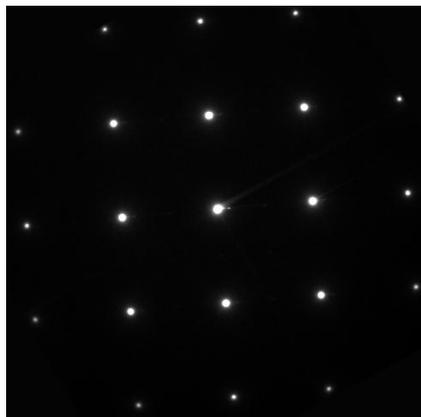
- Fourier Transformation: Abbildung von realen in reziproken Raum und umgekehrt



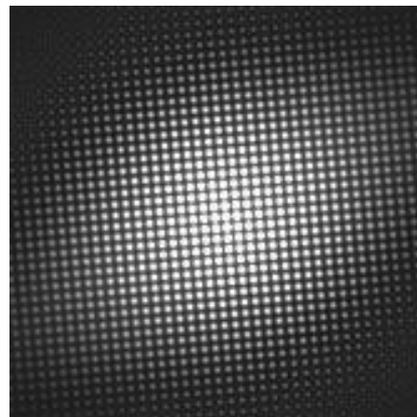
FT



- Linien werden zu Punkten

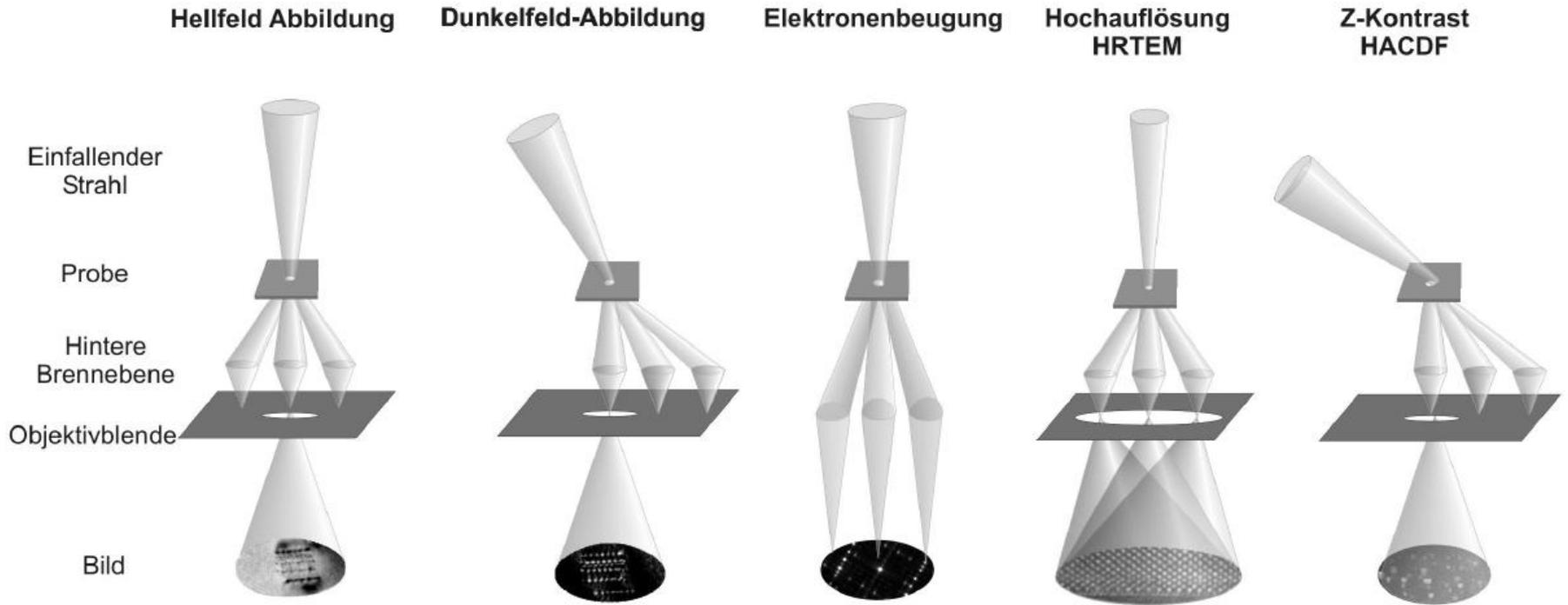


FT



- Punkte werden zu Linien

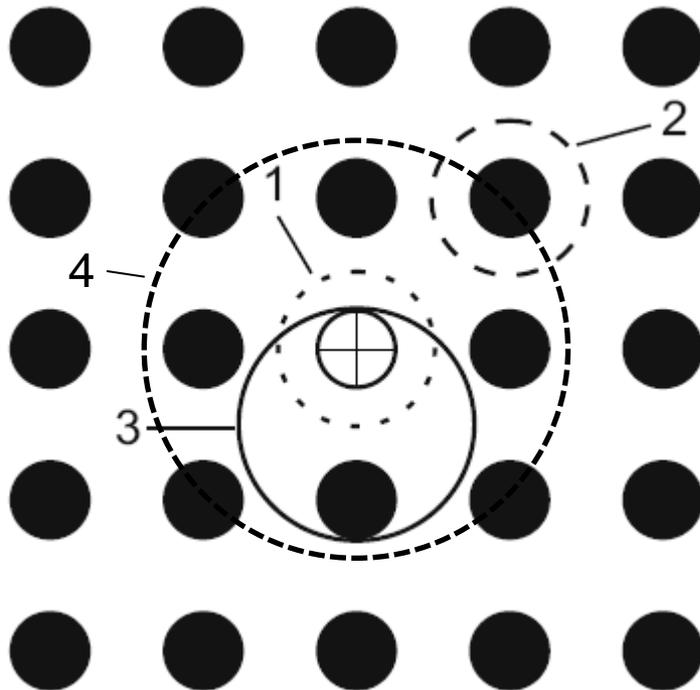
5.4 Abbildungsmodi im TEM



[Biskupek 04]

5.4 Abbildungsmodi im TEM

Position der Kontrastblende



- 1 Hellfeld (HF, BF)
- 2 Dunkelfeld (DF)
- 3 Zweistrahlfall
 - Beugungskontrast
 - Hochauflösung (HRTEM)
- 4 Vielstrahlfall
 - Hochauflösung (HRTEM)
 - Masse-Dicken-Kontrast (große Kontrastblende)

5. Kontrasttheorie

kohärente Primärelektronen (~ 200kV)

