

3.5.2 Elektronenmikroskopie

Ein Elektronenstrahl ist nicht nur eine (gute Näherung an eine) ebene Welle, sondern - im Gegensatz zu Röntgen- und Neutronenstrahlen - auch ein elektrischer Strom geladener Teilchen.

- Damit kann der Strahl durch elektrische und/oder magnetische Felder abgelenkt werden - und das eröffnet die Möglichkeit **elektromagnetische Linsen** zu bauen.
- Obwohl aus sehr prinzipiellen Gründen nur Sammellinsen möglich sind, kann man damit trotzdem ein Mikroskop bauen - ein **Elektronenmikroskop**.

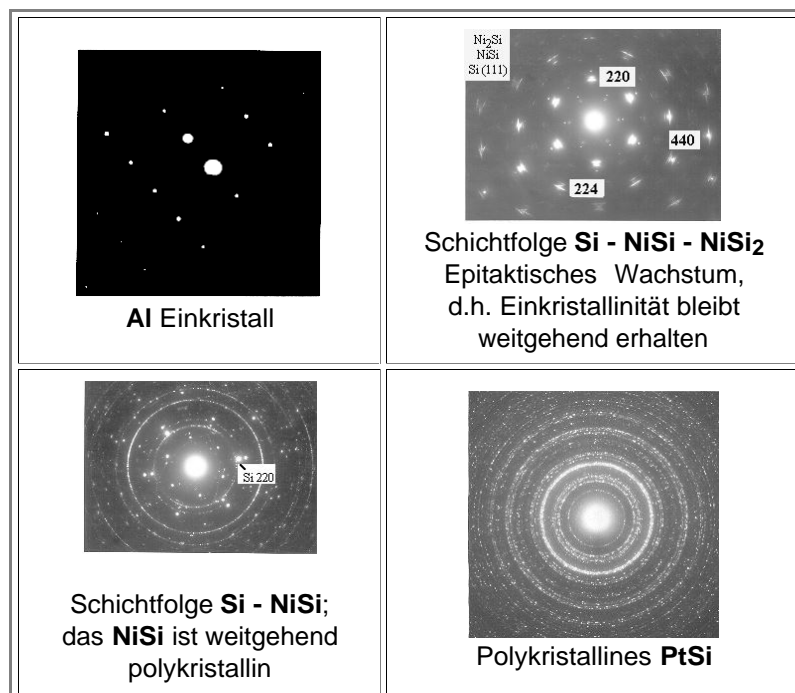
Elektronenmikroskope kommen in **zwei** grundverschiedenen Varianten:

1. Das Rasterelektronenmikroskop (REM oder englisch **SEM** für "Scanning Electron Microscope") "rastert" lediglich einen mit elektromagnetischen Linsen fein fokussierten Elektronenstrahl im Zick-Zack über die Probe (wie im **CRT** Bildschirm). Registriert wird in einem geeigneten Detektor, wieviele Sekundärelektronen (oder sonstwas) freigesetzt werden.

- Das Bild ist im wesentlichen eine "dreidimensionale" Wiedergabe der Oberflächentopographie, mit einer Schärfentiefe und Auflösung, die um Größenordnungen besser ist als im Lichtmikroskop. Der Link führt zu [Beispielen](#).
- **REMs** haben noch sehr viel mehr Anwendungsmöglichkeiten - sie machen aber grundsätzlich **nicht** von der Wellennatur des Elektronenstrahls Gebrauch und sollen uns hier nicht weiter interessieren.

2. Das Transmissionselektronenmikroskop (TEM). Hier wird der Elektronenstrahl möglichst ohne Absorption **durch** die sehr dünne Probe geführt und was immer unten herauskommt durch elektromagnetische Linsen auf einen Bildschirm abgebildet. Dabei hat man durch einfaches Umschalten immer **zwei** Möglichkeiten:

1. Man erzeugt ein **Beugungsbild**. Das ähnelt dann dem Beugungsbild einer [Laue-Aufnahme](#) in Transmission - obwohl die Welle hier monochromatisch ist.
 - Dass trotzdem sehr viele Reflexe angeregt werden liegt daran, daß **k** sehr lang ist, so daß die Ewaldkugel praktisch als Ebene durchs reziproke Gitter der Probe läuft und **alle** reziproken Gitterpunkte schneidet die in einer Ebene senkrecht zum Elektronenstrahl liegen. Da die reziproken Gitter"punkte" bei sehr dünnen Proben **eher ausgedehnt** sind, trifft die Ewaldkugel relativ viele davon.
 - Das nachfolgende Bild zeigt einige Beispiele dessen was man auf dem Bildschirm zu sehen bekommt.

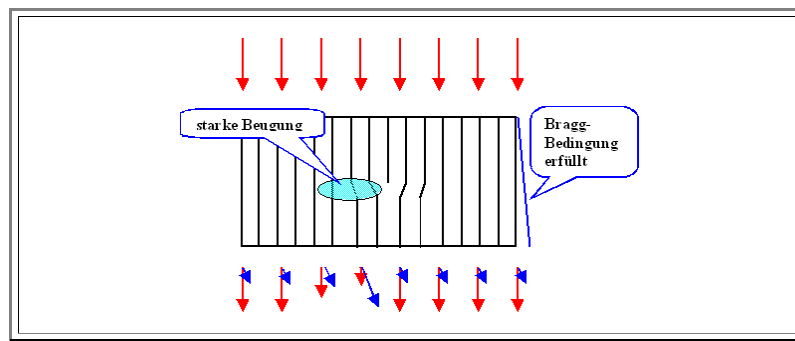


- Die Bilder lassen sich selbstverständlich quantitativ auswerten; auch damit ist eine Strukturbestimmung möglich.

2. Man erzeugt ein **Bild** der an der Unterseite der Probe lokal vorhandenen Intensität I_g eines gebeugten Strahls, oder des Primärstrahls dessen lokale Intensität einfach (I_0 – gesamte lokal gebeugte Intensität) sein muß.

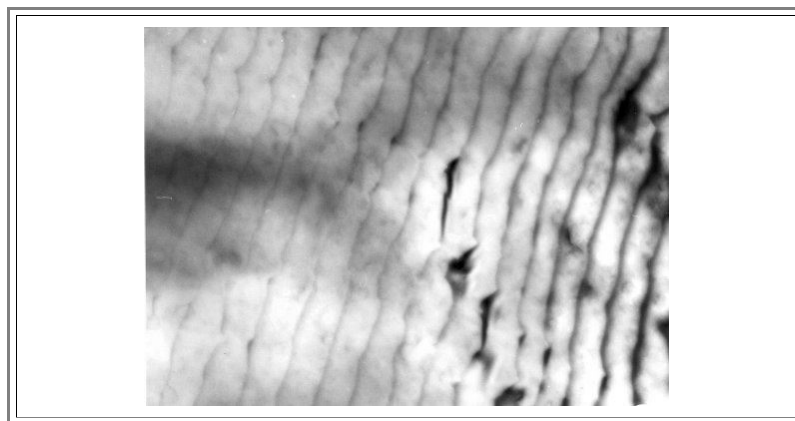
Mit der zweiten Variante kann man Kristallgitterdefekte abbilden, wir schauen uns das mal schematisch für eine [Stufenversetzung](#) an.

- Zunächst orientieren wir die Probe mit einer Stufenversetzung wie gezeigt relativ zum Elektronenstrahl derart, daß die Bragg-Bedingung für die gezeichneten Ebenen **fast**, aber nicht exakt erfüllt ist. Der blaue Strich deutet an, wie die Probe orientiert sein müßte, damit die Bragg-Bedingung exakt erfüllt ist. Die Zeichnung übertreibt mächtig.



- Um die Versetzung herum ist das Gitter lokal verbogen; in dem angedeuteten Bereich ist die Bragg Bedingung erfüllt, oder jedenfalls besser erfüllt, als weg von der Versetzung.
- Damit wird an der Unterseite der Probe, entlang der Projektion der Versetzungslinie, viel Intensität des einfallenden Elektronenstrahls in den abgebeugten ("blauen") Strahl "umgeleitet" (und zwar immer nur auf einer Seite der Versetzung).
- Mit einer geeignet platzierten Blende kann man den gebeugten Strahl ausblenden und ein stark vergrößertes Bild der Intensitätsverteilung des Primärstrahls an der Unterseite der Probe machen. Die Versetzung wird dann als leicht verschwommene dunkle Linie erscheinen.
- Da die **Auflösung** eines Mikroskops - d.h. die Größe der kleinsten noch beobachtbaren Strukturen - immer in der Größenordnung der Wellenlänge der verwendeten Strahlung liegen, ist bei Lichtmikroskopen bei etwa **0,5 μm** das Ende der Fahnenstange erreicht. Elektronenmikroskope verwenden typischerweise Beschleunigungsspannungen von **100 kV - 1,5 MeV** und können damit ohne weiteres atomare Auflösung im **nm** Bereich erreichen (es ist die Qualität der elektromagnetischen Linsen, nicht die Wellenlänge, die hier problematisch wird).

Genauso ist es auch - das nachfolgende Bild zeigt ein Beispiel



- Wir sehen eine ganze Schar von (ungefähr parallelen) Versetzungen. Die Probe ist leicht verbogen; links sind wir relativ weit weg von der exakten Bragg-Bedingung, rechts dicht dran. Der Versetzungskontrast nimmt von links nach rechts deutlich zu; gleichzeitig werden die Linien breiter und unschärfer, wie wir das erwarten würden.

Das **TEM** ist ein außerordentlich mächtiges Instrument zur Strukturbestimmung mit *lokaler* Auflösung. Man kann kleinste Defekte (bis hinunter zu einzelnen Atomen) sichtbar machen und analysieren.

- Allerdings ist es nicht ausgesprochen billig (Standardgeräte so um **1 Mio €** Spitzengeräte um die **7 Mio €**), schwer zu bedienen (man braucht, typischerweise im Rahmen einer Doktorarbeit so **1 - 2 Jahre** bevor man **TEM** "kann"), und nur einsetzbar für winzigste Proben!
- Atome sind einfach klein. Das gesamte bisher weltweit mit TEM untersuchte Probenvolumen liegt deutlich unter **1 mm^3**

[Mehr zum TEM in Kurzfassung](#) im Link. Wer es noch genauer wissen will (und viele Beispiele anschauen möchte), geht zum [entsprechenden Kapitel](#) im Hyperskript "Defects"