

Werkstofftechnik I

Metallographie

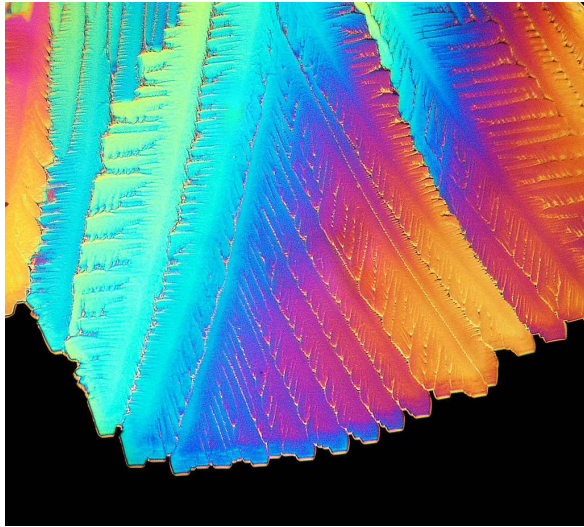
Verfasser:

Prof. Dr.-Ing. habil. Hans-Jürgen Christ

Datum: 24.11.2017

Agenda

- Einleitung
- Werkstoffprüfung
- **Metallographie**
 - Lichtmikroskopie
 - Elektronenmikroskopie
 - Rastersondenmikroskopie
 - Röntgenfeinstrukturuntersuchung
- Aufbau von Werkstoffen
- Mechanische Eigenschaften
- Aufbau mehrphasiger Werkstoffe
- Grundlagen der Wärmebehandlung

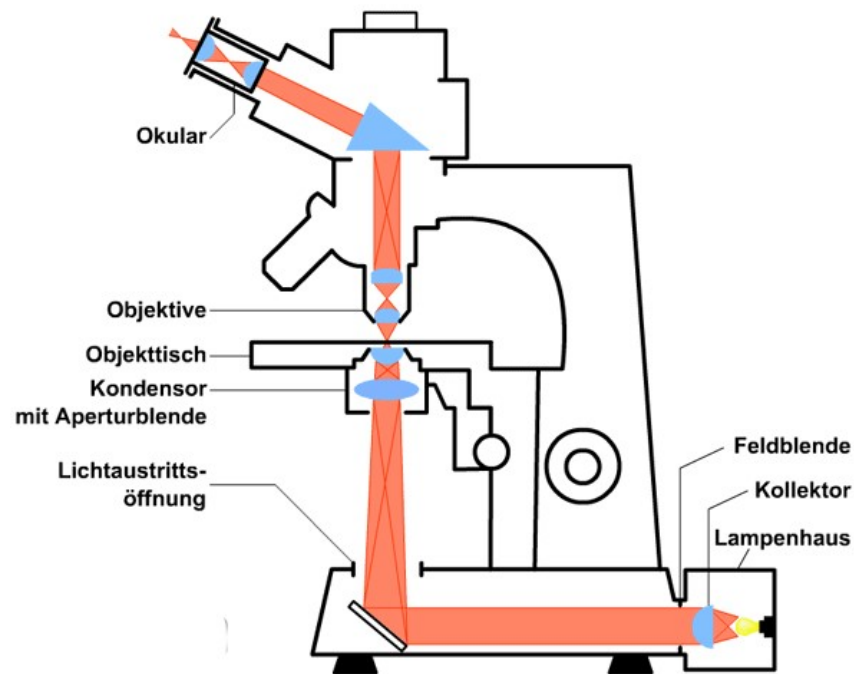


Quelle: Wikipedia „Zitronensäure im Mikroskop mit Polfilter besser“ von Jan Homann



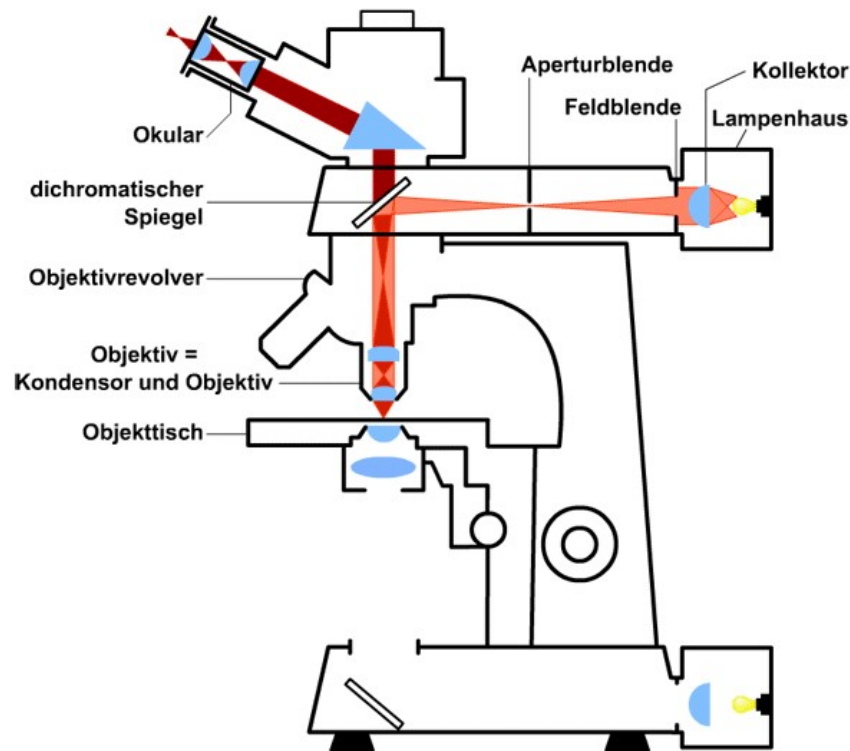
Quelle: <http://www.gsi-slv.de>

- Bei der metallographischen Darstellung des Werkstoffgefüges wird aus einer ebenen Abbildung auf den räumlichen Aufbau des Werkstoffs geschlossen.
- Zur metallographischen Untersuchung ist zunächst eine gezielte Probenpräparation erforderlich.



- Lichtmikroskope werden unterschieden in
 - Durchlichtmikroskope
 - Auflichtmikroskope
- Im ersten Fall besteht die Präparation in der Herstellung eines durchstrahlbaren Dünnschliffes.

Quelle: Universität Wien, <https://www.univie.ac.at>



- Lichtmikroskope werden unterschieden in
 - Durchlichtmikroskope
 - Auflichtmikroskope
- Im ersten Fall besteht die Präparation in der Herstellung eines durchstrahlbaren Dünnschliffes.
- Die gängigen Metallmikroskope sind Auflichtmikroskope, welche die Oberfläche einer massiven Probe (eines Schliffs) darstellen.

Quelle: Universität Wien, <https://www.univie.ac.at>

Optische Auflösungsvermögen

- Die numerische Apertur NA

$$NA \approx \frac{r}{f}$$

mit:

r: Radius der Lochblende in mm

f: Brennweite des Objektivs in mm

kennzeichnet das optische Auflösungsvermögen eines Objektivs.

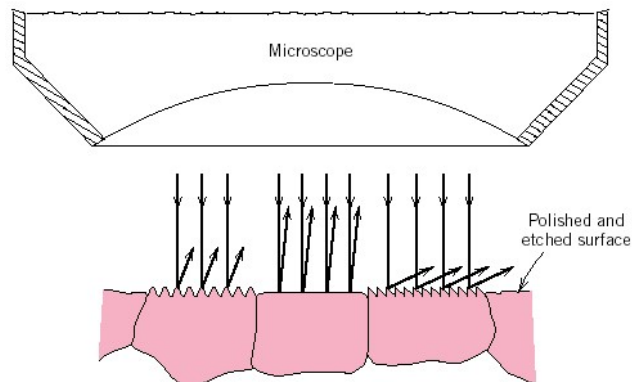
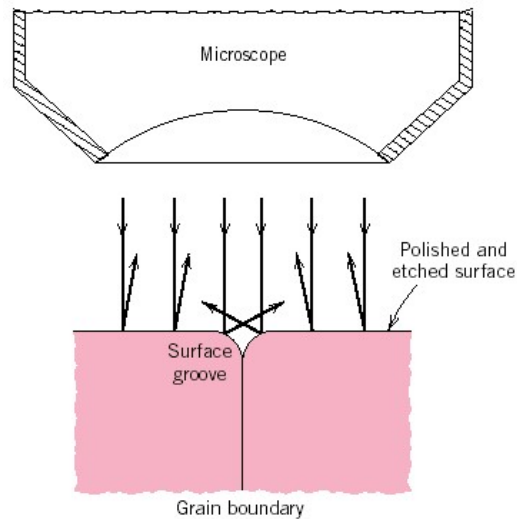
- Das Auflösungsvermögen nach Abbe ist das Maß d für den geringsten Abstand zweier Beobachtungsobjekte, die noch getrennt registriert werden können.

$$d = x_{\min} = \frac{\lambda}{NA} \approx \frac{\lambda \cdot f}{r}$$

mit:

λ : Wellenlänge des Lichtes in μm

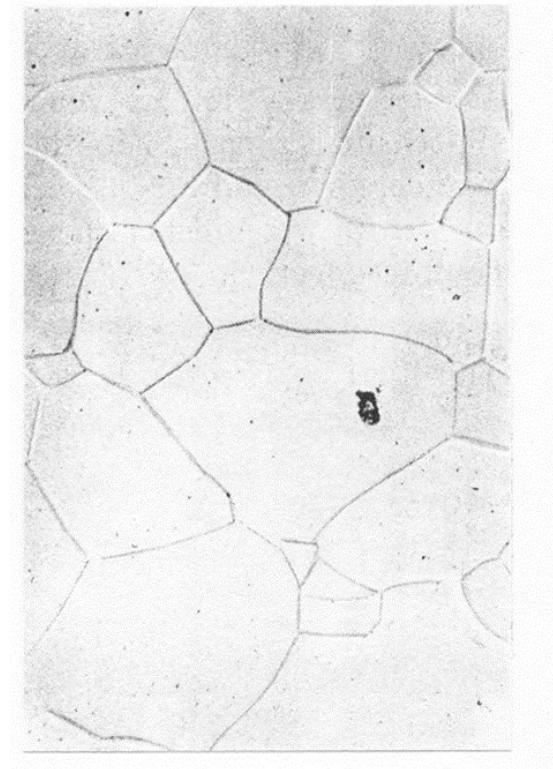
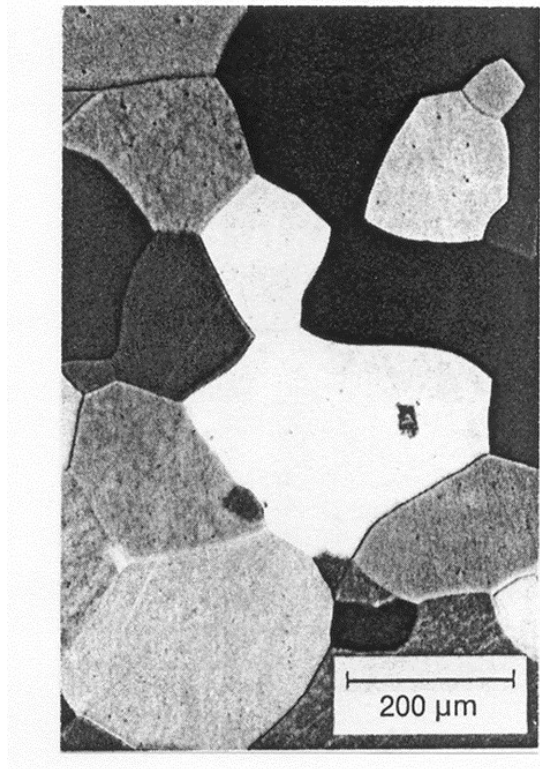
d: kleinster Abstand, der noch getrennt wahrgenommen werden kann, in μm



- Heraustrennen aus dem Bauteil
- Herstellung einer blanken, glatten Fläche durch
 - Schleifen und Polieren (SiC-Papier, Al_2O_3 - und Diamantpasten bis $0,25\mu\text{m}$)
 - oder elektrochemisches Polieren
- Ätzen: Differenzieren der Gefügebestandteile durch
 - selektiven Angriff durch eine Säure
 - hohe Temperaturen (thermische Ätzung)
 - Ionenbeschuss
 - Aufbringen von Interferenzschichten

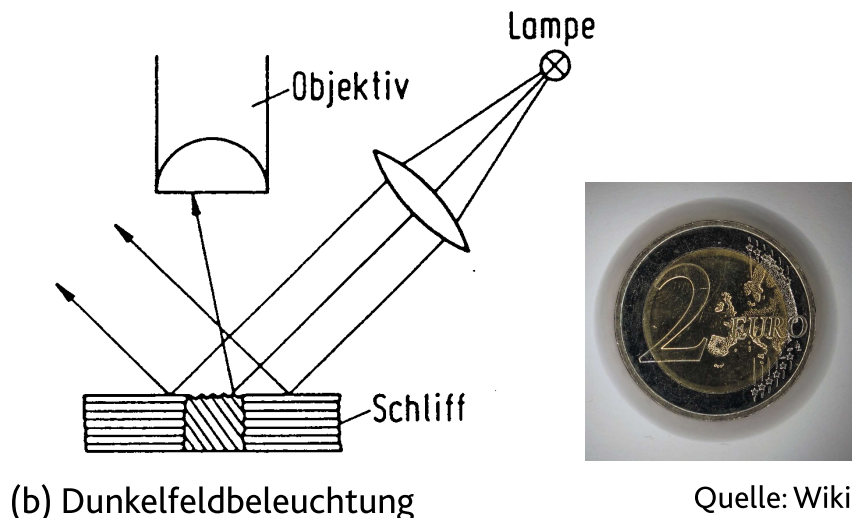
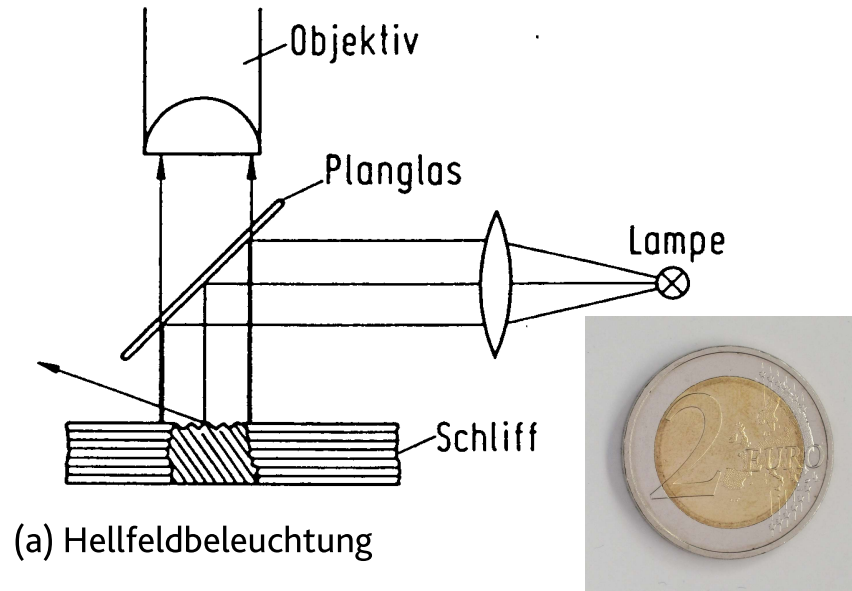
Gefüge von Aluminium

Ein Korn ist ein Bereich mit einer einheitlichen Orientierung der Kristallstruktur, in der die Atome angeordnet sind. Technische Werkstoffe sind meist Vielkristalle, d.h. sie bestehen aus einer Vielzahl von Körnern.



Erkennbar sind die verschiedenen Körner und die Korngrenzen.

Auflichtmikroskopie



- Bei der Auflichtmikroskopie unterscheidet man zwischen
 - Hellfeldbeleuchtung (a)
 - Dunkelfeldbeleuchtung (b)
- Als Hellfeldbeleuchtung wird die Technik der „normalen“ Lichtmikroskopie bezeichnet.
- Dunkelfeldbeleuchtung dient zur Sichtbarmachung von Objekten mit nur geringem Kontrast.

Quelle: Wikipedia: „Münze in Hellfeld und Dunkelfeldabbildung“ von Salino01

Dualismus Welle - Teilchen

- Beim Lichtmikroskop wird das Auflösungsvermögen durch die Wellenlänge des Lichtes begrenzt (sichtbares Licht $0,8 \geq \lambda \geq 0,4 \mu\text{m}$). (*Damit sind Vergrößerungen weit über 1000-fach unsinnig.*)
- Aufgrund des Dualismus Welle-Teilchen (de Broglie) können Elektronen ebenfalls als Welle aufgefasst werden, deren Wellenlänge λ sich über den Impuls p (Masse m mal Geschwindigkeit v) und das Plancksche Wirkungsquantum h errechnen lässt:

$$p = m \cdot v = \frac{h}{\lambda}$$

- Für die Geschwindigkeit v eines Elektrons (Elementarladung e) nach Durchlaufen einer Beschleunigungsspannung U gilt:

$$\frac{1}{2}mv^2 = eU$$

Einsetzen führt auf:

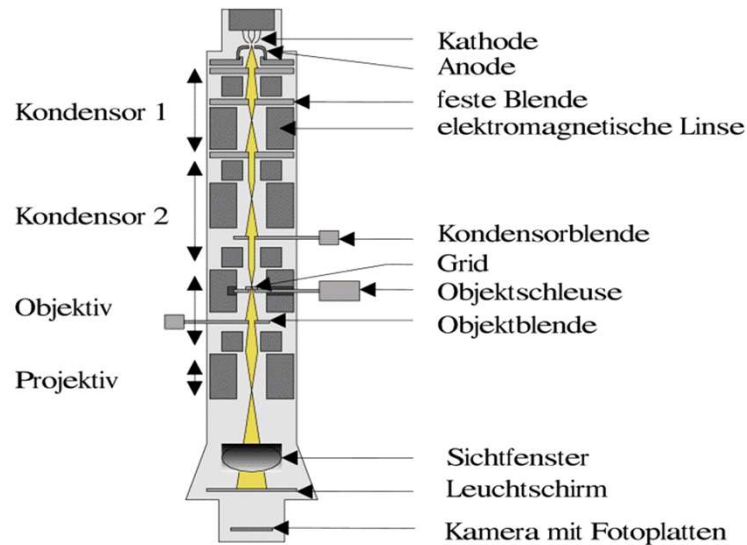
$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{2meU}} = 10^{-10} \sqrt{\frac{150}{U[\text{V}]}} [\text{m}]$$

Beispiele:

$$U = 100 \text{ kV} \rightarrow \lambda = 3,87 \cdot 10^{-12} \text{ m}; \quad U = 1000 \text{ kV (1 MV)} \rightarrow \lambda = 1,23 \cdot 10^{-12} \text{ m}$$

Zum Vergleich: Atomabstand im Festkörper einige Å (Ångström, 10^{-10} m)

Strahlengang eines TEM



Hinweis:

- Elektronen können nur im Hochvakuum längere Strecken zurücklegen.
- Übliche Beschleunigungsspannung $< 200 \text{ kV}$.
- Als Linsen dienen stromdurchflossene Spulen mit inhomogenem Magnetfeld, die aber nur als Sammellinsen wirken.
- Durch das Fehlen von Zerstreuungslinsen können Linsenfehler nicht kompensiert werden, so dass von der theoretischen Auflösungsverbesserung um den Faktor 10^5 "nur" 10^3 übrig bleibt.

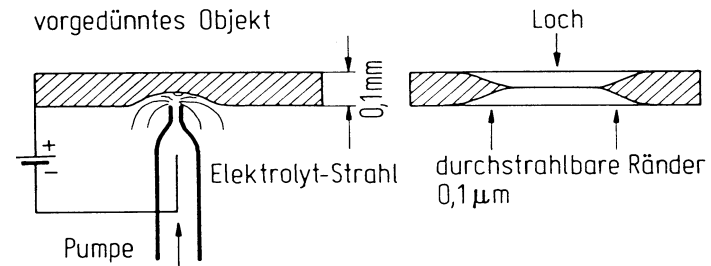
Probenpräparation zur TEM-Untersuchung

- Die Probenpräparation zur TEM-Untersuchung ist sehr aufwendig, da eine für Elektronenstrahlung transparente Folie erzeugt werden muss.
- Meist kommt das elektrolytische Düsenstrahlverfahren zur Anwendung (alternativ Ionendünung z.B. bei nicht leitenden Materialien)



Cutting & Polishing

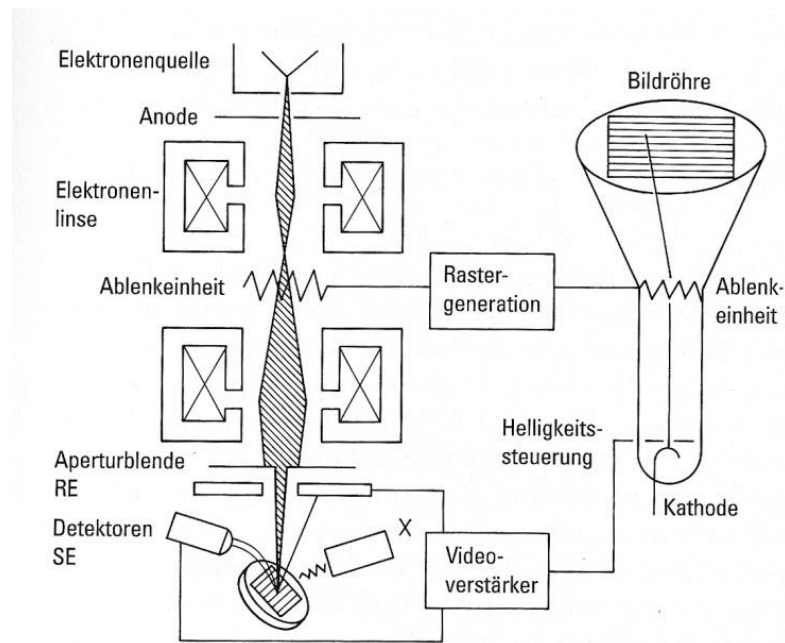
① Elektrolyt



② Ion milling



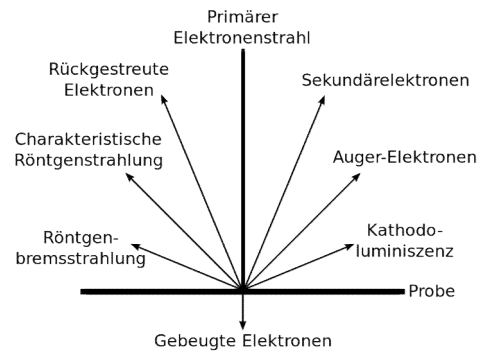
Rasterelektronenmikroskopie (REM)



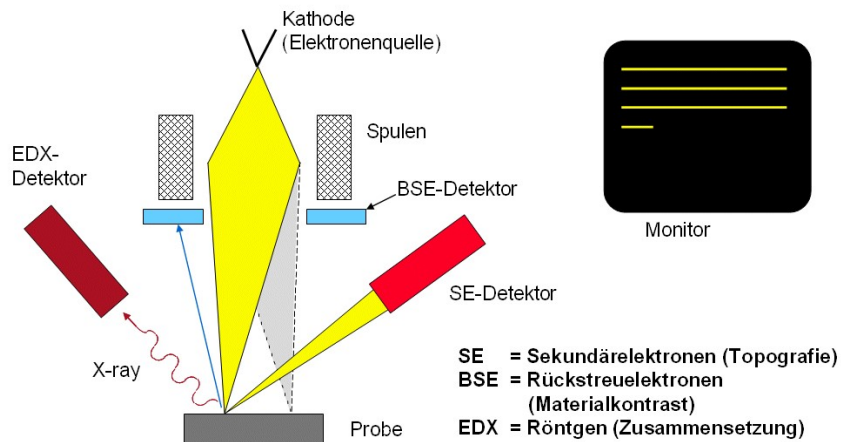
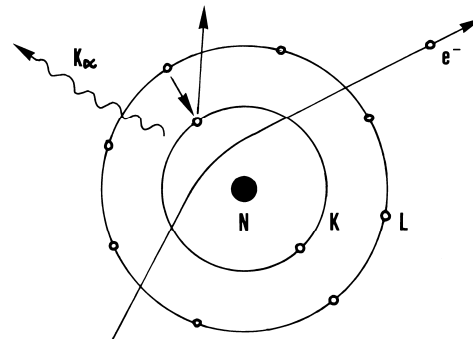
Wichtig:

- Das Funktionsprinzip des Rasterelektronenmikroskops (REM, engl. *ScanningEM*) unterscheidet sich grundlegend von dem des TEMs.
- Ein fokussierter Elektronenstrahl (10 nm) wird rasterförmig über die Probenoberfläche geführt.
- Das vergrößerte Bild entsteht durch die simultane Ablenkung eines Elektronenstrahls in einer Bildröhre, wobei die Intensität (=Helligkeit) dieses Strahles durch die Anzahl der am Kollektor (Detektor) eintreffenden Sekundärelektronen oder der rückgestreuten Elektronen gesteuert wird.

Rasterelektronenmikroskopie



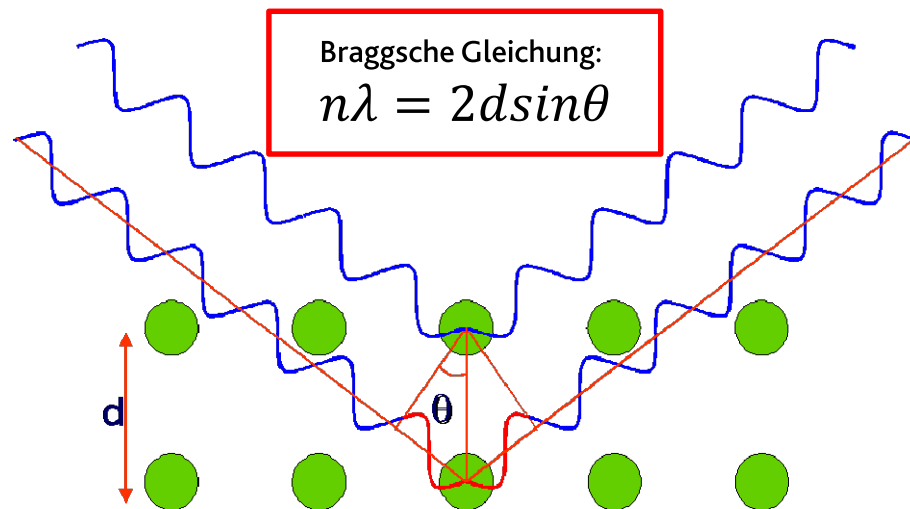
Charakteristische Röntgenstrahlung



Quelle: Wikipedia

Vorteile:

- einfache Probenpräparation
 - höhere Vergrößerung als das Lichtmikroskop
 - hohe Schärfentiefe (wichtig z.B. für Bruchflächen)
 - einfache Kombination mit Analysenzusätzen
- Durch die auftreffenden Elektronen werden verschiedenartige Sekundärteilchen vom Werkstoff freigesetzt.
 - Für die Analyse von Elementen wird meist die charakteristische Röntgenstrahlung benutzt, die dadurch entsteht, dass durch die Primärelektronen Elektronen aus den unteren Schalen der Elektronenhülle der Atome herausgeschlagen werden.



- Da die Atome in einem kristallinen Festkörper in einer regelmäßigen Anordnung vorliegen, löschen sich die Sekundärwellen oder verstärken sich je nach Winkel zwischen dem einfallenden und dem ausfallenden Strahl ($2 \cdot \theta$).
- Maximale Verstärkung ergibt sich genau dann, wenn der Gangunterschied zwischen zwei benachbarten Sekundärwellen ein ganzzahliges Vielfaches (n) der Wellenlänge λ ist
- Durch Ermittlung der Beugungsmaxima kann ermittelt werden:
 - die Kristallstruktur (Kristalltyp)
 - die Größe des Kristallgitters (Gitterkonstanten)