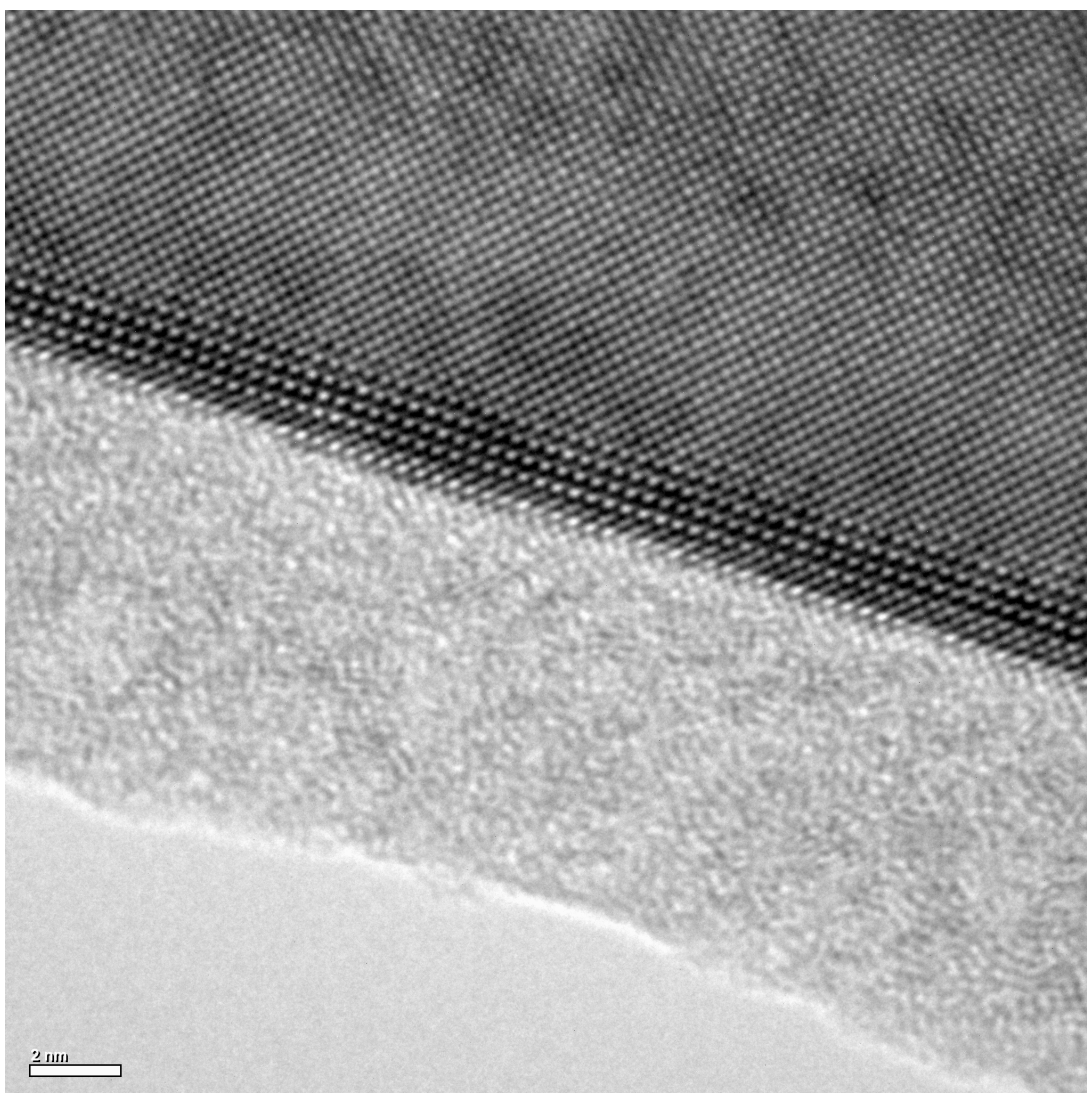


F9

ELEKTRONMIKROSKOPI



TEM-bild i atomär upplösning av en tunn film av LaAlO_3 (fyra enhetsceller tjock, området med högre kontrast i bilden) på ett substrat av SrTiO_3 (bildens övre del). Rester av lim utgör det amorfa materialet i bildens nedre del. Skalstrecket är 2 nm. (Foto: N. Ljustina)

Namn: _____ Utförd den: _____

Handledare: _____ Godkänd den: _____

Handledares underskrift: _____

INNEHÅLL

1 Inledning	3
2 Teori	3
2.1 Stråloptik.....	3
2.2 Upplösning.....	4
2.1 Reciproka gittret.....	6
2.2 Elektrondiffraktion.....	7
3 Transmissionselektronmikroskop	8
3.1 Inledning.....	8
3.2 Princip.....	9
3.3 Uppbyggnad.....	10
3.4 Diffraktion och avbildning.....	11
4 Svepelektronmikroskop	13
4.1 Inledning.....	13
4.2 Princip.....	13
4.3 Uppbyggnad.....	13
4.4 Förstoring.....	14
4.5 Fokusering.....	14
4.6 Skärpedjup.....	15
4.7 Upplösning.....	16
4.8 Bildskapande.....	17
5 Instuderingsfrågor F9	19
6 Arbetsuppgifter F9	21

1 INLEDNING

Elektronmikroskopi är ett område under ständig utveckling, som utgör ett viktigt redskap för materialforskning inom både högskola/universitet och industri. Det finns ett flertal olika typer av elektronmikroskop, men under denna laboration fokuserar vi på två av dem, nämligen transmissionselektronmikroskop (TEM) och svepelektronmikroskop (SEM). Som namnet elektronmikroskop antyder används elektroner för bildskapande i stället för fotoner som i optiska mikroskop.

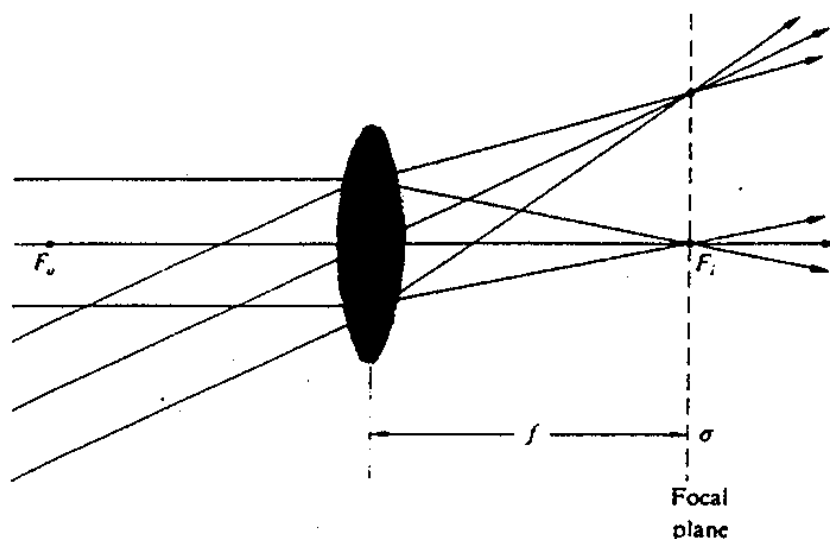
Fördelen med att använda elektroner i stället för fotoner vid avbildningen är att upplösningen blir bättre, dvs. man kan särskilja mindre saker på bilden. Upplösningen för ett modernt TEM är idag ca 1 Å, att jämföras med ca 500 nm för ett optiskt mikroskop. Ett SEM har något sämre upplösning (ca 5 nm) än ett TEM, men har i gengäld andra fördelar, t.ex. ett stort skärpedjup.

Under laborationen får du bekanta dig med både TEM och SEM. Med hjälp av TEM studerar vi ett kristallint prov och lär oss hur mikroskopet kan användas både för att avbilda provet och för att studera dess diffraktionsmönster. Det erhållna diffraktionsmönstret använder vi sedan för att bestämma provets kristallstruktur. Med hjälp av SEM lär vi oss hur elektroner används för att undersöka yttopografi, fassammansättning och kemisk sammansättning hos ett prov.

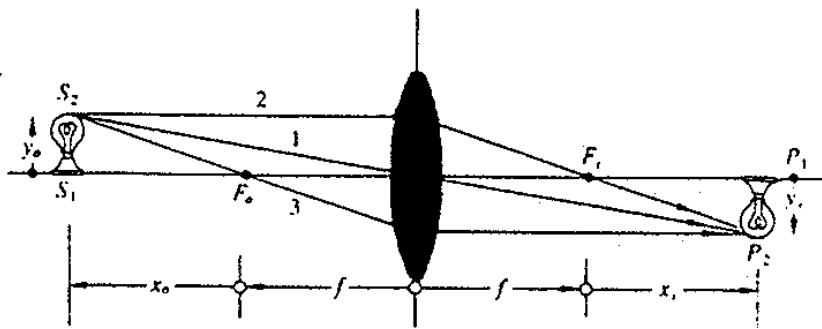
2 TEORI

2.1 Stråloptik

För att ändra riktning på strålar används linser. Vill man styra fotoner kan man t ex använda glaslinser, som i kameror. Vill man styra elektroner kan man använda magnetiska linser, som i elektronmikroskop. En magnetisk lins kan närmast liknas vid en elektromagnetisk spole. Det visar sig att strålgången i magnetiska linser och konvexa glaslinser kan beskrivas med samma matematiska formler.



Figur 1. En konvex lins.



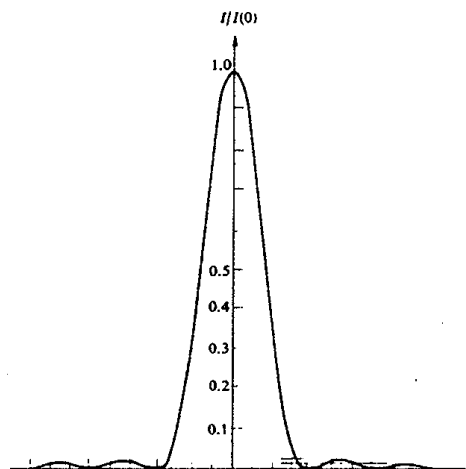
Figur 2. Strålgång i en lens.

Till varje konvex lens finns ett fokalplan, se figur 1. Strålar som är parallella på objektsidan, i figur 1 till vänster om linsen, bryts samman till en punkt i fokalplanet. En stråle, som går igenom centrum på linsen, bryts inte. Till varje lens finns också ett bildplan, se figur 2. Strålar härrörande från en punkt på objektet bryts samman till en punkt i bildplanet. Lagg märke till att bilden spegelvänds.

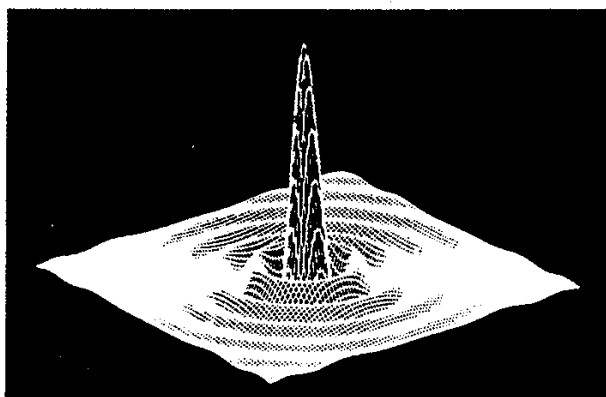
2.2 Upplösning

Om en våg skickas genom en cirkulär bländare (apertur, öppning) fås en intensitetsfördelning (Airy-mönster) enligt figur 3 och 4 på grund av diffraktion.

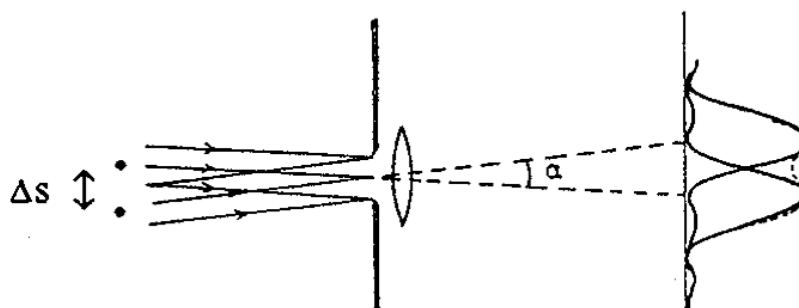
Ett ofta förekommande begrepp inom stråloptik är upplösning. Vad innebär det om upplösningen är t ex $1 \mu\text{m}$? En tumregel är att de minsta partiklar som kan särskiljas är ungefär $1 \mu\text{m}$ stora. En mer exakt definition gjordes av lord Rayleigh. Betrakta figur 5 och 6. Där finns två överlagrade Airy-mönster härstammande från varsin punkt på objektsidan. Om punkterna är för nära varandra kan man inte på bildsidan se att det är två punkter. Är punkterna långt isär kan man utan problem urskilja båda punkterna. Det avstånd som är mellan punkterna när man precis kan urskilja att det är två punkter kallas upplösningen.



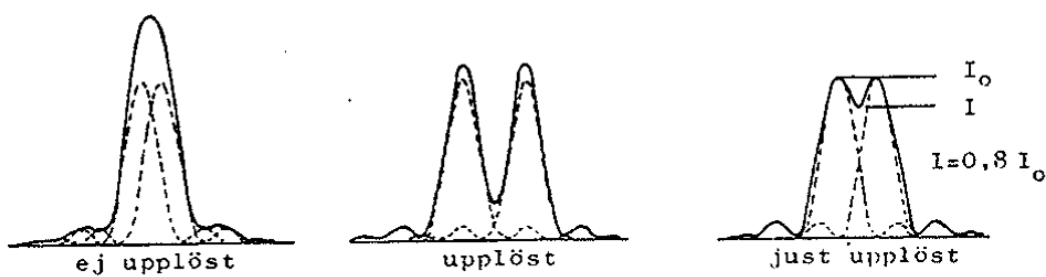
Figur 3. Airy-mönster. Cirkulär apertur.



Figur 4. Airy-mönster. Cirkulär apertur.



Figur 5. Två överlagrade intensitetsmönster.

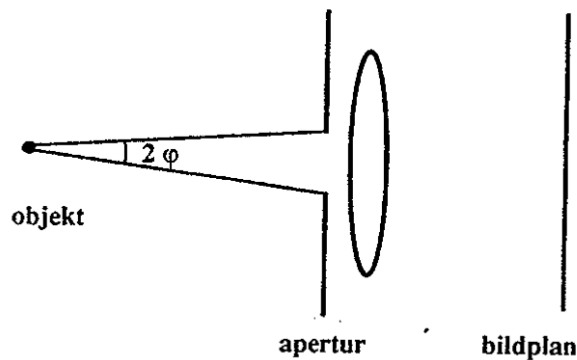


Figur 6. Upplösning.

Man kan härleda att för upplösningen Δs gäller:

$$\Delta s = \frac{0.61 \lambda}{n \sin \varphi}$$

där Δs och φ är definierade i figur 6 respektive 7, samt n är brytningsindex. Observera att upplösningen är våglängdsberoende.



Figur 7.

Enligt de Broglie gäller att en partikel i rörelse har en våglängd, λ , som är:

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv}$$

där m är massan, v hastigheten och h Plancks konstant.

Om v görs stor blir våglängden för elektronerna liten (delar av Å). Detta möjliggör hög upplösning enligt den tidigare ekvationen för Δs . I verkligheten blir upplösningen något sämre än vad teorin ger, bl a beroende på linsfel och defekter i mikroskopet. Totalt blir upplösningen ca 1 Å för ett TEM.

Upplösningen begränsas av att man har en apertur mellan provet och bildskärmen, samt att mikroskopet aldrig går att tillverka helt perfekt.

2.1 Reciproka gittret

Ett centralt koncept inom Fasta tillståndets fysik är det så kallade *reciproka gittret*. För att förstå fenomenet elektrondiffraction, som vi kan åskådliggöra med hjälp av TEM, måste vi ha kunskap om det reciproka gittret. Här går vi kort igenom de för laborationen mest nödvändiga begreppen, som förhoppningsvis är bekanta från kursen.

Det reciproka gittret är en geometrisk konstruktion som är unik för varje given kristallstruktur. Precis som det "verkliga" gittret består av atomer arrangerade i regelbundna mönster, så består det reciproka gittret också av punkter ordnade enligt ett mönster. En gitterpunkt i det reciproka rummet motsvarar emellertid inte den verkliga positionen hos en atom, utan representerar istället en hel familj av parallella atomplan. Varje sådan planskara kan beskrivas med hjälp av sitt Millerindex (hkl), och motsvarande gitterpunkt i reciproka rummet kan skrivas

$$g = hA + kB + lC$$

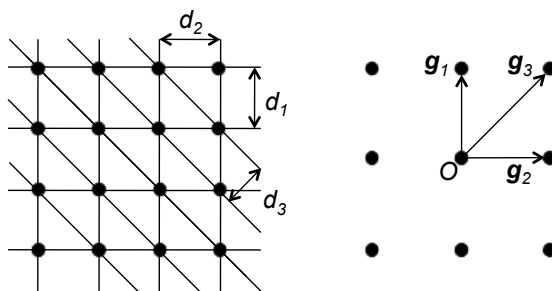
där A , B , C är reciproka gittrets basvektorer. Dessa är relaterade till verkliga gittrets basvektorer a , b , c genom

$$A = \frac{b \times c}{a \cdot (b \times c)}$$

(B och C ges av cyklisk permutation). För g gäller att dess riktning är normal mot planskaran (hkl) och dess längd $|g| = 1/d_{hkl}$, där d_{hkl} är avståndet mellan de parallella atomplanen. d_{hkl} ges av

$$d_{hkl} = \frac{a}{\sqrt{h^2 + k^2 + l^2}}$$

där a är gitterparametern. Namnet på reciproka gittret kommer sig av det reciproka förhållande som råder mellan avstånd i verkliga gittret och avstånd i reciproka gittret. Om avståndet mellan en skara parallella plan är litet så är motsvarande punkt i reciproka gittret belägen långt ifrån origo, och tvärtom. Fig. 8 visar schematiskt förhållandet mellan atomplan i verkliga gittret och punkter i reciproka gittret. Man kan visa att det reciproka gittret fås genom Fouriertransform av det verkliga gittret.



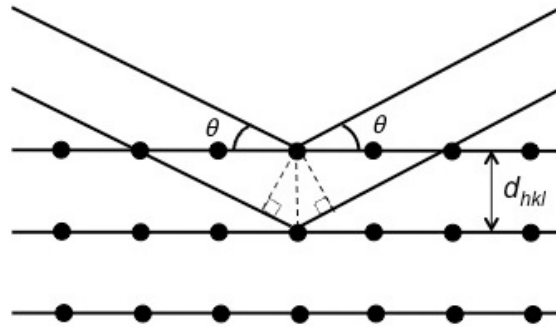
Figur 8. Sambandet mellan atomplan och reciproka gitterpunkter i ett enkelt kubiskt gitter.

2.2 Elektrodiffraktion

När elektroner växelverkar med ett kristallint material kan de p.g.a. sin vågnatur genomgå diffraktion, dvs. spridning mot någon planskara i kristallen. Endast de planskara som är så orienterade i kristallen att Braggs lag är uppfyllt ger upphov till diffraktion. Braggs lag lyder:

$$2d_{hkl} \sin \theta = n\lambda$$

där d_{hkl} och θ är definierade i figur 9, λ är elektronernas våglängd och n är ett heltal. Vad ekvationen säger är att endast om strålar från två närliggande plan ger upphov till konstruktiv interferens så får man diffraktion av den infallande elektronstrålen. I figur 9 är endast en planskara utritad, men flera planskara kan samtidigt uppfylla Braggs lag och på så sätt ge upphov till flera diffrakterade strålar.

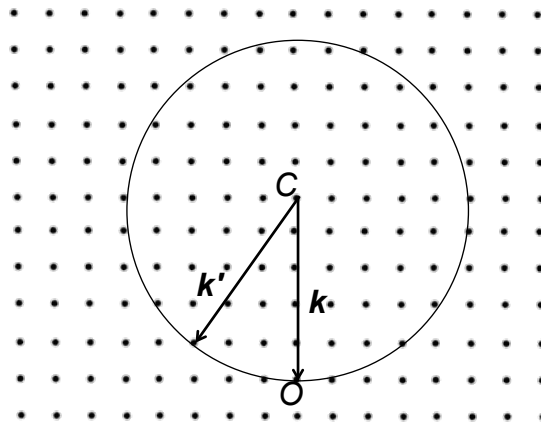


Figur 9. Braggspridning.

Alternativt kan Braggs lag uttryckas i det reciproka rummet och lyder då

$$\Delta \mathbf{k} = \mathbf{G}_{hkl}$$

där \mathbf{G}_{hkl} är en reciprok gittervektor och $\Delta \mathbf{k} = \mathbf{k}' - \mathbf{k}$ är ändringen i vågvektor mellan infallande och diffrakterad stråle. Ett sätt att åskadliggöra detta diffraktionsvillkor är med hjälp av den s.k. Ewaldsfären, som är en konstruktion i reciproka rummet. Den infallande elektronstrålen ritas som en vektor \mathbf{k} där $|\mathbf{k}|=2\pi/\lambda$, med spetsen på origo O i det reciproka gittret. En sfär med radie $2\pi/\lambda$ ritas med centrum i C . De reciproka gitterpunkter som skärs av sfären motsvarar de planskaror som ger upphov till diffrakterade strålar \mathbf{k}' , se fig. 10. Eftersom elektronernas våglängd är liten så är $|\mathbf{k}|$ stort – med andra ord så är sfärens skärning med reciproka gittret nästan ett plan (normalt mot papprets plan – gittret är ju 3D). Faktum är att det diffraktionsmönster som vi kan se i TEM är just denna tvådimensionella skärning av reciproka gittret. Eftersom gitterparametern dessutom är liten jämfört med $|\mathbf{k}|$ så får vi många punkter i vårt diffraktionsmönster.



Figur 10. Ewaldsfärens konstruktion.

3 TRANSMISSIONSELEKTRONMIKROSKOP

3.1 Inledning

TEM är ett avancerat instrument som har många användningsområden inom materialforskning, bl.a. vid studier av korngränser, mikrostruktur och dislokationer.

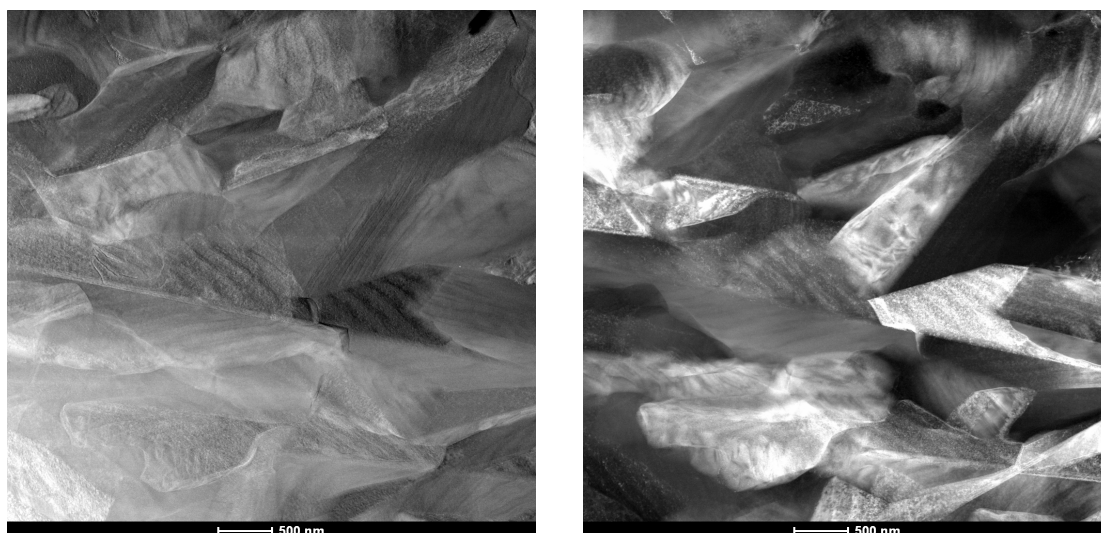
En stor fördel med tekniken är dess höga upplösning; moderna mikroskop har en upplösningssgräns på mindre än 1 Å. Däremot ställs höga krav på provets beskaffenhet – det måste vara tunt och elektriskt ledande, samt befinna sig i högvakuum under mikroskopering.

3.2 Princip

Ett prov bestrålas med elektroner. Provet måste vara tunt (< 100 nm) för att elektroner ska kunna tränga igenom. På undersidan av provet fås en stråle som gått rakt igenom utan att diffrakteras (den s.k. *direkta* strålen), samt ett flertal diffrakterade strålar. Vilka strålar beror på vilka planskaror som uppfyller Braggs lag, vilket beror på kristallens orientering i förhållande till den infallande elektronstrålen. Genom att välja vilken eller vilka av de transmitterade strålarna som ska användas som signal, och ”utestänga” de andra, kan man skapa en bild med olika typer av kontrast (vi ska se hur i nästa avsnitt). Den direkta strålen bär på information om densitet/tjocklek hos olika strukturer i provet. Om vi låter endast denna stråle skapa bilden får vi därför en kontrast som beror av densitet och tjocklek. Denna avbildningsteknik kallas *bright field* (BF).

För kristallina prover gäller att de diffrakterade strålarna bär på information om orientering hos olika delar av provet. Ett vanligt stål består av flera små korn, dvs. är polykristallint. Varje korn är en enkristall och kornen är godtyckligt orienterade i förhållande till varandra. Detta innebär att om ett polykristallint prov bestrålas kommer strålfördelningen att vara olika under varje korn (p.g.a. Braggs lag). Således, om vi utestänger den direkta strålen och istället låter en diffrakterad stråle skapa bilden så kommer olika korn att te sig olika ljusa i bilden. Denna avbildningsteknik kallas *dark field* (DF).

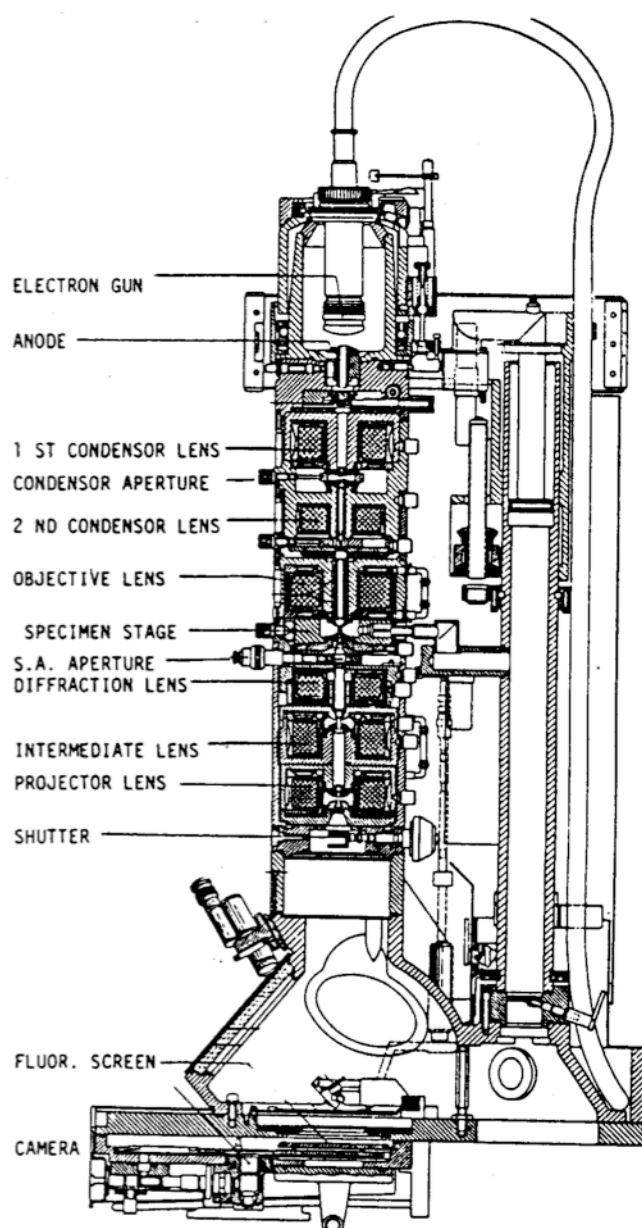
Figur 11 visar ett polykristallint prov avbildat med BF respektive DF.



Figur 11. Ett polykristallint prov avbildat med TEM i BF (vän) och DF (hö). Provet består av ett skikt TiCN som belagts på ett substrat med hjälp av CVD (Chemical Vapour Deposition). (Foto: M. Halvarsson)

3.3 Uppbyggnad

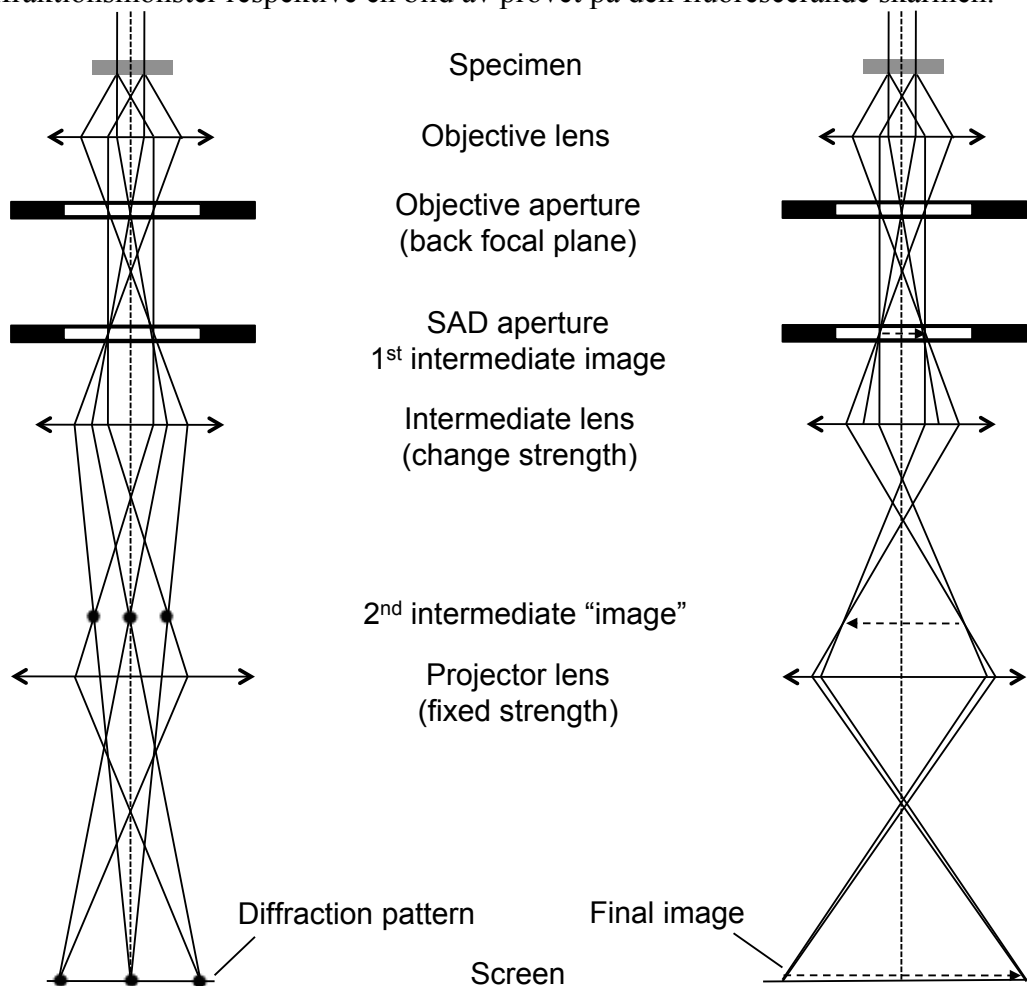
Uppbyggnaden hos ett TEM visas i fig. 12. Elektroner alstras av en **elektronkälla**, accelereras via en potentialskillnad (ca 100 kV) och färdas sedan med konstant hastighet genom resten av mikroskopkolonnen. **Kondensornas** uppgift är att forma en fokuserad elektronstråle med liten diameter och hög strömtäthet på den del av provet som ska avbildas. **Objektivlinsen** är den viktigaste delen i mikroskopet. Det är denna lins som är den bildskapande linsen. De efterföljande linserna förstörar endast den bild som objektivlinsen skapat. Slutbilden betraktas på den **fluorescerande skärmen** längst ned i mikroskopet. Notera att objektivlinsen, som här visas nedanför provet, egentligen har två poler mellan vilka provet är beläget.



Figur 12. Schematisk bild av ett transmissionselektronmikroskop.

3.4 Diffraction and imaging

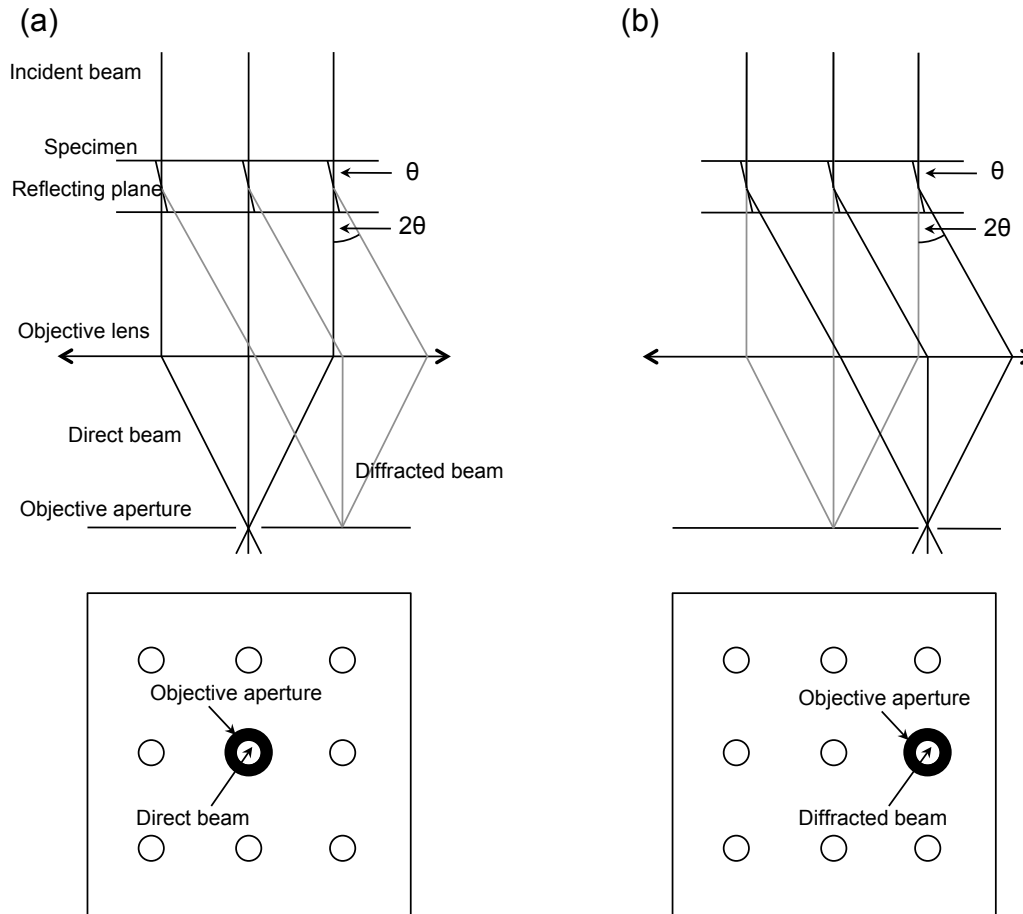
Ett TEM kan användas både för att avbilda ett prov och för att visa dess diffraktionsmönster. Men hur skapas bilden eller diffraktionsmönstret i mikroskopet, och hur kan vi växla mellan att visa det ena eller andra på den fluorescerande skärmen? Fig. 13 illustrerar strålgången genom kolumnen då vi projicerar ett diffraktionsmönster respektive en bild av provet på den fluorescerande skärmen.



Figur 13. Projektion av diffraktionsmönster (vän) eller bild (hö) på skärmen.

Diffraktionsmönstret bildas i objektivlinsens s.k. bakre fokalplan. Elektronerna som genomgått diffraction mot en viss planskara lämnar provets olika delar som parallella strålar med en viss vinkel mot optiska axeln, som visas i figuren. De bryts samman av objektivlinsen till en punkt i dess bakre fokalplan. Om vi istället tittar på det strålnippe som utgår från en viss punkt på provet så ser vi att dessa strålar bryts samman till en punkt i objektivlinsens bildplan nedanför fokalplanet. Eftersom detta gäller för alla punkter på provet skapas således en bild av provet. Det är nu den påföljande linsen, den s.k. intermediära linsen, som avgör om vi visar diffraktionsmönstret eller bilden på skärmen. Nyckeln ligger i vilket plan som agerar objekt för intermediära linsen. Om vi justerar linsen så att objektivlinsens bakre fokalplan agerar objekt så projiceras diffraktionsmönstret på skärmen; om vi istället låter objektivlinsens bildplan agera objekt så ser vi istället en bild av provet.

Vi kan välja om vi vill avbilda i BF eller DF genom att sätta in en apertur i objektivlinsens bakre fokalplan. Aperturen placeras kring den punkt i diffraktionsmönstret som vi vill använda för att skapa bilden, dvs. den direkta strålen för BF eller en diffrakterad stråle för DF, se figur 14.



Figur 14. (a) Den direkta strålen skapar bilden (BF). (b) En diffrakterad stråle skapar bilden (DF).

4 SVEPELEKTRONMIKROSKOP

4.1 Inledning

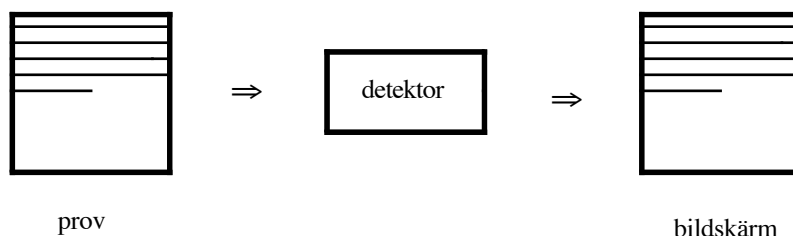
Svepelektronmikroskop (SEM) är ett instrument som används inom vitt skilda områden såsom materialfysik, biologi och elektronik. En stor fördel med ett SEM är dess stora skärpedjup. Det är denna egenskap som främst bidragit till att SEM används i så stor utsträckning inom flera olika ämnesområden. En annan fördel med SEM är att man kan använda tjocka prover (~ decimeter).

Vid höga förstoringar ger ett optiskt mikroskop en tvådimensionell bild av provet, d.v.s skärpedjupet är väldigt litet, medan ett SEM bibehåller sitt stora skärpedjup.

Nackdelar med ett SEM är att man måste ha provet i vakuum under mikroskopering, samt att provet måste vara elektriskt ledande.

4.2 Princip

En elektronstråle sveps över provytan samtidigt som en annan sveps över en bildskärm. När elektronstrålen med hög energi träffar provet alstras många olika signaler. Man väljer att detektera en viss typ av signal. Denna signals intensitet låter man styra intensiteten på elektronstrålen som träffar bildskärmen. En punkt på provet motsvaras alltså av en punkt på bildskärmen, se figur 15.



Figur 15. Provet och bildskärmen sveps synkront. Bilden motsvarar provet punkt för punkt.

4.3 Uppbyggnad

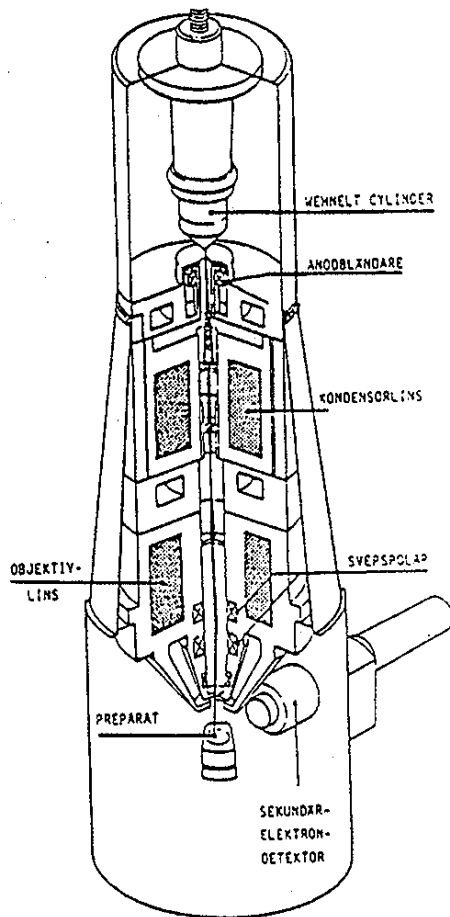
Ett SEM's uppbyggnad visas i figur 16 och (schematiskt) i figur 17.

Elektroner alstras av en elektronkälla, accelereras via en potentialskillnad (ca 30 kV) mellan två plattor och färdas sedan med konstant hastighet genom resten av mikroskopkolonnen.

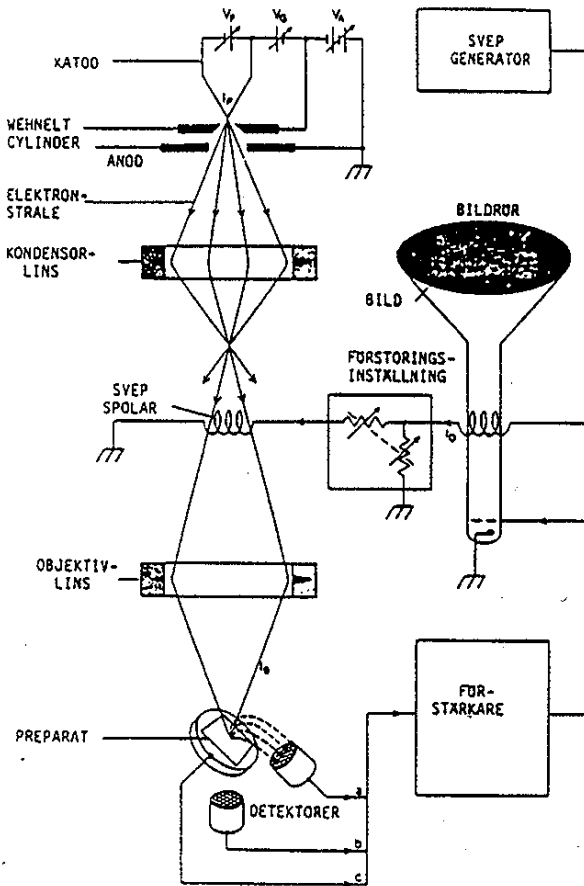
Magnetlinsernas enda uppgift i SEM är att forma en fokuserad elektronstråle med liten diameter och hög strömtäthet på provet.

Svepet av elektronstrålen över provet styrs av svepspolarna. Genom att öka strömmen i dessa spolar, ökar svepets längd över provet.

Detektorn omvandlar signalen från provet till en elektrisk signal som används för att styra bildskärmsstrålens intensitet.



Figur 16. Ett svepelektronmikroskop.



Figur 17. Schematisk uppställning.

4.4 Förstoring

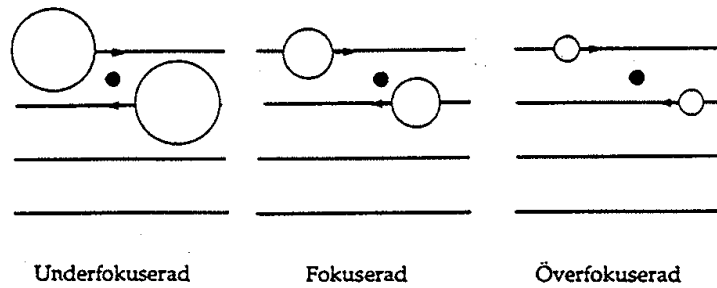
Ett SEM har inga förstörande linser, utan förstoringen M ges av

$$M = \frac{\text{bildskärmens kantlängd}}{\text{sveplängden på provet}} \quad [\text{S.1}]$$

Om man vill ändra förstoringen ändrar man helt enkelt sveplängden över provet.

4.5 Fokusering

Sedan man valt förstoring måste man välja stråldiameter så att varje punkt på provytan träffas en och endast en gång av elektronstrålen. Definitionen av över- och underfokuserad bild visas i figur 18. En underfokuserad bild ger bl a sämre upplösning och en överfokuserad bild ett sämre signal/brusförhållande.



Figur 18. Den svarta punkten motsvarar en punkt på provet. De större cirklarna visar elektronstrålens utseende. Om elektronstrålen har för stor diameter kommer den svarta punkten på provet att ge information till två punkter på bildskärmen, d.v.s upplösningen minskar (underfokuserad bild). Om bilden är överfokuserad är stråldiametern för liten och man får ett dåligt signal/brus-förhållande.

4.6 Skärpedjup

Med skärpedjup avses det höjdintervall på provet inom vilket man har en godtagbar upplösning. Antag att bildskärmen är 10 x 10 cm och är uppbyggd av 1000 linjers svep. Upplösningen på skärmen, Δ , blir då 0.1 mm. Detta motsvaras av en upplösning δ på provet:

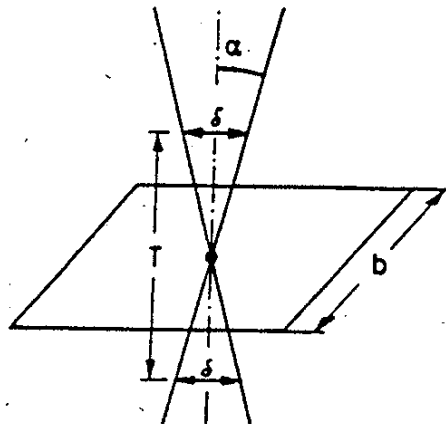
$$\delta = \frac{\Delta}{M} \quad [S.2]$$

Orsaken till att skärpedjupet, T , är begränsat är att den fokuserade elektronstrålen ser ut som en 'dubbel-kon', se figur 19. Strålens diameter är alltså höjdberoende. Ur figur 19 fås geometriskt:

$$\tan \alpha = \frac{\delta}{T} \Rightarrow [\alpha \text{ liten}] \Rightarrow \alpha = \frac{\delta}{T} \quad [S.3]$$

vilket leder till att

$$T = \frac{\Delta}{\alpha M} \quad [S.4]$$



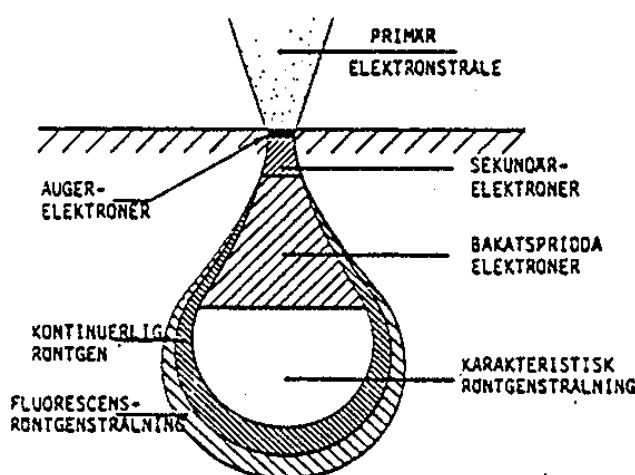
Figur 19. Skärpedjupet vid avbildning av en yta.

4.7 Upplösning

Upplösningen beror bl a på vilken signal man detekterar. De signaler man oftast använder är sekundärelektroner, bakåtspridda elektroner samt röntgenstrålning.

1. Sekundärelektroner. Dessa elektroner tillhörde från början provet, men slogs loss av den infallande elektronstrålen. Sekundärelektronerna har en energi på ca 30 eV.
2. Bakåtspridda elektroner. Dessa elektroner tillhörde från början den infallande elektronstrålen, studsade på provet och nådde detektorn. Bakåtspridda elektroner har en energi på ca 20 keV, d v s ungefär samma som infallande elektroner.
3. Röntgenstrålning. I och med att elektroner slås ut ur sina banor kommer andra elektroner att falla ned till energinivåer som blivit lediga, samtidigt som karakteristisk röntgenstrålning (fotoner) sänds ut. Denna strålning kan detekteras och på så sätt tala om vilket atomslag provet består utav, d v s man kan göra en kemisk analys.

Om man studerar från vilka områden i provet de olika signalerna kommer ifrån kan resultatet illustreras som i figur 20.



Figur 20. Områden som olika signaler kommer ifrån.

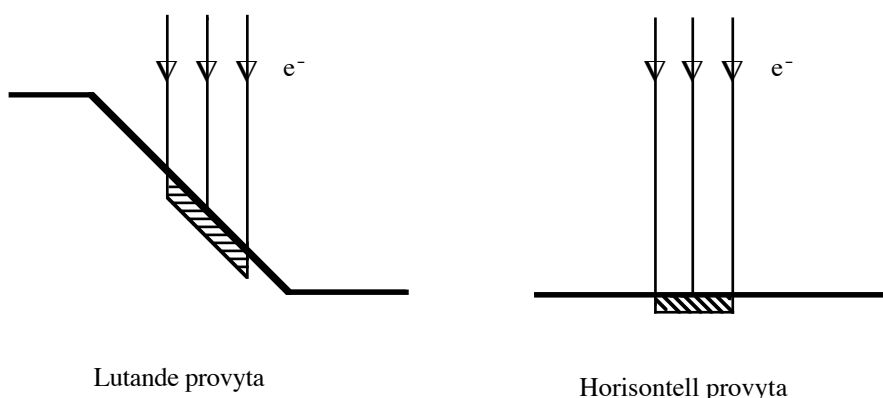
Orsaken till att områdena är olika stora är att helt olika fysikaliska mekanismer ligger bakom uppkomsten av de olika signalerna. I och med att områdena är olika stora beror upplösningen på vilken signal som används. Ungefärliga värden på maximala upplösningen finns i tabell 1.

Sekundärelektroner	5 nm
Bakåtspridda elektroner	100 nm
Röntgenstrålning	1 μm

4.8 Bildskapande

Det är vanligen bara sekundärelektroner och bakåtspridda elektroner som används för att generera en bild. Röntgenstrålningen används oftast till att göra en kemisk analys i en punkt, d v s man stannar elektronstrålen på det ställe man vill undersöka.

Om man detekterar sekundärelektroner kommer bildkontrasten i första hand att bero på provets topografi. Förklaringen är att sekundärelektronerna som når detektorn endast kommer från provets ytskikt. Antalet elektroner som träffar detektorn beror på hur många elektroner som knockats ut från provet. Om en viss del av provytan lutar kommer den att synas som ljus på bilden, eftersom volymen som träffas av elektronstrålen är större än om provytan är plan, se figur 21.



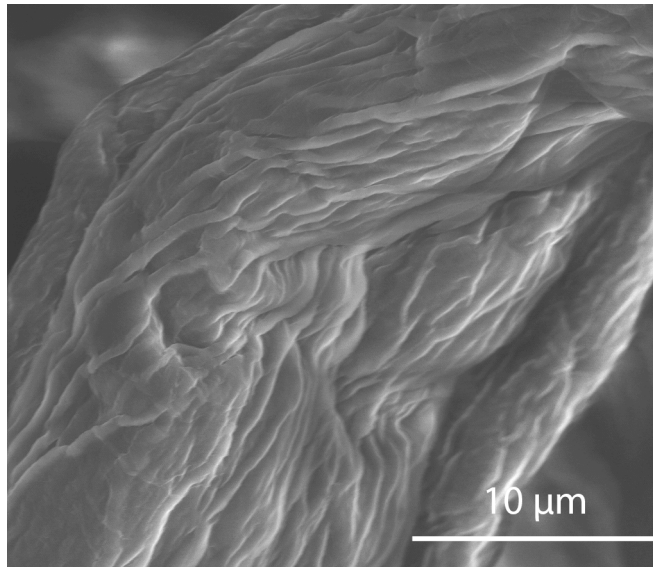
Figur 21. Fler sekundärelektroner slås ut om provytan lutar. Sekundärelektroner från det streckade området kan nå detektorn.

Om man detekterar bakåtspridda elektroner fås kontrast på grund av att 'studskoefficienten' för de infallande elektronerna beror på atomslaget i provet. Ju fler elektroner som finns per atom (högre atomnummer) i provet, desto högre 'studskoefficient'.

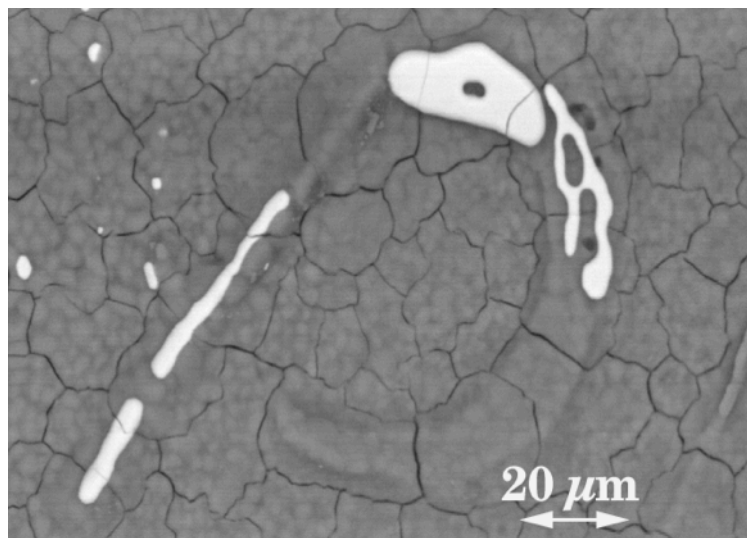
I figur 22 visas en bild tagen med en sekundärelektrondetektor och figur 23 med en detektor för bakåtspridda elektroner.

Sammanfattningsvis kan sägas om bildformning i SEM:

<p>Sekundärelektroner: Bildkontrasten beror på topografin.</p> <p>Bakåtspridda elektroner: Bildkontrasten beror på att provet innehåller olika grundämnen.</p>
--



Figur 22. Yttopografien på en cellulosafiber, ca 20 μm bred. Detektor för sekundärelektroner använd. (Foto: A. Jansson)



Figur 16. Ett lager kiseloxid, avbildat med detektorn för bakåtspridda elektroner. De ljusa regionerna är yttriumberikade områden, som ger högre kontrast p.g.a. högre atomnummer. De mörka linjerna är sprickor i kiseloxidytan från vilka elektronerna ej kan emitteras i lika hög grad som från omgivande material utan "fastnar". (Foto: M. Halvarsson)

5 INSTUDERINGSFRÅGOR F9

Dessa 10 frågor skall besvaras före laborationen.

1) Vad betyder strukturfaktor? _____

2) Vad är strukturfaktorn för fcc, bcc respektive sc (simple cubic)? _____

3) Vad är Ewaldsfären? _____

4) Vad är en reciprok gittervektor? _____

5) Vad är upplösningen för OM, SEM och TEM? _____

6) Vad menas med ett fokalplan? _____

7) Vad innebär elektrondiffraktion? _____

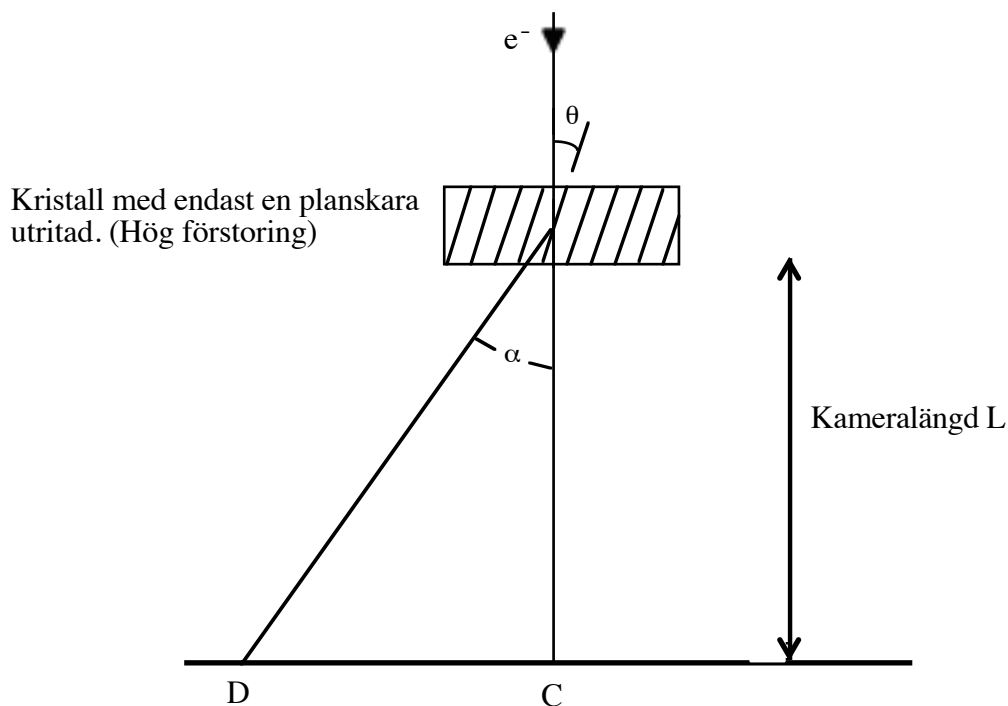
8) Vad har kondensorlinserna för uppgift i ett TEM? _____

9) Vad har svepspolarna för uppgift i ett SEM? _____

10) Vad menas med bakåtspridda elektroner? _____

6 ARBETSUPPGIFTER F9

- I ett 100 kV elektronmikroskop används en objektivbländare med diameter 15 μm . Detta motsvaras av en öppningsvinkel $2\varphi = 0.6^\circ$.
 - Beräkna den teoretiska upplösningens gränser.
 - Vad är den verkliga upplösningens gränser?
- Beräkna den teoretiska upplösningens gränser för ett optiskt mikroskop med halva öppningsvinkeln $\varphi = 27^\circ$ om man använder blått ljus ($\lambda = 400 \text{ nm}$) och immersionolja ($n = 1.6$).
- Antag att en viss planskara befinner sig i exakt Braggläge. Figuren visar strålgången i ett av de spridande planen. θ är mycket liten.
 - Hur stor är vinkeln α mellan den spridda strålen och den transmitterade strålen, uttryckt i θ ?
 - Hur stor är sträckan CD på bildskärmen, uttryckt i L och θ ?
 - Hur stort är avståndet d mellan två närliggande plan uttryckt i θ ?
 - Uttryck CD som funktion av d .
 - Vad är sambandet mellan G (reciprok gittervektor) och d ? Vilken viktig slutsats kan man dra om CD ?



4. Betrakta bilden av diffraktionsmönstret. Accelerationsspänning 100 kV. Provet är fcc. Kameralängden L är 0.558 m.
- a) Beräkna avståndet d för de olika planskaror som givit upphov till punkter i diffraktionsmönstret. Det räcker att beräkna de två största d -värdena.
 - b) Indicera diffraktionsmönstret.
 - c) Bestäm gitterparametern a .
 - d) Bestäm den infallande strålens *riktning*.