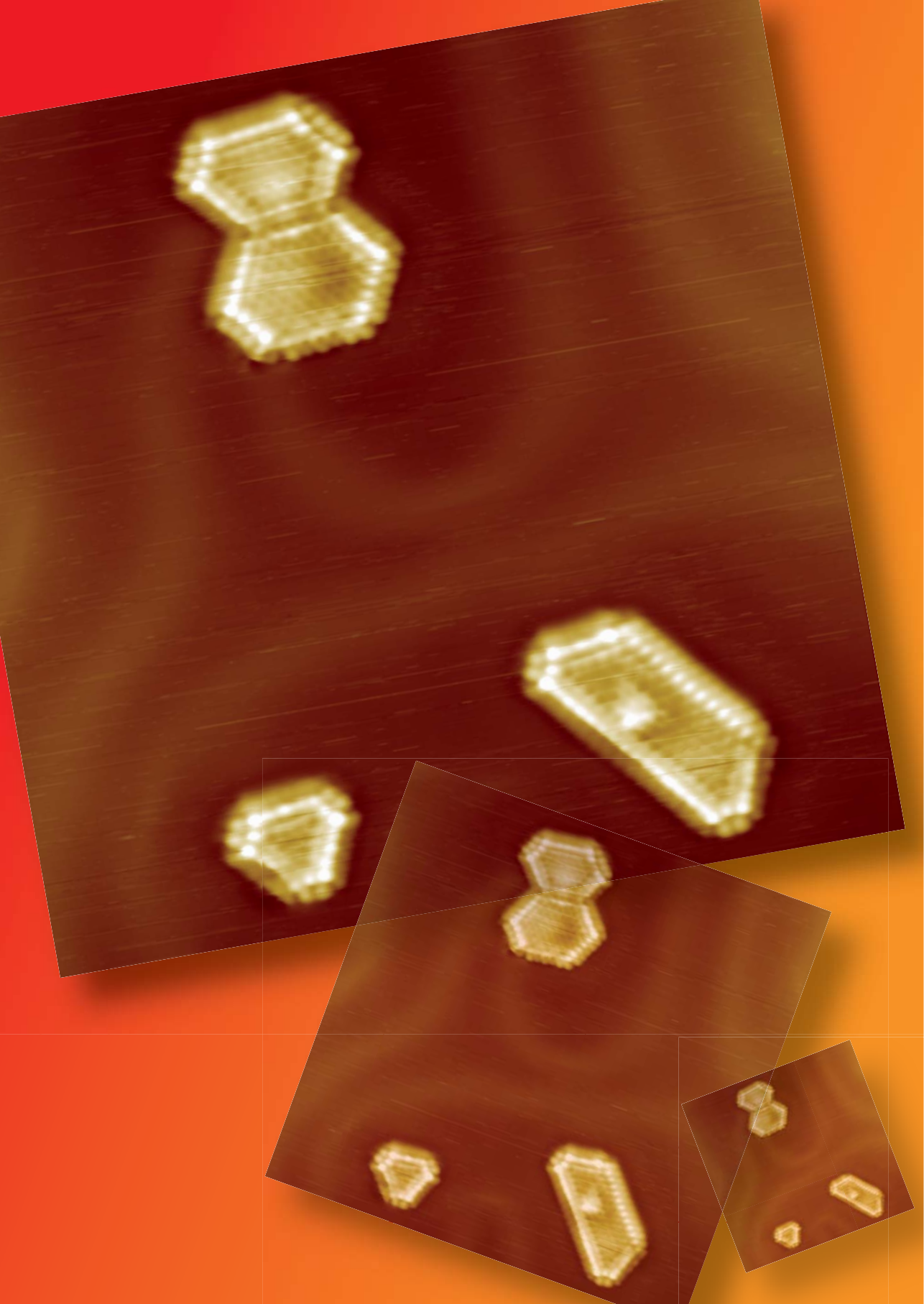




Nanoteknologi i billeder



Jakob B. Wagner, Center for Elektronnanoskopi

Sebastian Horch, Center for Atomic-scale Materials Design, Institut for Fysik

Jane Hvolbæk Nielsen, Center for Individual Nanoparticle Functionality, Institut for Fysik

Kristian Mølhave, Institut for Mikro- og Nanoteknologi

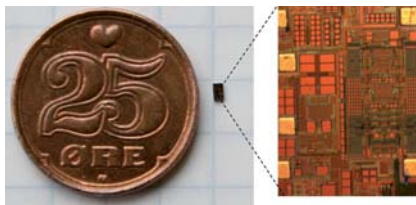
Det bliver aldrig muligt at se atomer med det blotte øje eller et almindeligt lysmikroskop. Men takket være nogle helt nye typer mikroskoper er det i dag muligt at se atomer i en prøve. I stedet for lys bruger mikroskoperne enten elektroner eller ultrafine nåle med spidser blot få atomer brede til at undersøge overfladen med. Fælles for mikroskoperne er, at man kan bruge dem til at studere, hvordan de enkelte atomer i en prøve er placeret. Det skaber helt nye muligheder for forskerne, der blandt andet bruger den avancerede teknologi til at designe bedre katalysatorer, bygge nanoelektronik og studere bakterier i deres naturlige miljø.

Med det blotte øje kan man skelne ting, der er lidt mindre end 0,1 mm, hvilket svarer til tykkelsen af et hår. Gennem de sidste 400 år har mennesket udviklet stadigt bedre mikroskoper, som har sat os i stand til at undersøge mindre og mindre genstande (*boks 1*). Men der er en fysisk grænse for, hvor små ting man kan se med et almindeligt *lysmikroskop*. Hvis man vil under den grænse, må man bruge noget andet end lys til at 'se' med, og det er netop det, der er fælles for mikroskoperne, som dette kapitel handler om, nemlig *elektronmikroskoper* og *Skanning Probe Mikroskoper* (SPM).

Et kig ind i mikrochippens verden

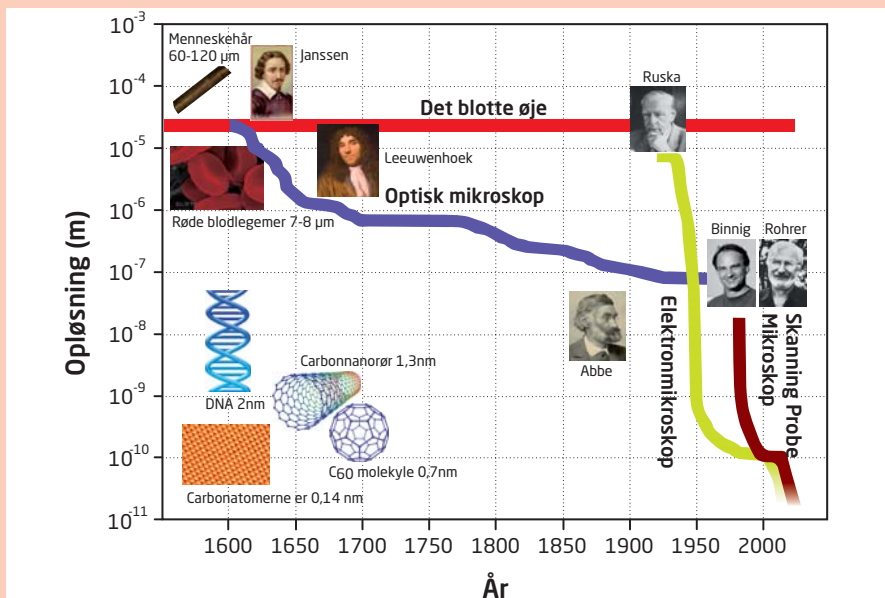
Byggestenene i nanoteknologien er for små til at se med det blotte øje. Hvis man for eksempel ser på et *integreret kredsløb* eller *mikrochip*, som man kender fra stort set alle elektroniske apparater, består den af små ledninger og elektriske komponenter, som er umulige at se uden mikroskop.

Figur 1 viser et fotografi af en typisk mikrochip sammen med en femogtyveøre og ved siden af et billede af den samme mikrochip set under et lysmikroskop. Hele mikrochippet er cirka 1 mm stor. Selv under et lysmikroskop er det svært at skelne de enkelte komponenter, og det er umuligt at se, om der for eksempel er skader på nogle af ledningerne. Senere i kapitlet vender vi tilbage til chippen, hvor vi kan se endnu flere detaljer med elektronmikroskopet.



Figur 1. En mikrochip består af mange små ledninger og elektriske komponenter. Til venstre ses et fotografi af en typisk mikrochip sammen med en femogtyveøre og til højre ses den samme mikrochip under et lysmikroskop. Her kan man begynde at ane de enkelte ledninger og komponenter som mikrochippen består af.

Boks 1. Mikroskopets historie



Mikroskopernes opløsning er blevet bedre og bedre de sidste 400 år.

1590: De hollandske linseslibere Hans og Zacharias Janssen laver det første mikroskop.

1675: Anton van Leeuwenhoek bruger et simpelt lysmikroskop med kun en linse til at studere bakterier og insekter.

1878: Ernst Abbe beskriver den matematiske teori, der viser sammenhængen mellem lysets bølgelængde og mikroskopets opløsningsevne.

1938: Ernst Ruska udvikler elektronmikroskopet.

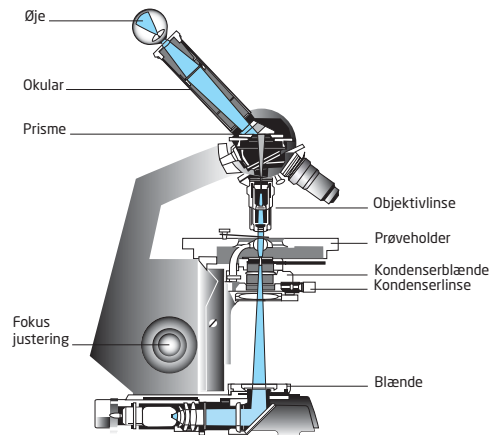
1981: Gerd Binnig og Heinrich Rohrer opfinder *Skanning Tunnel Mikroskopet* (STM).

1986: Gerd Binnig, Calvin Quate og Christoph Gerber opfinder *Atomic Force Mikroskopet* (AFM). STM og AFM tilhører gruppen af *Skanning Probe Mikroskoper*.

Lysmikroskop: Naturen sætter grænsen for opløsningen

Før vi vender os mod elektronmikroskoperne og SPM, starter vi med at se på principperne i lysmikroskopi. Ordet mikroskop kommer fra de græske ord for lille (*'mikros'*) og betragte (*'skopein'*). Et lysmikroskop er i princippet en række forstørrelsesglas placeret i forlængelse af hinanden. På den måde får man en bedre forstørrelse og et tydeligere billede, end når man kun bruger ét forstørrelsesglas eller én linse. Lysmikroskopet fungerer ved, at lyset fra en kraftig pære fokuseres på det objekt, man undersøger, som det er vist i *figur 2*. Objektet kaster lyset tilbage mod objektivlinserne, der forstørrer billedet. Ved at kigge ned i okularet opfanger vi det forstørrede billede med vores øjne.

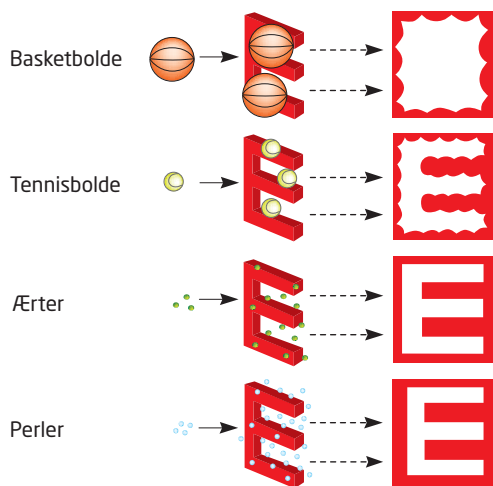
Figur 2. Et lysmikroskop består af en lyskilde, kondenserlinser og objektivlinser. Lyset fra lyskilden fokuseres på prøven ved hjælp af kondenserlinserne, mens forstørrelsen af det objekt, man undersøger, sker i objektivlinserne.



Der er en grænse for, hvor mange detaljer man kan se med et lysmikroskop. Den grænse er givet af naturen og har at gøre med bølgelængden af synligt lys, og ligegyldigt hvor mange og hvor gode linser man bruger, kan man ikke overskride den. For at forstå det, er det nødvendigt at forstå forskellen mellem 'forstørrelse' og 'opløsning'. Man kan altid zoome ind eller forstørre et billede, men det er ikke sikkert, at man kan se flere detaljer i billedet efter forstørrelsen.

Opløsningen er et mål for størrelsen af de mindste detaljer, man kan se i et billede, uanset hvor meget man forstørrer. I *figur 3* har vi forsøgt at lave et billede af bogstavet E ved at bruge bolde af forskellig størrelse til at 'se' med. Boldenes størrelser illustrerer forskellige opløsninger. Hvis man skyder de største bolde (basketbolde) mod E'et, kan de kun passere uden om E'et og ikke igennem tværstregerne. Derved får man bare et firkantet billede, som ikke har ret mange detaljer – uanset hvor meget man forstørrer dette billede, kan man ikke se, at det er et E. Hvis man bruger mindre bolde, danner man et skarpere billede med flere detaljer, og man kan nu se, at det er et E. Både i eksemplet med boldene og for rigtige mikroskoper gælder det, at jo bedre opløsning, des flere detaljer får man med på billedet.

I rigtige mikroskoper er det ikke boldenes størrelse, men lysets bølgelængde, der sætter grænsen for opløsningen. Lys består af bølger med en bestemt bølgelængde. For synligt lys ligger bølgelængden mellem 400 nm (blåt lys) og 700 nm (rødt lys). Bølgelængden af lyset svarer til størrelsen af boldene i *figur 3* og definerer altså vores opløsning. Hvis E'et kun



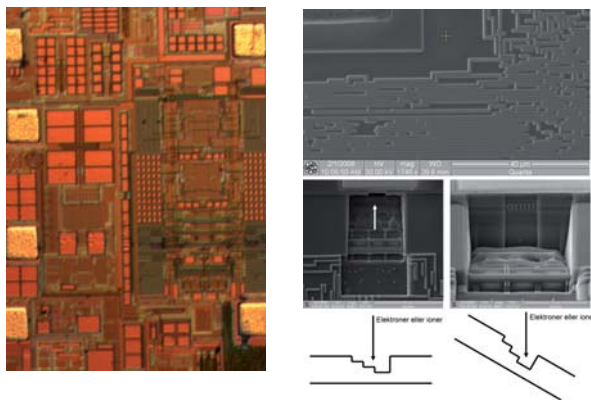
var 500 nm højt, ville lyset ikke kunne opløse alle detaljer, ligesom basketballene ikke kan det. Vil man se detaljer, der er mindre end cirka 200 nm, må man bruge noget andet end lys til at 'se' med.

Figur 3. Opløsningen af et billede er et mål for, hvor mange detaljer man kan se på billedet, og er begrænset af lysets bølgelængde. Her svarer boldenes størrelse til lysets bølgelængde.

Elektroner i stedet for lys

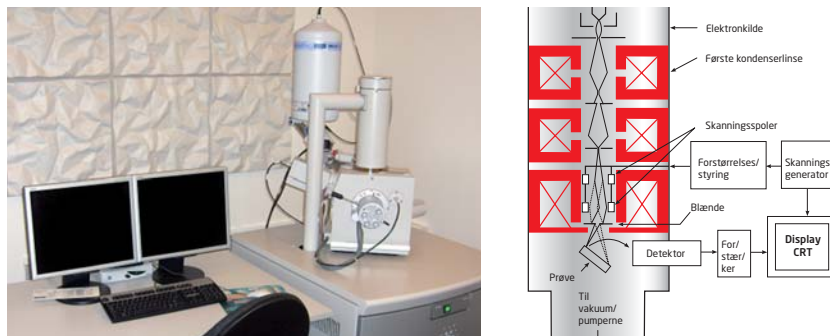
Figur 4 viser mikrochippen fra figur 1 forstørret i lysmikroskopet samt ved højere forstørrelse. Billedet til højre er taget med et elektronmikroskop, der laver billeder ved hjælp af elektroner i stedet for synligt lys. Fordelen ved at bruge elektroner i stedet for lys er, at man kan lave elektronstråler med meget kortere bølgelængde end bølgelængden af det synlige lys. Det skyldes, at elektronstrålens bølgelængde afhænger af hastigheden af elektronerne, og at hastigheden kan kontrolleres forholdsvis nemt ved at accelerere elektronerne op over et elektrisk spændingsfelt. Det betyder, at man med et elektronmikroskop kan forbedre opløsningen tusind gange. På det øverste billede til højre i figur 4 ser man tydeligt de enkelte ledninger på mikrochippen. Den lysegrå firkant i toppen af billedet er en af de store gyldne firkanter i figur 1. Det er kun overfladen af mikrochippen, man kan se på billedet, og da mange af ledningerne og de elektriske komponenter ligger i lag under overfladen, skærer man et hul i prøven (nederst til venstre på billedet til højre) og ser ind på siden af hullet (nederst til højre).

Figur 4. Mikrochippen fra figur 1 set med lysmikroskop (venstre) og elektronmikroskop (højre). Øverst til højre ses chippen oppefra, mens de to nederste billeder til højre viser det indvendige af chippen.



Billederne i figur 4 er taget med et såkaldt *Skanning Elektronmikroskop* (SEM). Et SEM fungerer i princippet som et lysmikroskop, blot er lysets fotoner skiftet ud med elektroner

(figur 5). Ved hjælp af *elektromagnetiske linser* fokuseres elektroner med en bestemt energi til en stråle med en diameter på 1 nm, som fejer (deraf navnet *Skanning Elektronmikroskop*) hen over prøvens overflade. Når elektronstrålen rammer atomer i overfladen, slår den nogle af atomernes elektroner løs. De løsslåede elektroner kaldes for sekundære elektroner og opfanges af en detektor, hvorefter den elektriske information oversættes til et billede i en computer. Antallet af sekundære elektroner afhænger af atomernes masse og af overfladens topografi, det vil sige højdeforskellene. Derfor kan et SEM både fortælle noget om prøveoverfladens form og om, hvilke materialer prøven består af.



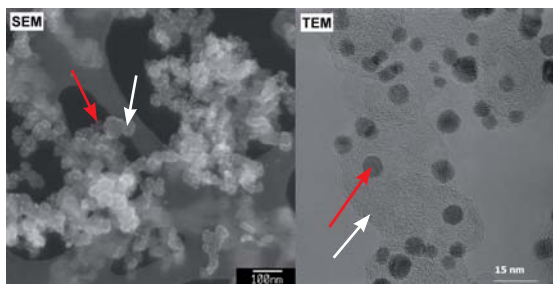
Figur 5. Venstre: Et typisk SEM. Højre: Skematisk opbygning af SEM. Ligesom det optiske mikroskop har et SEM linser, der samler elektronstrålen. Linserne er hule, så elektronstrålen kan bevæge sig gennem dem. Elektroner bremses ved sammenstød med luftens molekyler, derfor tømmer en pumpe elektronmikroskopet for luft. En detektor opfanger de sekundære elektroner, der bliver analyseret, hvorefter forskerne aflæser information om prøvens form, og hvilke stoffer den består af, på en computer.

I stedet for elektroner kan man også skanne med ioner i et SEM. En stråle af elektrisk ladede ioner kan styres på samme måde som elektronstrålen, og fordi massen af ionerne er så stor, slår de atomer løs, når de rammer prøven. På den måde kan man bruge ionstrålen som en kniv og skære meget præcist i prøven. I figur 4 har vi skåret et hul i mikrochippen, så vi kan se, hvad der gemmer sig under overfladen. De elektriske komponenter og ledninger ligger i flere lag, så for at undersøge de 'gemte' komponenter skræller man de øverste lag af. Når man bruger ioner til at skære i prøven, kalder man mikroskopet et *Fokuseret Ionstråle Mikroskop* eller et FIB efter det engelske navn 'Focused Ion Beam microscope'. Du kan læse mere om brugen af FIB i kapitel 8, der handler om, hvordan man fremstiller mikro- og nanokomponenter. SEM er et meget anvendt mikroskop, som mange forsknings- og udviklingsafdelinger bruger rutinemæssigt. Det er dog typisk begrænset til at kunne se fra millimeter ned til en størrelsesorden på cirka 10 nm. Hvis man vil zoomere længere ind, må man bruge et andet mikroskop, som næste afsnit handler om.

Vi zoomer ind på nanopartikler

En typisk katalysator består af partikler, der kun er nogle få nanometer (10^{-9} m) store. Disse partikler ligger spredt ud på et andet materiale, for at de ikke skal klumpe sammen.

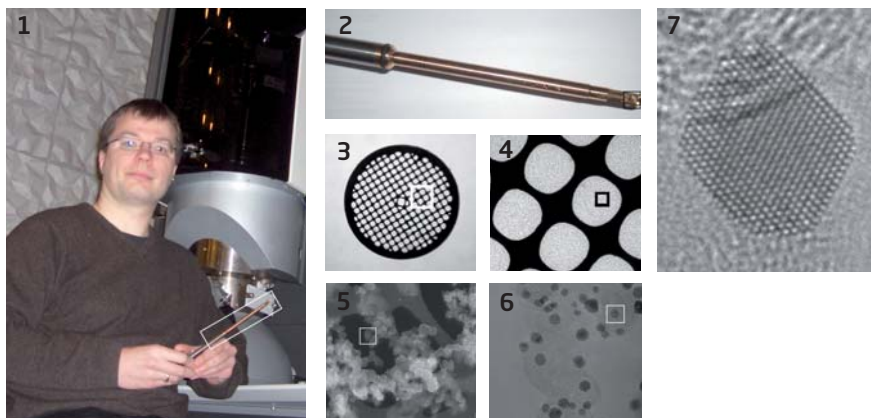
Katalysatorer bliver gennemgået i detaljer i kapitel 3, lige nu er det nok at vide, at katalysatorpartiklernes form er afgørende for, hvor godt katalysatoren virker.



Figur 6. En katalysator bestående af platinanopartikler (rød pil) på en overflade af carbon (hvid pil) set gennem et SEM (venstre) og et TEM (højre).

Figur 6 viser to billeder af en typisk katalysator taget med elektronmikroskop. Katalysatoren består af få nanometer store platinpartikler lagt ud på en overflade af carbon. Billedet til højre er taget med et *Transmissions Elektronmikroskop* (TEM) og laver billeder med en bedre opløsning end et SEM. Den største forskel på de to mikroskoper er dog, at mens man i et SEM kun ser på overfladen af prøve, så kigger man med et TEM igennem prøven, og dermed får man også oplysninger om det indre af nanopartiklerne. For at elektronerne skal kunne bevæge sig igennem en prøve, skal prøven være meget tynd – helst ikke over 200 nm tyk. Til gengæld kan man så få en opløsning helt ned på 0,5 ångstrøm, det vil sige 0,05 nm. Et atom er typisk 1-3 ångstrøm i diameter, så med et TEM kan man se de enkelte atomer i et materiale.

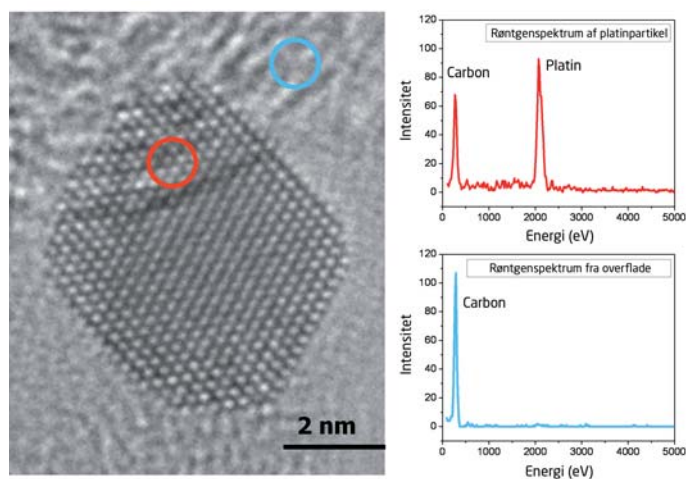
Det kan være svært at forestille sig, hvor meget et materiale skal forstørres, for at man kan se atomerne. I figur 7 forstørres vi en prøve gennem flere trin for til sidst at vise prøven i cirka 10 millioner gange forstørrelse.



Figur 7. Fra Jakob til atomer: På første billede ses forfatteren ved siden af et TEM. I hånden har han en prøveholder, som også ses på billede 2. Herfra zoomes der først ind til det såkaldte TEM-gitter (billede 3 og 4), der indeholder prøven, og dernæst helt ind på de enkelte nanopartikler (billede 5, 6 og 7). Prikkerne på partiklen på billede 7 svarer til enkelte atomer.

Den bedste opløsning, man kan få i dag (2008) med elektronmikroskoper, er lidt under 0,1 nm. Bølgelængden for elektroner, der er accelereret op med 300 kV, er dog cirka 0,002 nm. Desværre kan de elektromagnetiske linser i elektronmikroskoperne ikke laves lige så perfekte, som man kender det fra glasinserne i lysmikroskoper. Det er derfor de elektromagnetiske linser, der sætter begrænsningen for, hvor god en opløsning vi kan få med elektronmikroskoper. Men selvom linserne altså langt fra er perfekte – forskerne sammenligner dem nogle gange med at bruge bunden af en colaflaske som brilleglas – er opløsningen stadig cirka 0,2 nm, hvilket er tusind gange bedre end et lysmikroskop. Derudover er det i dag lykkedes at udvikle et ekstra sæt linser, som kan sættes på TEM, så opløsningen forbedres til cirka 0,07 nm. Man kan sige, at mikroskopet har fået briller.

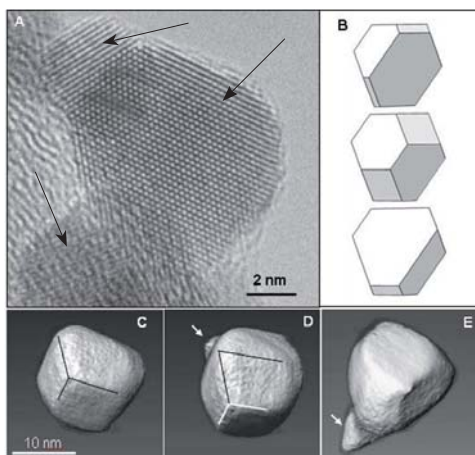
Ud over at vise prøvens form kan et elektronmikroskop som nævnt også bruges til at identificere, hvilke grundstoffer prøven består af. Når elektronstrålen rammer prøven, udsendes der blandt andet røntgenstråling fra prøven. Det er, fordi elektronerne eksiterer atomerne i prøven, og når de henfalder igen, udsender de stråling, der er unikt for hvert grundstof i det periodiske system. Ved at måle energien af disse røntgenstråler kan man derfor finde ud af, hvilke grundstoffer prøven indeholder. Det er faktisk muligt at 'zoome ind' på ganske få atomer og finde ud af nøjagtigt, hvilket grundstof der er tale om. Derved får man et ret præcist billede af både formen på prøven og sammensætningen af den. I figur 8 ses såkaldte *røntgenspektre* for to forskellige områder på en prøve. Ved at sammenligne toppenes placering i spektrene med kendte materialer kan vi se, at partiklen består af platin, mens baggrundsmaterialet er carbon.



Figur 8. Elektronmikroskopet fortæller også, hvilke grundstoffer en prøve består af. Venstre: TEM-billede af en prøves form. Højre: Spektrum der viser, at prøven består af platinpartikler på en overflade af carbon.

På TEM-billederne ser de undersøgte prøver altid flade ud, fordi elektronstrålen sendes hele vejen igennem prøven i stedet for at blive reflekteret som i et SEM. Det vil sige, at vi kun kan se partiklerne i to dimensioner. For at få en bedre forståelse af hvordan materialet ser ud i tre dimensioner (3D), kan man ved hjælp af flere billeder og computerberegninger lave modeller, der viser materialet i 3D. De metoder, som forskerne har udviklet, er

inspireret af dem, som lægerne bruger til at lave tredimensionelle billeder ud fra serier af røntgenbilleder. Ved at tage en hel stribe TEM-billeder af en prøve, hvor hvert billede er taget fra en ny vinkel, kan man med et computerprogram regne sig frem til, hvordan prøven ser ud i 3D. *Figur 9* viser sådan et computergenereret 3D-billede af en platinnanopartikel. Billedet viser, at der er tale om to platinpartikler, som sidder sammen. Metoden til at lave 3D-billeder kaldes tomografi. Forskerne bruger blandt andet tomografi, når de skal undersøge partiklernes overflade og finde ud af, hvilke overflader der gør partiklerne til de bedste katalysatorer.



Figur 9. A: TEM-billede, der viser et plant billede af tre platinpartikler. B: Den store partikel i midten i A kan have tre forskellige rummelige former, der alle ser ens ud på det plane billede. Man kan ikke fra A umiddelbart afgøre, hvilken rummelig struktur der er den rigtige. C, D, og E: 3D-billeder af partiklerne fra A set fra forskellige vinkler. Billederne er lavet ved at lade en computer kombinere mange 2D TEM-billeder. Metoden kaldes tomografi.

Katalysatorpartikler ændrer form alt efter, hvilken type gas der omgiver dem. Derfor er det en fordel at studere dem i elektronmikroskopet omgivet af den gas, de skal virke i – for eksempel udstødningsgassen fra en bilmotor. Men som vi har beskrevet tidligere, bliver elektroner bremset af sammenstød med luftens molekyler. Derfor kræver det snedige løsninger for at forhindre sammenstødene mellem gasmolekyler og elektroner. De senere år er der blevet udviklet elektronmikroskoper med særlige pumpemekanismer, så mikroskoperne stadig har *atomar opløsning*, selv når der er en gas omkring prøven i mikroskopet. Man kan altså studere katalysatorerne, mens de virker.

Elektronmikroskoperne fungerer altså groft sagt på samme måde som lysmikroskopet, idet en elektronstråle skydes ned på en prøve. I SEM måles de reflekterede sekundære elektroner, der bliver slået løs fra overfladens atomer, mens det i TEM er elektronerne fra elektronstrålen, som, efter de har passeret igennem prøven, bliver opsamlet af en detektor. I begge tilfælde dannes der et billede af prøven. I SEM er det typisk overfladens struktur man får informationer om, mens et TEM også giver informationer om prøvens indre.

Boks 2. Fra mikroskopi til nanoskopi

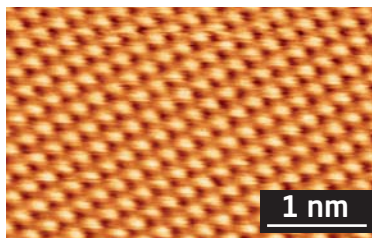


DTU's Center for Elektronnanoskopi (CEN) blev indviet i december 2007. Centret har syv nye elektronmikroskoper (fire SEM og tre TEM), blandt andet et af de kraftigste TEM'er i verden. De ekstremt følsomme mikroskoper står i hvert deres rum, isoleret fra naborummene og omgivelserne udenfor blandt andet med lydisolerende materiale på alle vægge og store betonblokke i jorden under hvert rum. Desuden er der under hele bygningen udgravet et hul lige så dybt, som bygningen er høj, der er fyldt op med isolerende materiale.

Billeder af enkelte atomer

Som beskrevet i de foregående afsnit ligner elektronmikroskoper til en vis grad lysmikroskopet, blot skyder man på sin prøve med elektroner i stedet for fotoner. I 1981 blev en helt ny type mikroskop opfundet, som fungerede fundamentalt anderledes end både lys- og elektronmikroskoperne. *Skanning Tunnel Mikroskopet* (STM) laver billede af atomer ved hjælp af den såkaldte tunneleringsstrøm. Den vender vi tilbage til senere.

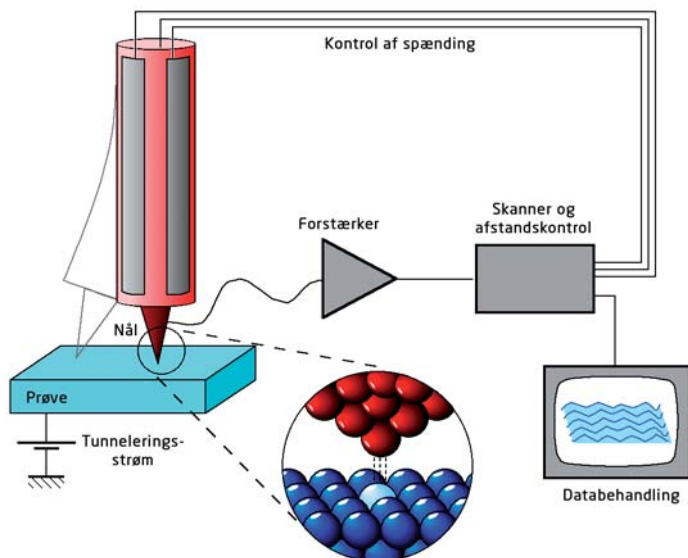
STM'et var startskuddet til udviklingen af en hel familie af Skanning Probe Mikroskoper (SPM), der har det til fælles, at de fungerer ved hjælp af en meget tynd probe – en nål – som føler sig frem til, hvordan overfladen ser ud, lidt som når en blind bruger sin finger til at læse blindskrift. Med et SPM kan man under ideelle betingelser 'se' enkelte atomer, og man kan desuden undersøge prøver i meget forskellige miljøer, eksempelvis luft, væske og vakuum. SPM bruges blandt andet til at undersøge katalytiske nanopartikler, da det kun er overfladen af partiklen, der virker som katalysator. Det er også primært overfladen, der er interessant, når man vil forstå, hvorfor nogle materialer rustner, da det kun er overfladen, der reagerer med luftens molekyler. I dette kapitel skal vi se nærmere på de to almindeligste typer SPM, nemlig STM og AFM.



Figur 10. STM-billede af en grafitoverflade, hvor de enkelte carbonatomer kan ses. Billedet er taget i atmosfærisk luft.

Figur 10 viser et eksempel på en overflade skannet med et STM. Prikkerne på billedet svarer til de enkelte carbonatomer på grafitoverfladen. Når man som her kan se de enkelte atomer, siger man, at man har atomar opløsning. For at opnå atomar opløsning kræver det, at STM-nålen er så spids, at den i princippet ender i ét atom. Det er igen samme princip som med boldene og billedet af E'et i figur 3: det, man 'ser' med (her nålen), må ikke være større end det, man gerne vil se.

Et STM virker via et kvantemekanisk fænomen, der hedder *tunnelering*. En tunneleringsstrøm er en ganske lille strøm, der i dette tilfælde løber mellem STM-nålen og overfladen af prøven, når der er lagt en spændingsforskel mellem de to (figur 11). Ifølge en klassisk opfattelse af strøm burde der ikke løbe nogen strøm mellem nålen og overfladen, da de ikke rører hinanden, men det gør der altså alligevel. Tunneleringsstrøm er et af de fænomener, som man ser på nanoskala, hvor det er *kvantemekanikkens* love, der bestemmer. Tunneleringsstrømmen løber kun, når nålen er nogle få nanometer fra overfladen. Størrelsen af strømmen afhænger eksponentielt af afstanden mellem nålen og overfladen. Det betyder i praksis, at strømmen bliver 10 gange større, hvis afstanden bliver blot 0,1 nm mindre. Nålen kan altså mærke højdevariationer på overfladen på størrelse med enkelte atomer.



Når man skanner med et STM, sørger man for, at tunneleringsstrømmen hele tiden er konstant. For at den kan være det, skal afstanden mellem overfladen og nålen holdes konstant. Nålen tvinges derfor til at bevæge sig op og ned i takt med højdevariationerne på overfladen. Nåleens position måles og omsættes til et billede som dem, der er vist i figur 12. Mørke nuancer svarer til dale i overfladen, lyse nuancer svarer til toppe. I figur 12 kan man se højdeforskelle på kun 0,02 nm.

Figur 11. Skanning Tunnel Mikroskop (STM).

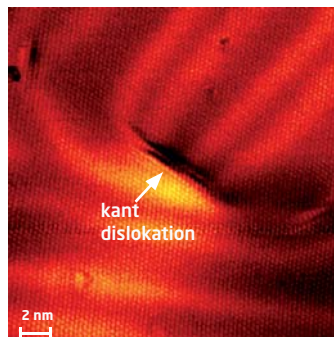
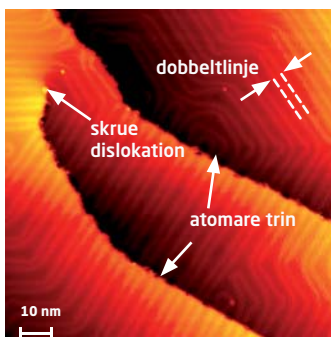
Et typisk STM kan skanne billeder med op til en mikrometer (10^{-6} m) i bredden og en højdevariation på omkring 20 nanometer. Så selv når STM'et skanner det største område, det kan, kan man altså ikke med det blotte øje se, at tippen bevæger sig.

Boks 3. Vi 'spidser blyanten'

Der er mange måder at spidse en metaltråd på, så den kan bruges som STM-nål. Den mest simple måde er blot at klippe en metaltråd over på skrå. I andre tilfælde ætser man tråden over.



En perfekt nål ender i en spids blot få atomer bred. Jo færre atomer i spidsen, jo bedre bliver billedets opløsning. Med en dårlig nål er det som at læse blindskrift med vanter på, mens en perfekt spidset nål giver atomar opløsning. På billedet herover til højre ses et SEM-billede af en STM-nål. Det er kun spidsen af det metal, der stikker allerlængst ud, der har betydning, og denne nål gav atomar opløsning af en grafitoverflade.



Figur 12. STM-billede af en guldoverflade med typiske strukturer, som man finder på krystaloverflader.

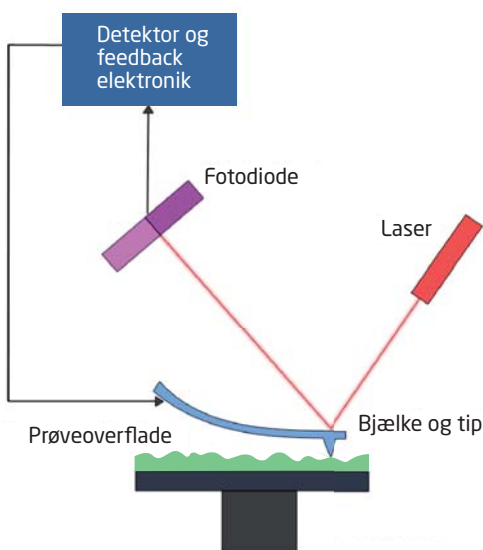
Prøven, der er afbilledet i figur 12, er en meget flad guldkrystal. På billedet til venstre kan man se de atomare trin, det vil sige trinene mellem de enkelte lag af guldatomer, som er cirka 0,23 nm. På billedet til højre kan man se de enkelte guldatomer, der som små prikker sidder i en afstand på ca. 0,29 nm. Ud over atomerne ses også en dobbeltlinjestruktur, som opstår, fordi der på overfladen er en lille variation på kun 0,02 nm af guldatomernes højde

i forhold til hinanden. Dobbelklinjestrukturen opstår, fordi atomerne bliver presset sammen i overfladelaget, og laget buler ud ligesom et gulvtæppe, der er for stort.

I nogle tilfælde kan man altså 'se' formen af enkelte atomer med et STM. I virkeligheden er det ikke selve atomet, man ser, men nærmere fordelingen af elektroner på overfladen. Det er elektronerne, der afgør overfladens ledningsevne og dermed tunneleringsstrømmens størrelse. Da der er mange elektroner lige der, hvor atomerne sidder, er tunneleringsstrømmen også særligt stor her, og vi siger, at vi 'ser' atomerne. Det kræver altså en del viden om atomernes sammensætning og opførsel, når man skal fortolke et STM-billede.

Den atomare pladespiller

Med et STM kan man kun se på elektrisk ledende materialer. Hvis man vil undersøge strukturen af en overflade på et materiale, som ikke leder strøm, for eksempel et biologisk materiale, bruger man i stedet en anden type probemikroskop – et kraftmikroskop – også kaldet Atomic Force Mikroskop. I figur 13 kan du se en skematisk tegning af et AFM, og i kapitel 11 kan du læse mere om brugen af AFM til at undersøge bakterieoverflader.



Figur 13. Atomic Force Mikroskop (AFM).

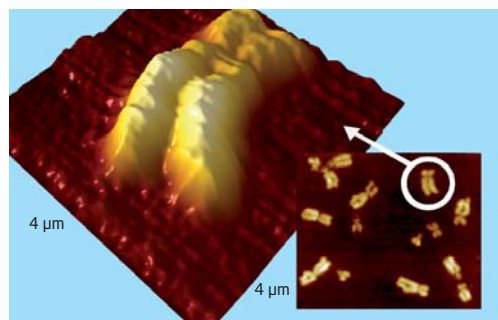
Princippet bag AFM-teknikken minder meget om princippet i en gammeldags pladespiller, hvor en spids nål (pickup) føler hen over gramfonpladens riller og omsætter vibrationerne til musik. Ligesom pickuppen anvender AFM en meget spids nål – kaldet en tip – til at føle overfladens ujævnheder med. Typisk skanner man i linjer fra side til side ned over prøven. AFM-tippen er placeret for enden af en lille bjælke, der kun er nogle få hundrede mikrometer lang. Bjælken bøjer sig, så tippen følger enten toppe,

der stikker op fra overfladen, eller fordybninger ned i overfladen. På denne måde 'føler' tippen overfladens struktur igen lidt på samme måde, som en blind person læser blindskrift. Ved hjælp af et detektionssystem – som regel baseret på refleksion af laserlys fra oversiden af bjælken – kan man måle bevægelsen af bjælken og dermed tippen med god præcision og omsætte bevægelsen til en højdeprofil (figur 14). På samme måde som med STM kan man opbygge et billede af overfladen linje for linje og med nanometeropløsning. AFM bruges ofte i almindelig luft, men kan også anvendes i væsker, hvis man for eksempel vil se på levende celler. AFM's fordel er, at det enkelt og effektivt kan lave billeder af overfladestrukturer helt ned til 5-50 nm små.

Figur 14. AFM-billede af et menneskekromosom.

Mikroskoper med mange muligheder

Fælles for probemikroskoperne er altså, at en lille probe – nål eller tip – vekselvirker med en overflade. Vekselvirkningen kan være tunneleringsstrøm mellem STM-nålen og det underliggende materiale, eller det kan være de kræfter, der er imellem AFM-tippen og prøveoverfladens atomer. Der findes mange andre typer probemikroskoper end AFM og STM. Hvis man vil undersøge magnetiske materialer, kan man lave en AFM-nål af et magnetisk materiale, som bliver påvirket af kraften fra magnetiske områder på overfladen af eksempelvis computerens harddisk. På den måde kan man se de enkelte bits der tilsammen repræsenterer informationen gemt på harddisken. Sådan et mikroskop kaldes for et Magnetic Force Microscope (MFM). I *boks 4* nedenfor har vi opsummeret de forskellige egenskaber og anvendelser af mikroskoperne beskrevet i dette kapitel.



Mikroskopi i fremtiden

Takket være elektronmikroskoper, STM og AFM kan vi i dag se atomer, grave huller i materialer og undersøge strukturer under overfladen og lave 3D-modeller af nanopartikler. Vi kan undersøge både elektrisk ledende, magnetiske og biologiske materialer. Så hvor ligger udfordringerne i fremtiden?

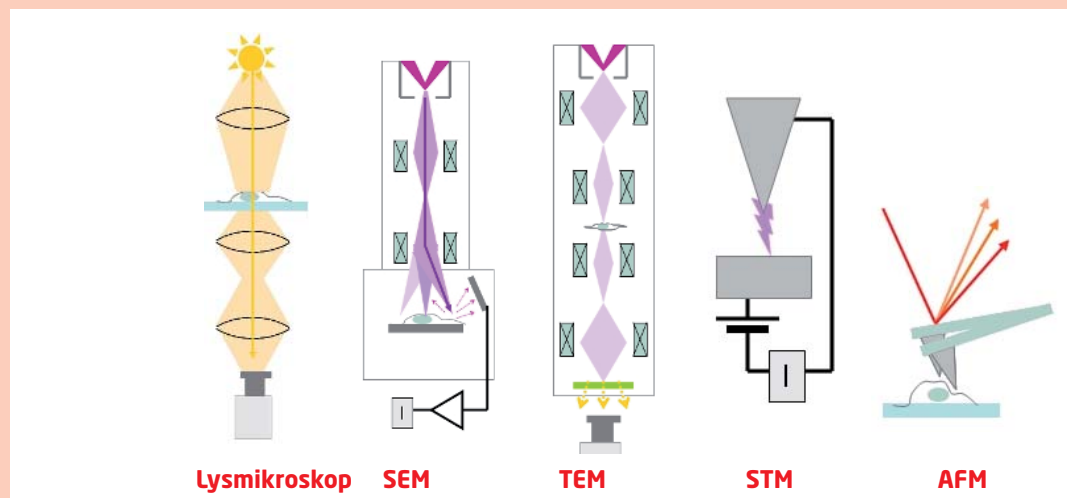
Både elektronmikroskoper, STM og AFM er i de senere år blevet både billigere og lettere at arbejde med, og de forbedres hele tiden. Men i dag drejer udviklingen sig primært om at kunne undersøge flere forskellige typer materialer under realistiske betingelser. For eksempel er det vigtigt at undersøge en katalysators aktive dele – de metalliske nanopartikler – mens de fungerer som katalysatorer. Den gas og den temperatur, der er nødvendig for, at reaktionen forløber, kan ændre partiklernes form og dermed egenskaber. Et andet eksempel er studiet af bakterier. Man får mest ud af at studere dem i live og i deres naturlige miljø. Derfor arbejder forskerne ihærdigt på at udvikle mikroskoper, der fungerer ved højere temperaturer og uden for vakuum.

Derudover arbejder man i dag også med at kombinere flere typer mikroskoper, så man kan lave flere forskellige typer billeder på en gang, mens man studerer sit materiale. I *figur 15* ses billeder fra et apparat, der både har SEM og STM til rådighed.

Mikroskoperne arbejder sammen, forstået på den måde at man først finder et særligt interessant område med SEM'et, hvorefter man flytter sit STM hen og undersøger området nærmere. Det er en stor fordel, for eksempel når man ud fra strukturer på mikrometer skala skal afgøre, hvor man vil lave STM henne. I STM er man jo i høj grad begrænset af sit 'tunnelsyn', og at prøve at finde et særligt interessant område alene ved hjælp af sit STM svarer lidt til at være en myre på sightseeing i New York. I *figur 15* ses fire billeder, hvor A og B er SEM-billeder, og C og D er STM-billeder af den samme overflade på en silicium-

Boks 4. Hvilket mikroskop skal forskeren vælge?

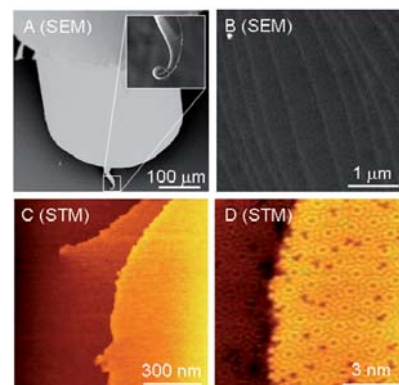
I figuren herunder ses de fem typer mikroskoper gennemgået i dette afsnit med en opsummering af mikroskopernes virkemåde og anvendelser.



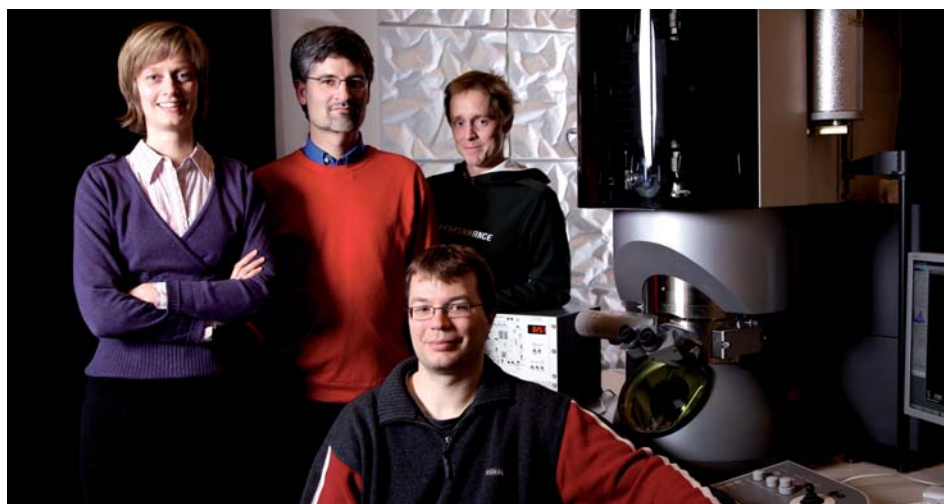
Hvordan virker det?	Tilbagekastede fotoner	Løsslåede (sekundære) elektroner	Elektroner passerer gennem prøven	Elektroner tunnelerer fra overflade til nål	Atomare kræfter mellem overflade og nål
Hvad kan man undersøge?	Alt	Alle typer overflader (2D)	Højst 200 nm tykke prøver (3D)	Elektrisk ledende overflader	Alle typer overflader
Hvilket miljø kan prøven være i?	Alle (luft, vakuum, væske)	Vakuum	Vakuum	Alle (luft, vakuum, væske)	Alle (luft, vakuum, væske)
Kan man undersøge levende prøver (f.eks. bakterier)?	Ja	Nej	Nej	Nej	Ja
Hvor små ting kan man se?	Få hundrede nanometer	Få nanometer	< 1 nm	< 1 nm	Få nanometer

krystal optaget under vakuum. På billede A ses STM'ets skannerør, og nederst anes tippet – som i dette tilfælde var lidt krøllet, men faktisk gav fin atomar opløsning. De enkelte atomare trin på overfladen kan anes på B, og herfra tager STM'et over. STM-billedet i C viser igen atomare trin på overfladen, og når der zoomes endnu længere ind, kan man se de enkelte atomer, som i dette tilfælde danner en helt speciel 'blomsterlignende' struktur på overfladen.

Figur 15. Billeder fra et apparat med kombineret SEM (A, B) og STM (C, D). Med SEM finder man de interessante områder på materialet, her en siliciumkrystal. Efterfølgende zoomer man ind på de udvalgte områder med STM.



De forskellige typer mikroskoper, som er nævnt i dette kapitel, er sammen med en række andre specialiserede mikroskoper helt afgørende for den nanoteknologiske udvikling. Det er både inspirerende og nødvendigt at kunne 'se' atomernes struktur på materialers overflader, og mikroskoperne har givet forskerne et væld af nye informationer, som de kan bruge til at forbedre eksempelvis katalytiske processer, lave mere effektiv medicin mod bakterier samt bygge materialer med helt nye egenskaber og bittesmå nanoelektroniske komponenter. Elektronmikroskoperne har sammen med AFM og STM affyret startskuddet til nanoteknologiens indtog i samfundet. I de øvrige kapitler i denne bog kan du læse meget mere om nanoteknologiens mange anvendelsesmuligheder.



Kapitlets forfattere. Fra venstre: Lektor Jane Hvolbæk Nielsen, Lektor Sebastian Horch og Lektor Kristian Mølhav. Forrest: Seniorforsker Jakob B. Wagner.