

Nanoscience

- et tværvideenskabeligt felt

For ti år siden tog udviklingen af det fagområde, der nu er etableret som nanoscience, for alvor fart. Erfaringerne har vist, at nanoscience mere end noget andet er kendetegnet ved den tværvideenskabelige tilgang til forskningen.

Af Peter Thostrup og Flemming Besenbacher

■ Præfikset "nano" stammer fra det græske ord for dværg og henviser således til noget småt. Som præfiks for en enhed tid eller længde betyder det en tusindedel af en milliontedel af den enhed. En nanometer (nm) er altså 0,000 000 001 meter. Prikken over dette "i" er ca. en million nanometer stort. Naturens byggesten, atomerne og molekylerne, har dimensioner på nanometerskalaen. I en dråbe vand med en diameter på 1 nm kan der være et hav af vandmolekyler, og eksempelvis er dna-helixen ca. 2 nm bred. Nanogrebet kan virke svært definerbart, men vi vil her prøve at indkredse, hvordan vores forståelse efter mange år i nanocirkler har udkrystalliseret sig.

Nanoscience er af natur tværvideenskabelig, for på det atomare og molekylære niveau forsvinder skellene mellem fysik, kemi, biologi og medicin og mange nye opdagelser ligger netop og venter på fagenes grænseflader. For eksempel skal man for at udvikle en nanobiosensor, der kan detektere f.eks. miltbrand, have viden om både fysik (til signaludlæsning), kemi (til funktionalisering af sensoren) og molekylærbiologi (til at designe de genkendende molekyler) og måske endda medicin (til at identificere de klinisk relevante molekyler).

Nanoscience – evolution frem for revolution

Det gav straks genlyd i både forskningsverdenen og den politiske verden, da daværende præsident Clinton i en tale i januar 2000 erklærede, at den amerikanske stat ville investere betydelige midler i nanoteknologi – en satsning der blev udmøntet i *The US National Nanotechnology Initiative* i 2001.

Argumentet var, at det ville tage op imod 25 år før det amerikanske samfund ville kunne nyde godt af de visioner, nanoteknologien stillede i udsigt, og derfor var det nødvendigt med store offentlige investeringer inden for området.

Det har siden ikke skortet på de store visioner og offentlige og private investeringer i mange I-lande, ikke mindst USA, Kina, Rusland, hvorimod vi i Danmark stadig mangler en national nanosatsning som opfølgning på den fremsynsrapport, der blev publiceret i 2004.

Som udgangspunkt defineres nanoscience som forskning i fænomener, der opstår, når objekter når nanostørrelse, og nanoteknologier som anvendelserne deraf. Det kan være kvantiseret ledningsevne i tynde nanotråde, nanokatalysatorer, hvor små nanopartikler rummer de aktive sites og ændrer reaktiviteten – eller endog nanostrukturerede overfladers vekselvirkning med celler. Dette temanummer af *Aktuel Naturvidenskab* omtaler flere eksempler på nybrud inden for dansk nanoscience.

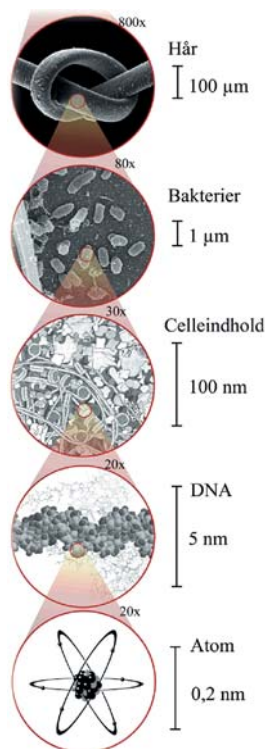
Nanoscience er ikke en revolution inden for forskningsverdenen, som det ofte fremstilles i pressen, men snarere en naturlig udvikling (evolution) af kendte

forskningsfelter, hvor vi blot over tid er blevet i stand til at karakterisere, designe og syntetisere materialer med større og større, i visse tilfælde atomar, præcision. Mest revolutionerende er snarere den tværvideenskabelige tilgang til forskningen inden for mange centrale områder inden for nanoscience, hvor de traditionelle faggrænser mellem fysik, kemi, biologi molekylær biologi er blevet nedbrudt.

Det ultimative mikroskop

Et andet kendetegn ved nanoscience er et tæt samspil mellem karakterisering, syntese og modellering. En lang række eksperimentelle teknikker er over tid blevet udviklet, som gør det muligt at syntetisere og karakterisere den detaljerede geometriske og elektroniske struktur og kemiske sammensætning af 2D- og 3D-nanostrukturer, nanomaterialer og nanoklynger bestående af både metaller, halvledere, polymerer, kompositter og bio-uroganiske og organiske materialer.

Med forbehold for en vis subjektiv indgangsvinkel kunne man med nogen ret påstå, at kilden til hele nanoeventyret begynder i Zürich, Schweiz, hvor de senere Nobelpristagere Gerd Binnig og Heinrich Rohrer omkring 1980 udviklede det ultimative mikroskop



En nanometer (nm) er 0,000 000 001 meter.

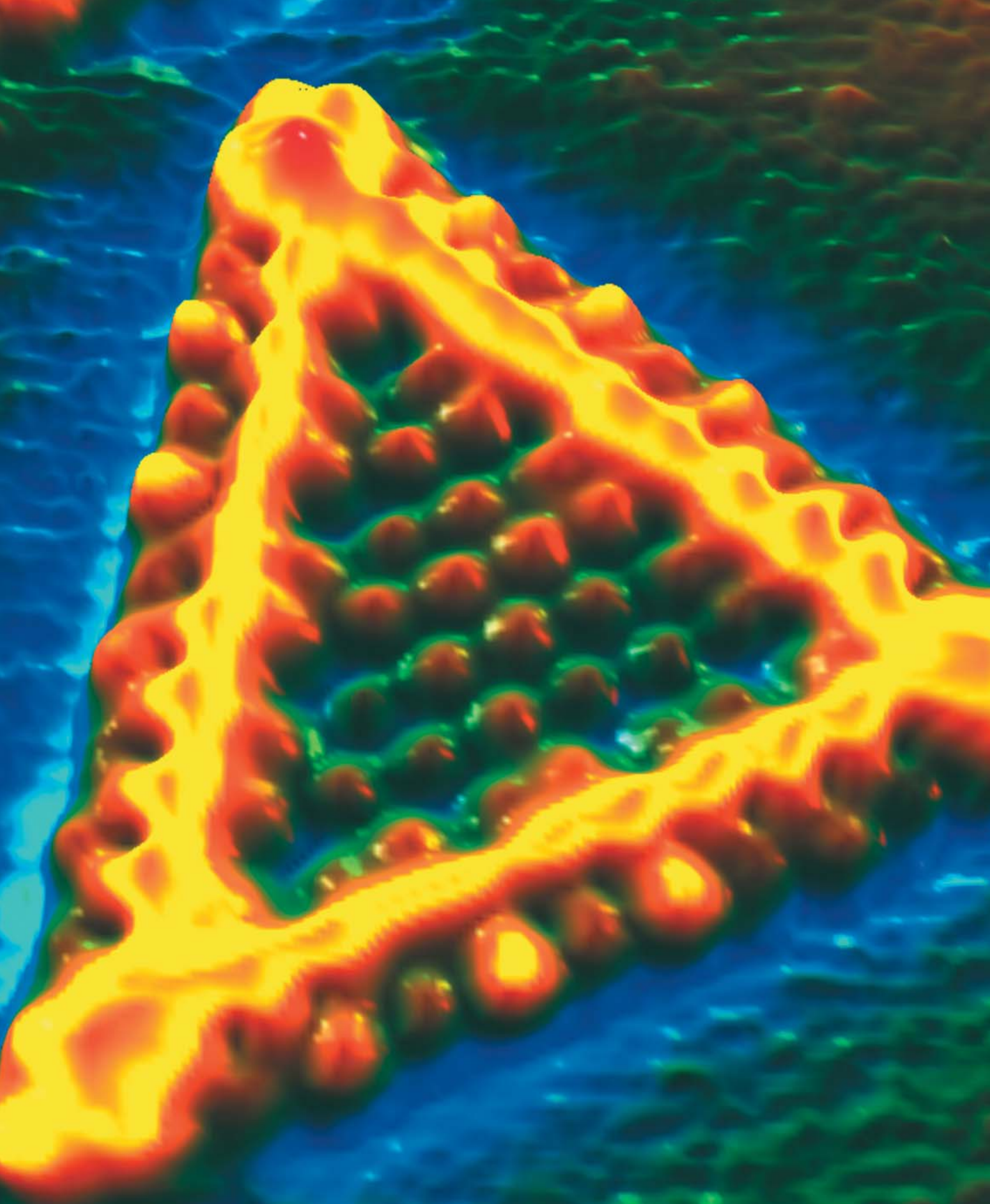


Illustration af MoS₂-trekanten med den gule bræmme ("brim") langs kanten. Haldor Topsoes kalder netop deres nye katalysator for "BRIM™ katalysatoren".

Scanning Tunneling Mikroskopet (STMet, se boks). Dette fantastiske instrument gjorde det for første gang muligt at afbillede de enkelte atomer og molekyler i overflader af materialer. Her er det vigtigt at erkende, at de atomart opløste billeder har givet forskere mulighed for på en helt anden måde at visualisere og "se" atomare og molekylære strukturer, følge dynamiske processer i form af atomart opløste STM-film. Det har revolutioneret forskningsfeltet at kunne "se", om nanostrukturer er ordnede eller uordnede eller at kunne se defekter på f.eks. nanoklynger.

En rationel tilgang til nanomaterialer

Udviklingen af STM og mange andre beslægtede mikroskopiteknikker parallelt med optimeringen af mere traditionelle spredningsteknikker har gjort det muligt at karakterisere materialer med hidtil uset præcision. Viden om materialers struktur på atomart niveau har medført større forståelse og der-

med kontrol over materialesyntese. Endelig er teoretisk modellering i kraft af større computerkraft og bedre teoretiske værktøjer som f.eks. såkaldt tæthedsfunktionalteori, begyndt at blive en aktiv medspiller i et smukt cirkulært samspil mellem analyse, syntese og beregninger. Et tæt samspil mellem eksperimentatorer og teoretikere har vist sig uhyre givtigt i dels en detaljeret fortolkning af eksperimentelle resultater, dels til at designe syntesen af nye nanomaterialer – også her kan man tale om tværvideenskabelig forskning!

Tilgangen til materialeudvikling bevæger sig derfor i dag væk fra en slags "cook and look" alkyemi hen mod rationelt design af nanomaterialer med nye funktionelle egenskaber designet til specifikke anvendelser. Et godt eksempel kan findes inden for katalyse, der spiller en afgørende rolle både i vor energiproduktion og ved løsningen af vigtige miljøproblemer. Ved brug af avancerede nanoteknologiske teknikker, bl.a. STM,

og teoretiske metoder er der på det seneste sket et gennembrud i den detaljerede forståelse af katalysatorers struktur og egenskaber. Vi er dermed ved begyndelsen af en helt ny æra, hvor det måske bliver muligt at designe katalysatorer med forudbestemte egenskaber til anvendelser i den kemiske industri eller til at løse energi- og miljøproblemer (se boks).

Lær af naturen

Synergien i tværvideenskabeligt samarbejde opstår, når f.eks. fysikere, kemikere og molekylærbiologer gensidig drager nytte af inspiration fra de respektive fagkompetencer. En af visionerne inden for nanoscience er at kunne kontrollere opbygningen af makroskopisk stof med atomar præcision for derved at kunne kontrollere groningen af nye nanomaterialer med specifikke ønskede egenskaber.

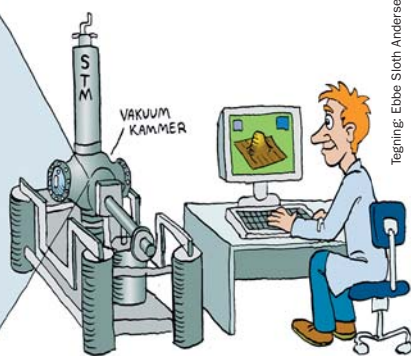
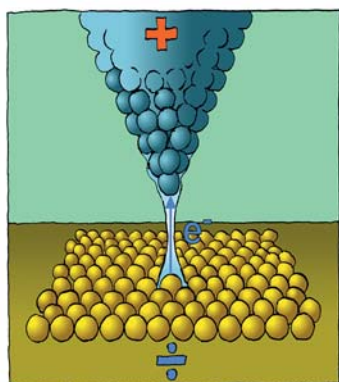
En metode til at gro nye nanostrukturer er den, vi kender fra halvlederindustrien,

som vi refererer til som "top-down" og som vi i dag alle udnytter resultatet af i vores mobiltelefoner, bærbare computere mm. Ved hjælp af litografiske teknikker er man i stand til lave mindre og mindre nanostrukturer, oftest i halvledermaterialet silicium, dvs. opbygge flere og flere transistorer og integrerede kredsløb med større og større kapacitet.

En anden mulig metode til at opbygge stof er "bottom-up" metoden, hvor man indbygger genkendelsesstrukturer i simple byggestene, som efterfølgende kan bringes til at samle sig af sig selv. Vi har længe vidst, at naturen udfører denne selv-samling af byggestene på meget smuk og sofistikeret vis, når den danner det molekylære system, som er det basale grundelement i alt liv.

Et glimrende nyere eksempel på netop denne fremgangsmåde blev publiceret af iNANO-centret i en *Nature*-artikel i 2009, hvor vi for første gang viste, at vi kunne selvsamle en "dna-nanokasse". Holdet bag resultaterne var molekylærbiologer, kemikere og fysikere og netop det tværfaglige forskningshold var en afgørende forudsætning for nanokassens succes, der af Ingeniøren og Politiken blev udnævnt til Årets Gennembrud i 2009, og nanokassen har opnået stor international bevågenhed, hvad en Google-søgning også straks vil vise. Til opbygningen af kassen udnyttedes dna's meget specifikke genkendelsesegenskaber over for sin komplementære streng (Watson-Crick baseparring) og det faktum, at man kan folde dna til en ønsket struktur på samme måde, som man i Asien folder fantastiske strukturer ud fra et stykke papir (heraf betegnelsen "dna-origami"). I det givne tilfælde er et langt cirkulært stykke dna foldet til en 3D-kasseform vha. specialdesignede stykker af "hæfteklamme-dna". Molekylærbiologerne forstod at designe disse hæfteklammer og anvende de rigtige reaktionsparametre for at selvsamlingen kunne lykkes,

Optag film med STM-mikroskopet



Tegning: Ebbe Sloth Andersen

Et af de vigtigste instrumenter inden for nanoscience er det såkaldte *Scanning Tunneling Mikroskop*, der gør det muligt at afbillede de enkelte atomer og molekyler i overfladen af materialer. Ved iNANO har vi udviklet et sådant mikroskop – Aarhus STMet – som er karakteriseret ved meget stor stabilitet. Det gør det muligt rutinemæssigt at optage højopløste STM-billeder samt at følge dynamiske processer ved at forblive på samme sted på overfladen og optage STM-billeder i minutter, timer og sågar dage af gangen. Ved hjælp af sådanne "STM-film" kan vi studere atomers eller molekylers diffusion på overfladen og vi kan afbillede kemiske overfladereaktioner.

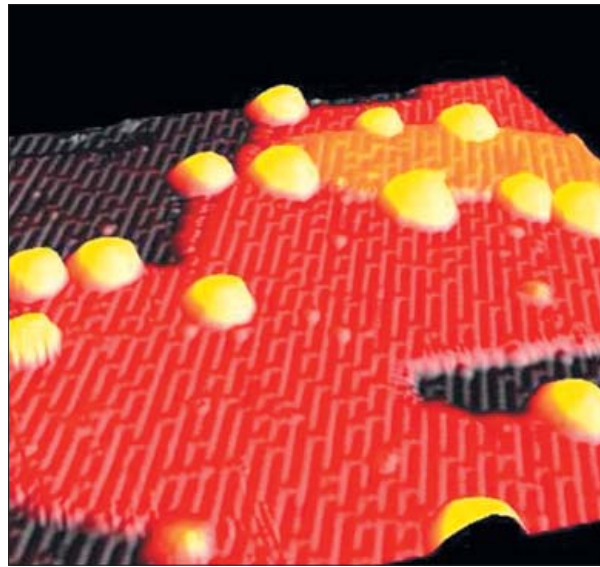
Filmsekvensen viser på hinanden følgende afbildninger af atomerne i en grafitoverflade – de 17 billeder er optaget på kun 0,26 sek over et område på $10 \times 10 \text{ \AA}^2$ (opløsning 64×64 pixels)! På internationalt niveau findes der ikke andre instrumenter med samme karakteristika. Aarhus STMet bygges og markedsføres i dag internationalt af SPECS (www.specs.de).

Nanokatalyse

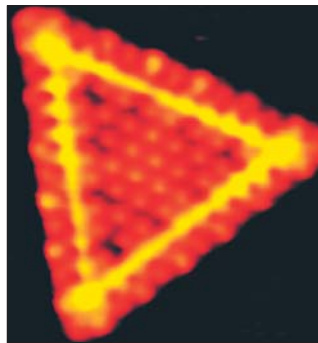
De aktive elementer i en katalysator er typisk små nanoklynger og der findes mange eksempler på, at "småt er anderledes", idet disse nanoklynger har unikke kemiske egenskaber, der er koblet til deres størrelse. Guld er det ædleste af alle metaller og derfor ikke kemisk aktivt, men meget overraskende har det vist sig, at guldnanopartikler med en størrelse mindre end 5 nm virker som en katalysator for en kemisk reaktion (oxidation af carbonmonoxid) helt ned til $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Billedet øverst viser en 3D-repræsentation af et STM-billede af 5nm guldklynger på titandioxid, som er optaget i STM-gruppen ved iNANO. Vi har bl.a. kortlagt, hvordan man kan styre spredningen og dermed størrelsen af guldklynger på en oxidoverflade.

Som et andet eksempel kan nævnes de trekantede nanoklynger af molybdændisulfid, MoS_2 , der udgør den aktive del af den industrielle meget vigtige afsvovningskatalysator. Vi afbildede for første gang den atomare struktur af MoS_2 -trekanterne og påviste bl.a. eksistensen af den gule bræmme ("brim") langs kanten af disse MoS_2 -nanoklynger. Disse bræmmer er en speciel elektronisk tilstand, der eksisterer på kanten af MoS_2 nanoklynger, og som har vist sig at være afgø-



rende for den katalytiske reaktion, hvor svovl fjernes fra råolie på et raffinaderi og derved medvirker til at sikre et langt bedre miljø for os alle. Vores nære industrielle samarbejdspartner, Haldor Topsøe A/S, lancerede blandt andet på baggrund af den øgede eksperimentelle og teoretiske forståelse, der var opnået vedr. MoS_2 , verdens første katalysator, der levede op til de nye skærpede internationale miljøkrav, og de kaldte såmænd deres nye katalysator for "BRIM™ katalysatoren"!



MoS_2 -trekant med den gule bræmme ("brim") langs kanten

kemikerne forstod at modificere dna og fysikerne bidrog med karakteriseringsteknikker som elektron-, scanning probe- og enkeltmolekylær fluorescensmikroskopi.

Kun samspil kan udfolde potentialet

Lad os afslutningsvis pointere, at et meget vigtigt aspekt inden for nanoscience og nanoteknologier er udviklingen af bedre og bedre syntese-, karakteriserings- og modelleringsteknikker samt det helt afgørende tværvidenskabelige aspekt. Kun gennem et tæt samspil mellem de traditionelle naturvidenskabelige discipliner kan vi gøre os forhåbninger om at indfri mange af de spændende forskningsmæssige og strategiske muligheder, der opstår på nanoskalaen. ■

Nanoscience som uddannelse

I Danmark har vi været – og er stadig – førende inden for uddannelser i nanoscience. Således blev der allerede i 2002 oprettet nanoscience-uddannelser på Aarhus Universitet og Københavns Universitet. Det var første gang selv internationalt, at der blev udbudt en tværfaglig nanoscienceuddannelse.

Nanoscienceuddannelsen er typisk opbygget som en treårig bachelordannelse med grundlæggende kurser i både fysik, kemi, biologi og molekylærbiologi. I den efterfølgende kandidatoverbygning skal man vælge en specialisering, fx inden for nanofysik eller nanobiologi. Efter 2002 har Aalborg Universitet oprettet en civilingeniøruddannelse i nanoteknologi, DTU udbyder nu *Fysik og nanoteknologi* og Syddansk Universitet *Nanobioscience*.

Oprettelsen af nanoscienceuddannelsen har været den afgørende katalysator for etableringen af iNANO, Interdisciplinært Nanoscience Center ved Aarhus Universitet, som siden oprettelsen i 2002 er vokset kraftigt og i dag organiserer 60 professorer, 60 postdocer og 175 ph.d.-studerende.

Om forfatterne



Peter Thostrup er forskningsmedarbejder

Tlf.:

E-mail: thostrup@inano.au.dk



Flemming Besenbacher er

professor, iNANO,

Aarhus Universitet

Tlf.: 8942 3690

E-mail: fbe@inano.au.dk

Videre læsning

www.inano.au.dk

Teknologisk Fremsyn:

www.fi.dk/publikationer/

2004/teknologisk-fremsyn-om-dansk-nanovidenkab-og-nanoteknologi

Om dna-origami

Nature 459, 73-76 (2009).

Forskere som nanoarkitekter.

Aktuel Naturvidenskab nr. 3, 2009.

STM-film: <http://phys.au.dk/research/condensed-matter-physics/spmlstm-movies>

Guld som katalysator:

The Chemical Record 3, 75 (2003)

Physical Review Letters 90, 026101 (2003)

MoS_2 -nanoklynger:

Nature Nanotechnology 2, 53 (2007)