

# Nanoteknologi er vejen frem

Nu er atomer blevet synlige på computerskærmene. Man kan se, hvordan de enkelte atomer opfører sig på en overflade, og den viden har skabt en helt ny teknologi, nanoteknologien. Inden for de sidste år er interessen for dette felt eksploderet, og CAMP-gruppen er med i frontforskningen med blandt andet opdagelsen af, hvad brint gør ved en platinoverflade.

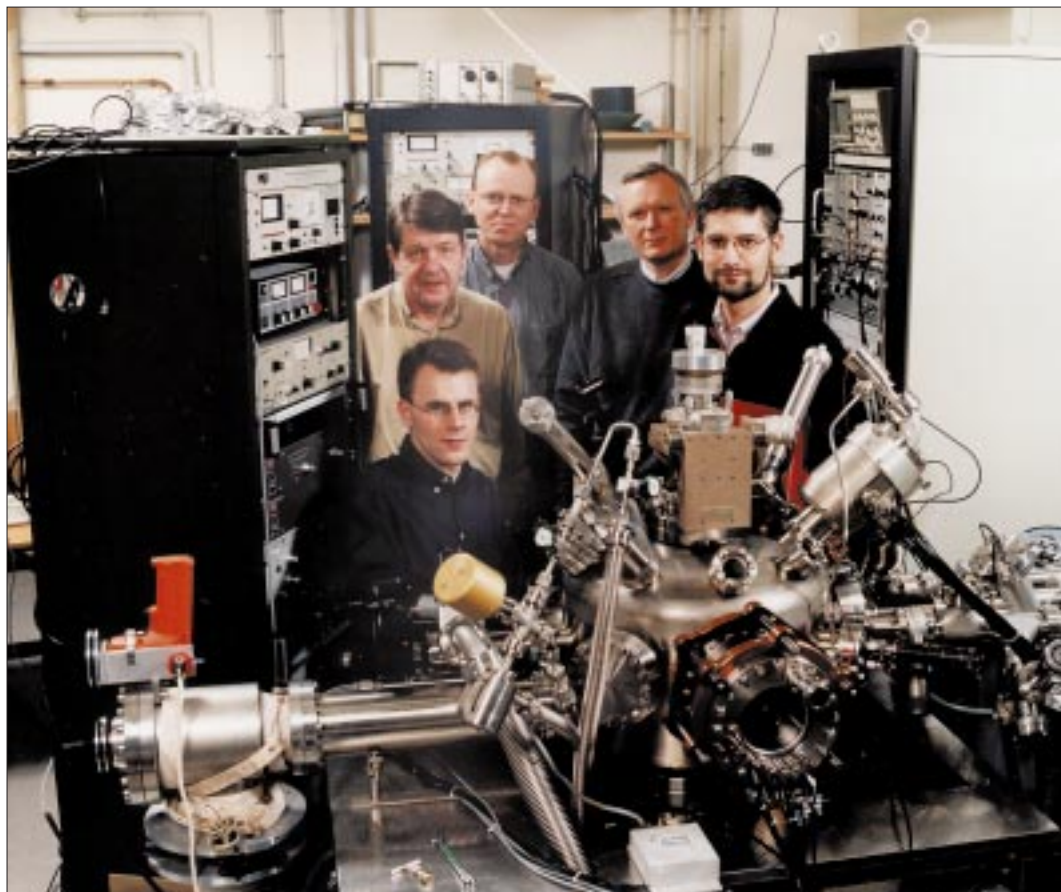


Foto: Jens Kjeldsen

*Billedet viser de af Nature-artiklens forfattere, der arbejder i CAMP-gruppen i Århus. De fem står bagved et vakuumkammer indeholdende et Scanning Tunnelling Mikroskop. Bagerst fra venstre: Erik Lægsgaard (lektor), Flemming Besenbacher (professor), Ivan Stensgaard (professor), Sebastian Horch (post doc) og forrest Stig Helveg (ph.d.-studerende).*

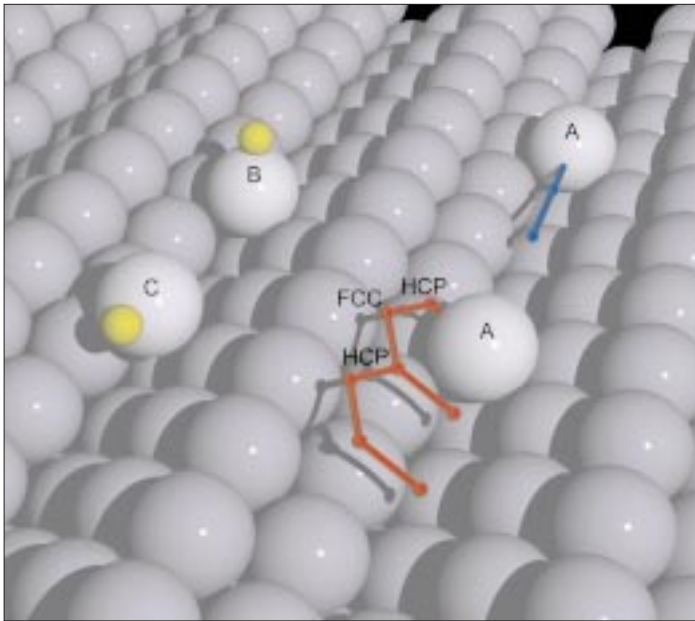
**F**or første gang har man kunnet måle, præcist hvordan brint påvirker bevægelsen af større atomer på faste overflader. Den viden vil man kunne bruge til at få små strukturer af atomer til at være stabile. Sådanne bittesmå strukturer forventes at spille en afgørende rolle inden for nanoteknologien, der er baseret på, at man har fuldstændig kontrol over atomers opførsel. Med fuldstændig kontrol vil der åbne sig en helt ny verden af muligheder for at konstruere materialer, og helt nye måder at

bruge disse materialer på. De enkelte atomer vil kunne anvendes som små maskiner, der kan flytte rundt på andre atomer, og det vil blive muligt at fremstille elektriske komponenter bestående af en lille gruppe af atomer; og det er blot begyndelsen.

Men for at nå dette forjættede, teknologiske land, så skal man være sikker på, at atomerne ikke flytter sig eller reagerer ukontrolleret. Det er her, at forskningen i, hvordan og hvorfor atomer bevæger sig på en overflade, kommer ind i billedet.

**Atomer vil klumpe sig sammen**  
Nanoteknologi bliver ikke bare vigtigt engang i fremtiden – allerede nu bruges den til at fremstille bedre katalysatorer med. En typisk katalysator til styring af kemiske reaktioner består af en overflade med små klynger af metalatomer ovenpå. Jo mindre klyngerne er, des større er deres totale overflade, og jo større er sandsynligheden for, at de reagerer med det, der føres hen over katalysatoren, f.eks. udstødningsgas. Problemet er, at atomer på en overflade helst vil sidde sammen i

Af Anne-Louise Stranne



Figur 1.

Illustration af platinoverfladen, der består af fordybninger og forhøjninger. De ekstra platinatomer (A) er tvunget til at bevæge sig langs grøfterne. De blå og røde linier viser to mulige bevægelsesruter. Pt-H komplekset er vist til venstre, først i ligevægtstilstanden (B), hvor brintatomet sidder lige oven på platinatomet, og derefter i overgangstilstanden, mens komplekset bevæger sig (C).

Billederne gengivet med tilladelse fra Nature 398, 134 copyright (1999). Macmillan Magazines Ltd.

større klynger, og et af de vanskeligste problemer er simpelt hen at finde ud af, hvordan man undgår, at de små klynger klumper sig sammen. Det, som CAMP-gruppen har opdaget, er den mekanisme, hvormed brint påvirker platinatomers evne til at flytte sig på en overflade, og dermed hvordan en platinkatalysator kan blive ødelagt, når der er brint i nærheden. Resultatet af forskningen blev i marts offentliggjort i tidskriftet Nature.

#### Eksperimentet

Man har vidst i et stykke tid, at platinatomer bevæger sig hurti-

gere, når der er brint i nærheden. At finde den mekanisme, der øger atomernes hastighed, krævede et meget tæt samarbejde mellem teoretikere på Danmarks Tekniske Universitet, (DTU), og eksperimentalfysikere på Aarhus Universitet. Eksperimentet i Århus startede med, at der blev fremstillet en ren platinoverflade. I fri luft vil enhver overflade blive dækket af luftens molekyler i løbet af en brøkdel af et sekund, så alle eksperimenter med rene overflader foregår i et vakuumkammer, hvor trykket er  $10^{-13}$  atm. Før eksperimentet bliver platinoverfladen renset for

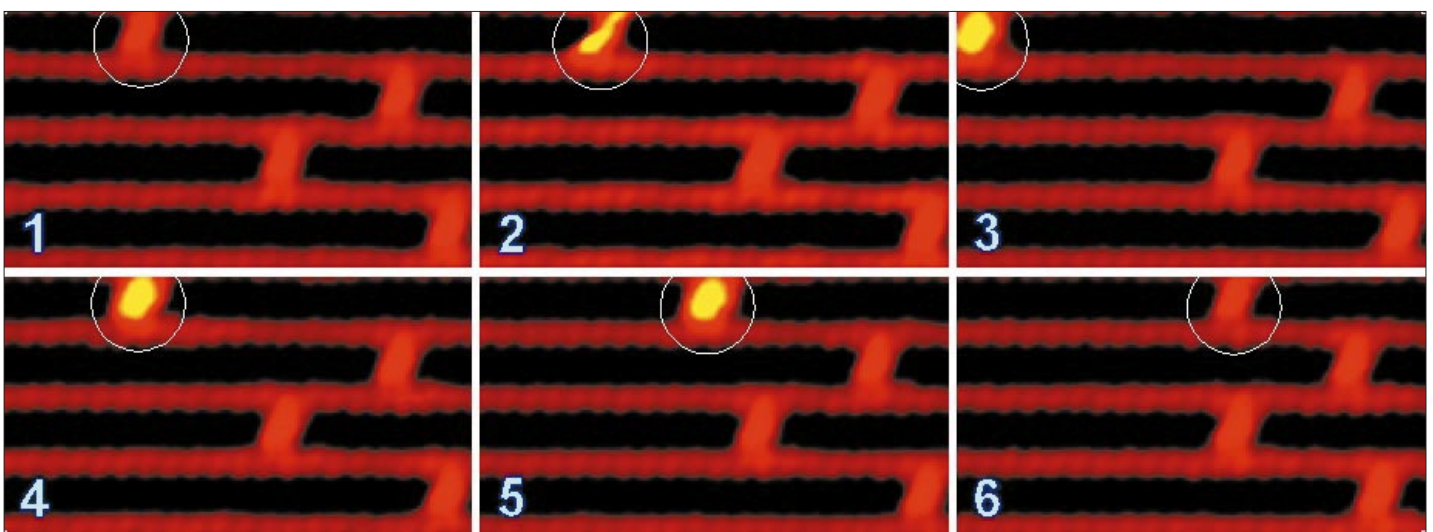
snavs i vakuumkammeret, og derinde kan overfladen så holde sig ren nok til forsøg i et par timer.

Når man scanner en sådan ren metaloverflade med et såkaldt Scanning Tunnelling Mikroskop (STM), kan man se, at overfladens atomer ligger ordnet pænt i en krystallinsk struktur. Man kan få nogle platinatomer til at lægge sig ovenpå denne struktur ved at opvarme en platintråd i kammeret, så noget af tråden fordampes. De fordampede atomer sætter sig på den første overflade, de støder ind i, og nogle af de fordampede atomer

satte sig på den platinoverflade, der var i vakuumkammeret. Figur 1 viser, hvordan de nye overfladeatomer sidder, og hvordan de kan flytte sig. De pådampede overfladeatomer har ikke så mange bindinger, og derfor flytter de sig meget lettere rundt på overfladen, end de atomer, der udgør selve overfladens struktur. Det var de nye overfladeatomers bevægelse, der blev studeret.

Ved at bruge STM-teknikken blev der optaget film af atomernes bevægelse på platinoverfladen, og filmene viste, hvor hurtigt de tilføjede platinatomer bevægede sig. Et udsnit af en typisk film er vist i figur 2. Når der blev ført lidt brint ind i kammeret, bevægede atomerne sig hurtigere – og jo mere brint, des mere satte de farten op. Samtidig kunne man se, at de atomer, der bevægede sig hurtigst, så lysere ud end før. STM-film viste flere lyse atomer, jo mere brint, der var i kammeret, og de lyse atomer bevægede sig op til 500 gange hurtigere end de andre. Brintatomerne havde helt klart en voldsom effekt på overfladen.

Det lyse udseende og de andre farver på filmen betyder ikke, at atomer har farve – det er bare computerens måde at vise atomernes højde på, og de lyse atomer er altså udtryk for, at der blev målt en større højde



Figur 2. De seks billeder viser platinoverfladen set fra oven. De rækker af atomer, der kan ses, er de forhøjninger, der er i overfladen, og mellem disse rækker er de fordybninger, som de ekstra atomer kan bevæge sig i. Fire individuelle platinatomer er synlige mellem rækkerne som store røde bolde.

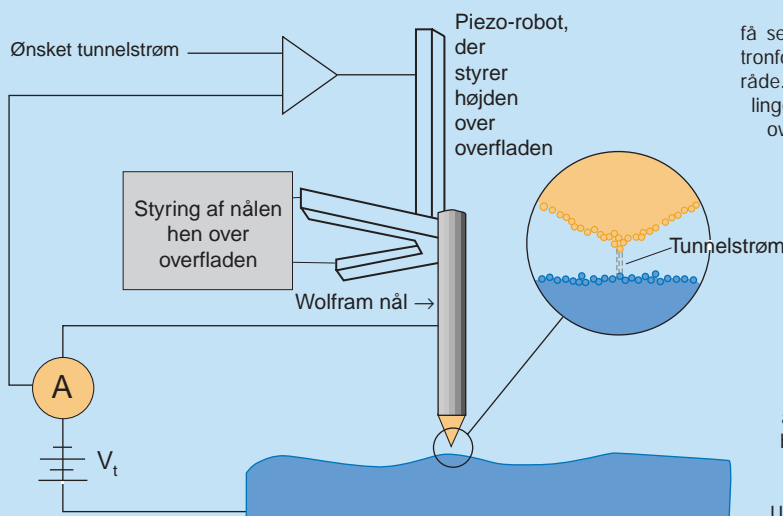
Fra billede 1 til 6 bevæger de 3 atomer i den nedre del sig ikke. Atomet i den øverste grøft (mærket med en cirkel) bliver meget lyst i billede 2 og bevæger sig hurtigt, hvilket ses på de følgende billeder. Denne effekt skyldes bindingen af et brintatom ovenpå platinatomet. Brintatomet kan ikke selv afbildes med denne teknik, men er årsagen til den lyse fremtoning, som det øverste atom får.

# Man kan "se" atomer med STM

I 1981 blev Scanning Tunneling Mikroskopi, STM - teknikken udviklet, og den gav anledning til en revolution inden for overfladefysikken. Med STM-teknikken blev det nemlig meget lettere at se de enkelte atomer på en overflade.

Det, man måler med STM, er elektrontætheden på overfladen: En meget tynd og spids metalnål bliver ført meget tæt på en elektrisk ledende overflade; så tæt, at nålespidsens elektronsky overlapper elektronskyen for det atom, der ligger lige under nålespidsen! Når det sker, er der en sandsynlighed for, at en elektron fra overfladen kan overføres til nålen og omvendt, selv om nålespidsen befinder sig 0,5 nm over overfladen og slet ikke rører den. Ved at give nålen en elektrisk spænding i forhold til overfladen, kan udvekslingen af elektroner mellem nålen og overfladen blive til en ganske lille strøm.

Ifølge den klassiske fysik kan der ikke løbe en strøm i det vakuum, der findes mellem nålen og overfladen, men i kvantemekanikken er denne "tunnelering" af elektroner helt i or-



den, og strømmen kaldes tunnelstrømmen. Tunnelstrømmens størrelse afhænger eksponentielt af afstanden fra nålespids til overflade, så strømmen er følsom overfor selv de mindste variationer i overfladen. Ved at indstille mikroskopet til hele tiden at skulle have den samme tunnel-

strøm, må nålen bevæge sig op og ned alt efter, hvordan overfladen ser ud lige nedenunder. Det er disse bevægelser, som udgør målingerne i eksperimentet.

Ved at bevæge den lille nål frem og tilbage og op og ned ad overfladen – dvs. scanne overfladen – kan man på

få sekunder måle overfladens elektronfordeling i et ned til  $\text{nm}^2$  stort område. Ved at computerbehandle målingerne kan man få et 3-D billede af overfladen, og det er på de billeder, at man kan se atomerne. Når man tager flere sådanne billeder af det samme sted lige efter hinanden, kan man se, hvordan de enkelte atomer flytter på sig fra billede til billede, som om det var en tegnefilm. Det er dog kun, hvis atomerne bevæger sig meget lidt fra billede til billede, at man direkte kan følge de enkelte atomers bevægelse og få en brugbar film.

CAMP-gruppen på Aarhus Universitet byggede deres første STM-apparatur for godt 10 år siden, og den løbende udvikling af de selvbyggede mikroskoper har bragt dem i absolut verdensklasse. Mikroskoperne markerer sig specielt med en høj stabilitet som er påkrævet for at kunne optage STM film.

Selve STM-teknikken var så banebrydende, at dens udviklere, fysikerne Binnig og Rohrer, i 1986 fik Nobelprisen for deres opdagelse.

for de hurtige atomer end for de langsomme. Alt dette kunne eksperimentalfysikerne i Århus beskrive, men for at få en detaljeret forklaring af det observerede måtte teoretikerne på DTU se på resultaterne.

## Teoretisk forklaring

Teorien bag eksperimentet kom CAMP-gruppen på DTU til at stå for. Deres beregninger viste, at et brintatom, som sidder oven på et af de mobile platinatomer, vil føre til at hele komplekset ser lysere ud på en STM-film end platinatomet alene – nøjagtig som i STM-filmen fra Århus.

Derudover blev det beregnet, at et sådan brint-platin-kompleks kan bevæge sig meget hurtigere end et platinatom alene, og at tallene fra eksperimentet nogenlunde passede med teorien. Dermed var alle observationer forklarede, og CAMP-gruppen havde, som de første i verden, både set og forklaret den mekanisme, der får

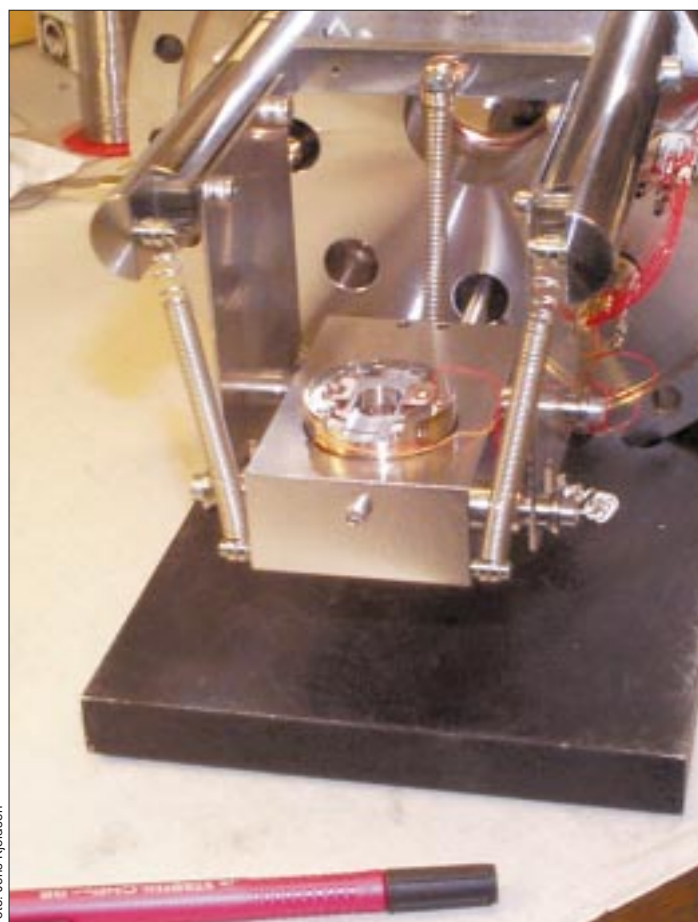


Foto: Jens Kjeldsen

platinatomer til at bevæge sig hurtigere, når der er brint til stede.

## Stabilitet og kontrol

Eksperimentet med platin bliver rigtig interessant set i lyset af, at en stabil overfladestruktur er helt afgørende for et materiales anvendelsesmuligheder. Eksemplet med katalysatorer er blevet nævnt, men enhver form for nanoteknologi kræver kontrol med overfladens bevægelser. Kontrollen kan dog også bestå i at sikre, at overfladens atomer bevæger sig nok – når atomerne bevæger sig hurtigt på overfladen af et materiale,

*Billedet viser et STM, hvis størrelse fremgår ved sammenligning med tuschen. De små dimensioner samt fjederophængt er nødvendige for at undgå støj i STM billederne fra vibrationer i laboratoriet.*

# Forskningscenter med succes

I 1993 blev kimen lagt til forskningscenteret CAMP (Center for Atomic-scale Materials Physics), der er ét af de 27 forskningscentre, som finansieres af Danmarks Grundforskningsfond. CAMP fik i 1997 betegnelsen "internationalt førende" i en rapport udarbejdet af uafhængige, internationale forskere.

Danmarks Grundforskningsfond har som formålsparagraf at støtte enestående forskning på internationalt niveau. Grundforskningsfonden har valgt at give så store og koncentrerede bevillinger, at nogle af de bedste forskere og forskergrupper i Danmark kan hævde sig blandt de førende i verden. Grundforskningsfonden har valgt at bruge sine midler således, at de bidrager til stabilitet, og til at forskerne kan gå i gang med store og langvarige opgaver. Fonden har etableret 27 forskningscentre og tildelt disse centre femårige bevillinger, hvilket er meget lang tid for forskningsbevillinger. "Der er ingen tvivl om, at Grundforskningsfondens bevillinger har været

af uvurderlig betydning for aktiviteterne i centrene, og at de er et vigtigt supplement til de normale ofte langt mindre og korterevarende bevillinger fra Forskningsrådene" udtaler professor Flemming Besenbacher.

I 1997 blev der foretaget en international evaluering af centrene. Langt de fleste centre fik gode eller fremragende bedømmelser af deres videnskabelige arbejde. Selve den model som Grundforskningsfonden har valgt med større centre med længerevarende bevillinger blev samtidig meget rost. I flere lande har man med succes haft disse uafhængige centre længe.

## I verdensklasse

CAMP-gruppen består af to afdelinger; en overvejende eksperimentielt orienteret 17 mand stor gruppe ved Aarhus Universitet og en blandet teoretisk og eksperimentel gruppe af 30 personer ved Danmarks Tekniske Universitet, hvor også direktøren for CAMP, professor Jens K. Nørskov, hører hjemme. Efter evalueringen fik CAMP i sommeren 1998 fornyet sin bevilling for en ny femårig periode.

Evalueringen roste specielt det usædvanligt tætte samarbejde mellem teoretikere og eksperimentalfysikere.

CAMP er specielt derved, at det nok er et grundforskningscenter, men alligevel har tætte relationer til industrien, deriblandt katalysevirksomheden Haldor Topsøe A/S. Samarbejdet har bl.a. udmøntet sig i udvikling af en ny katalysator af guld og nikkel, og Flemming Besenbacher pointerer, at der er mange eksempler på, at afstanden fra grundforskning til industrielle anvendelser ofte er meget kort. Derfor synes han, at det er forkert, når nogle forsøger at skelne skarpt mellem grundforskning og anvendt forskning, da han mener, at der er kun kan skelnes mellem god og dårlig forskning!

Grundforskningcenteret CAMP har eksperternes ord for, at det, de laver, ikke bare er godt, men i verdensklasse.

bliver den nemlig glattere. Det sker, fordi små ujævnheder og ridser bliver udjævnet, når atomerne bevæger sig rundt på overfladen. En glat overflade slides mindre, når der gnides på den, og det er vigtigt for bl.a. værktøj til industrien.

Den udglattende effekt har også stor betydning, hvis en overflade skal belægges med et andet materiale. Belægninger laves ved at fordampe et belægningsmateriale i et vakuumkammer, som indeholder den overflade, der skal belægges. Når de fordampede atomer støder ind i overfladen, sætter de sig fast og danner belægningen.

Hvis atomerne i belægningen bevæger sig meget, vil den nye overflade blive glat, efterhånden som atomerne får flyttet sig på plads; hvis atomerne derimod bliver siddende, hvor de rammer materialet, så kommer den nye overflade til at være mere ujævn. Så jo mere man kender til atomernes bevægelser, des planere materialer, belægninger og overflader kan man lave.

## Det tætte samarbejde

En af styrkerne i Grundforskningcenteret CAMP er det tætte samarbejde mellem eksperimentalfysikerne på Aarhus Universitet og teoretikerne på DTU. Professor Flemming Besenbacher fra CAMP i Århus lægger stor vægt på, at kommunikationen hele tiden går begge veje: "Vi har lavet eksperimenter, som de har regnet på hos DTU, men teoretikerne har også lavet beregninger på eksperimenter, som vi så er blevet bedt om at lave," siger han. "På dén måde er de fleste af vores resultater blevet til, bl.a. en meget omtalt guld-nikkel katalysator, som nu bliver fremstillet hos Haldor Topsøe." Hvilket uddannelsessted, der tager sig af hvad, er ifølge Besenbacher en tilfældighed: "På nogle måder ville det måske være mere naturligt, hvis teoretikerne var på Aarhus Universitet og eksperimenterne blev udført på DTU, men nu er det altså blevet den anden vej rundt".

## Fremtidsvisionerne

Foruden katalyseområdet er der flere felter, der kan have gavn af

resultaterne af grundforskningen på CAMP. Nanoteknologien står øverst på listen og er udråbt til det næste århundredes teknologi, og håbet er, at man i fremtiden vil kunne udvikle nanomaterialer, som, fordi de er opbygget af et lille antal atomer, vil være lettere, hurtigere og mindre energiforbrugende end de allerede eksisterende. Brint-baseret teknologi er også et felt i vækst. Brændselsceller, der bruger brint, formodes at blive fremtidens primære energikilde, og her vil overfladernes reaktioner med brint være af kolossal betydning. Uden et fuldstændigt kendskab til reaktionerne vil det i praksis være umuligt at få brintteknologien til at virke andre steder end i laboratorier. Det er de anvendelsesmuligheder, som man forestiller sig i dag, men der er ingen tvivl om, at når først den viden, der behøves til nanoteknologi, findes, så vil man finde helt nye måder at anvende den på. Springet fra grundforskning til produktion er ikke langt inden for denne gren af fysikken. ☺

## Om forfatteren:

Anne-Louise Stranne er 4-års-studerende ved Institut for Fysik og Astronomi, Aarhus Universitet.

E-post: stranne@ifa.au.dk