



# Nanomekanik - en verden i bevægelse

Peter Bøggild, Anja Boisen, Institut for Mikro- og Nanoteknologi

Vi lever i en verden i bevægelse, og mekanikkens love beskriver, hvordan ting bevæger sig - også på nanoskala. Vi kan lave maskiner, der har bevægelige dele i mikro- og nanostørrelse. Både airbaggen i bilen og mobiltelefonen har mekaniske mikrosensorer, der opfanger selv de mindste fartændringer, mens nanobjælker måler massen af virus, bakterier, og giftstoffer i mad og miljø. Mekaniske robotarme med nanopincetter kan endda flytte rundt på nanomaterialer, så vi kan bruge dem som byggesten. I dette kapitel fortæller vi om mekanik, der måler og manipulerer nanostrukturer.

Det er ikke nogen ny ide at gøre maskiner mindre. Allerede i middelalderen forsøgte opfinderne at bygge apparater og instrumenter, der var så små, at de kunne transporteres. Små maskiner vejer mindre, bruger mindre energi, fylder mindre og koster mindre, fordi der skal bruges færre materialer til at fremstille dem. Somme tider virker de også *bedre* end deres storebrødre, for eksempel ved at være mere følsomme og nøjagtige. Dette er motivationen for at lave mikro- og nanomekanik. Et af de tidligste og bedst kendte eksempler på mikromekanik er uret, som var afgørende for at kunne navigere til søs. Tyskeren Peter Henlein opfandt i 1508 det første transportable ur: Lommeuret (*figur 1*). Pludselig var tiden noget, man kunne have med sig, og opfindelsen var et varsel om den forrygende teknologiske udvikling, der fulgte i århundrederne efter. Peter Henleins ur krævede, at man kunne fremstille bevægelige dele med en nøjagtighed på grænsen af, hvad man kan se med det blotte øje, det vil sige omkring 0,01 mm. Siden har grænsen for, hvor små dele vi kan fremstille, rykket sig igen og igen.



Figur 1. Lommeuret. Et af de tidligste eksempler på mikromekanik. Præcisionen i uret er tæt på grænsen for, hvad menneskets hånd og øje kan præstere.



## Sensorer versus aktuatorer

### Sensor

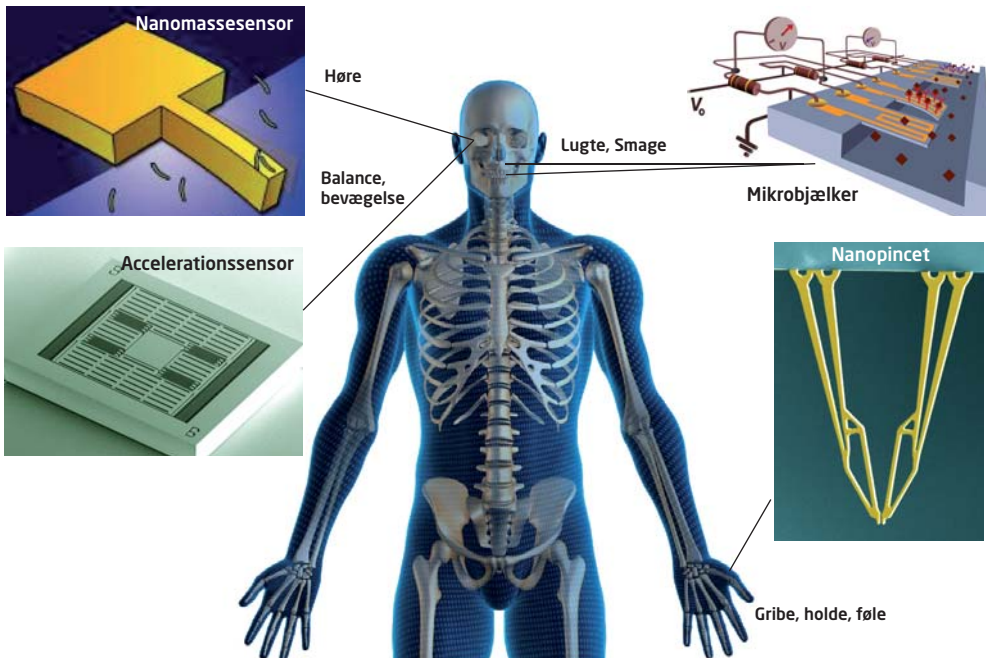
Fysisk, kemisk, mekanisk input  
⇒ Spænding, strøm output

### Aktuator

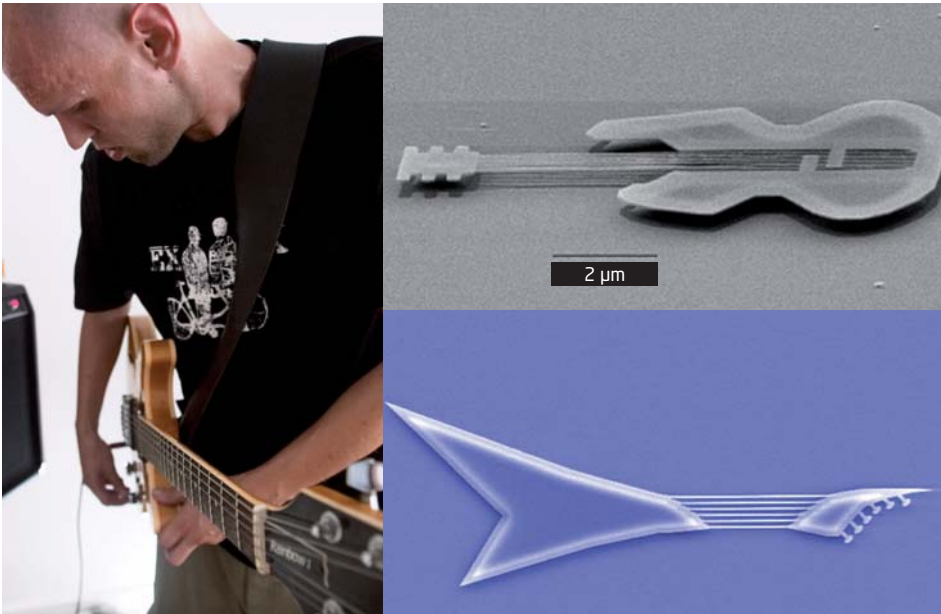
Spænding, strøm input  
⇒ Mekanisk output

I dette kapitel tager vi fat på to typer mikro- og nanomekanik: *sensorer* og *aktuatorer*. Ordet *sensus* kommer af latin og betyder føle eller mærke, mens *actus* betyder bevæge eller handle. Mennesket bruger *sensorer* (følesansen) til at registrere omgivelserne og *aktuatorer* (muskler og knogler) til at bevæge sig selv og tingene omkring os. På samme måde er sensorer og aktuatorer vigtige i forhold til at kunne registrere og flytte rundt på mikro- og nanodele (figur 2). I kapitlet gennemgår vi en række eksempler på mekaniske sensorer og aktuatorer:

- *Nanomassesensoren*, der som en meget lille guitarstreg måler ændringer i resonansfrekvensen, når bakterier eller vira sætter sig på den.
- *Accelerationssensoren*, der ligesom ørets balanceorgan måler bevægelser i telefoner, airbags og kameraer.
- *Mikrobjælken*, der 'smager' sig frem til bakterier i maden og 'lugter' sprængstoffer i lufthavnen, samt
- *Nanopincetten*, der fungerer som menneskets forlængede hånd og flytter rundt på bittesmå nanobyggesten.



Figur 2. Mekaniske og biokemiske sensorer efterligner menneskets bevægeapparat og sanser. De små mikro- og nanoapparater måler og registrer de mindste bevægelser og stofmængder og hjælper os med at flytte rundt på ting, der er alt for små, til at vi selv kan se og røre dem.



Figur 3. En mekanisk nanosensor, der svinger op og ned med en given resonansfrekvens, ændrer frekvens, hvis dens masse ændrer sig. Guitarstrengens vægt afgør, om tonen er lav eller høj. En tung streng har en lavere resonansfrekvens (og dermed dybere tone) end en let. Til højre ses to 'nanoguitarer', hvor de nanotynde strenge svinger med meget høje frekvenser.

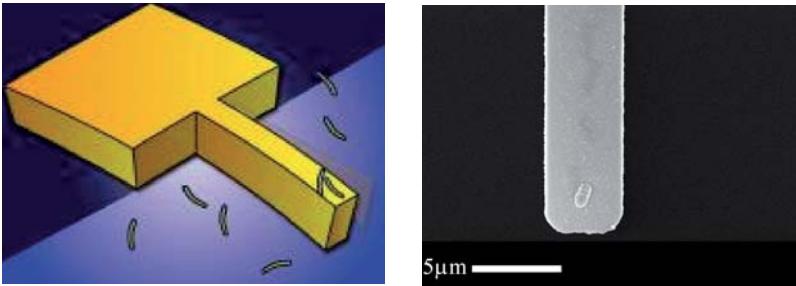
## Sensorer overalt

En mikrosensor er på størrelse med bredden af et hår, mens en nanosensor kan være ned til tusind gange mindre. Ved at gøre de bevægelige dele i sensorerne mindre, kan vi gøre dem mere fintfølede og for eksempel registrere bilens bevægelser meget præcist. Men frem for alt bliver sensorerne mindre og kan derfor bygges ind i flere og flere af de genstande, der omgiver dig: telefonen, køleskabet, tøjet og computeren for blot at nævne nogle få eksempler. Ting, vi normalt tænker på som døde og inaktive, bliver gjort 'levende', så de kan reagere på og for os og det omgivende miljø. I det følgende afsnit skal vi se nærmere på, hvordan ændringer i masse og frekvens bruges til at registrere bevægelser.

## Små bjælker, stor følsomhed

Naturlige og menneskeskabte mekaniske svingninger optræder overalt. Jordens kredsen rundt om Solen og elektronernes bevægelse rundt om atomkernen er begge mekaniske svingninger. Frekvensen, det vil sige antallet af svingninger per sekund, afgøres af massen af det svingende objekt. Små og lette mekanismer arbejder som regel med en højere frekvens eller reagerer på kortere tid end store og tunge. For eksempel svinger de lette tynde strenge på en guitar med en højere frekvens end de tungere tykke (figur 3), og en knallertmotor har et højere omdrejningstal end en traktormotor.

Sensorer, der registrer bevægelse ved hjælp af bevægelige dele, kalder vi for mekaniske sensorer. Hvis man bringer en bjælke i resonans, har man en sensor, der registrer, når noget lander på den. Det kaldes for en *massesensor* (figur 4) eller en masseresonator. Resonansen opstår, når bjælken påvirkes med en kraft, der svinger i takt med egenfrekvensen. Fordi resonansfrekvensen er afhængig af massen, ændrer den sig, når en partikel sætter sig på bjælken. Det vil sige, at man ved at måle ændringer i frekvensen både kan registrere partikler på bjælken. Hvis bjælken er meget fintfølede, kan man desuden bestemme massen af partiklen.



Figur 4. Bakterier og virus der lander på en vibrerende bjælke, får resonansfrekvensen til at blive en smule lavere (langsommere svingninger), fordi bjælkens masse bliver større. Ved at måle resonansfrekvensen af bjælker i nanostørrelse kan man registrere partikler helt ned til attogram ( $10^{-18}$ ), for eksempel en enkelt viruspartikel. Billedet til højre viser en *Escheria coli*-bakterie på en 320 nm tyk mikrobjælke af siliciumnitrid.

Hvor fintfølede en bjælke er afhænger af dens størrelse. Sammenhængen mellem resonansfrekvensen og det svingende objekts masse viser, hvad der sker med resonansfrekvensen, hvis bjælken på figur 3 gøres mindre i alle tre dimensioner: bredde, længde og højde. Mange svingende systemer opfører sig som harmoniske oscillatorer, som kendetegnes ved, at kraften, der trækker systemet tilbage mod ligevægt, er proportional med udsvinget:

$$F = -kx$$

hvor  $F$  er kraften,  $k$  er fjederkonstanten og  $x$  er udsvinget. Resonansfrekvensen  $f$  af en harmonisk oscillator er proportional med kvadratroden af fjederkonstanten  $k$  delt med massen  $m$  af den svingende del:

$$f \propto \sqrt{\frac{k}{m}}$$

Her kan man se, at resonansfrekvensen går ned, når massen går op. Hvad sker der så, når vi for eksempel gør bjælken 10 gange mindre? For det første afhænger fjederkonstanten  $k$  af bjælken som:

$$k \propto \frac{\text{bredde} \times \text{højde}^3}{\text{længde}^3}$$

Det betyder, at hvis bjælken gøres 10 gange mindre både i bredden, højden og længden på samme tid, bliver *fjederkonstanten* altså 10 gange mindre. Derimod bliver *massen* 1000 gange mindre, fordi massen  $m$  er proportional med volumenet, altså:

$$m \propto \text{bredde} \times \text{længde} \times \text{højde}$$

En sådan resonator kan udnyttes til at lave en massesensor, der bliver mere følsom jo mindre den er. De bedste nanomassesensorer er så følsomme, at de kan registrere *attogram* ( $10^{-18}$  gram), hvilket svarer til massen af enkelte bakterier og viruspartikler. Du kan læse mere om fremstillingen af nanobjælker i kapitel 8 om nanofabrikation.

### Bevægelsessensorer

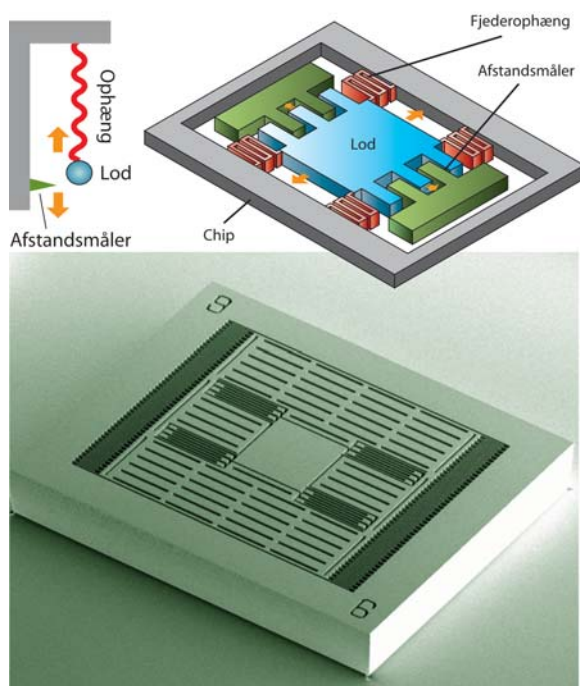
En af de mest udbredte typer bevægelsessensorer måler fartændringer. De kaldes også for acceleratorer eller et *accelerometer*. Vore dages højteknologiske biler og fly er fyldt med hundredvis af små mekaniske bevægelsessensorer, der konstant måler ændringer i farten. I bilens airbag sidder der bevægelsessensorer, der lynhurtigt og præcist registrerer pludselige stød, så airbaggen kun bliver udløst ved en ulykke. Bevægelsessensorer kan desuden måle vibrationer i vindmøller og industrielle maskiner og advare om slid og sammenbrud, længe før ulykken sker.

Bevægelsessensorer bruges også til livagtigt animerede film og computerspil, hvor en særlig sensordragt registrerer skuespillerens bevægelser (figur 5). Bevægelsesmønstrene kodes ind i en computer, så den animerede figur bevæger sig præcis som skuespilleren. Hjemme i stuen har spillekonsoller som for eksempel Nintendo Wii bevægelsessensorer bygget ind i maskinens controller, så enhver håndbevægelse bliver overført til spillet. Når du fejer controlleren frem og tilbage, styrer du samtidig tennisketsjeren eller boksehandsken på skærmen.

*Figur 5. 'Sensordragt'. I animerede film bliver figurerens bevægelser indspillet af en skuespiller iført en dragt med bevægelsessensorer. Bagefter bliver skuespillerens bevægelser overført til den computerskabte figur.*



Sensoren fungerer omtrent som et lod, der er hængt op i en fjeder. Bevæger man pludseligt ophængt, begynder loddet at svinge. Et *accelerometer* måler fartændringer med en mikroskopisk plade, der hænger på en chip (figur 6). Når chippen pludselig bevæges, begynder pladen i midten at svinge. Ved at måle svingningerne kan vi bestemme accelerationen af for eksempel en bil eller et fly. Bevægelsen bliver omdannet til et elektrisk signal ved *kapacitativ afstandsmåling*, som udnytter, at to elektrisk ledende plader placeret tæt på hinanden kan oplagre elektrisk ladning. Hvor meget ladning der kan oplagres afhænger af afstanden mellem pladerne. Når pendulet bevæger sig i forhold til afstandsmålerne, ændrer størrelsen af den elektriske ladning sig, og vi måler en lille strøm. De mest følsomme sensorer kan måle accelerationer helt ned til 1/1000 g – så roligt er det næsten umuligt at holde sin hånd.



Figur 6. Princippet i et accelerometer kan sammenlignes med et pendul (øverst). Loddet i midten sættes i svingninger, når chippen bevæges og ved at måle svingningerne kan vi bestemme accelerationen. Det kvadratiske lod er ophængt i tynde fjedre. Fingrene på loddet griber ind i de elektrisk ledende plader på hver side (afstandsmålerne) og ændrer deres kapacitans, når chippen bevæges i forhold til loddet. Kapacitansændringen udløser en lille strøm, og størrelsen af strømmen aflæses som en fartændring. Nederst ses et billede af et accelerometer taget med et Skanning Elektronmikroskop (SEM).

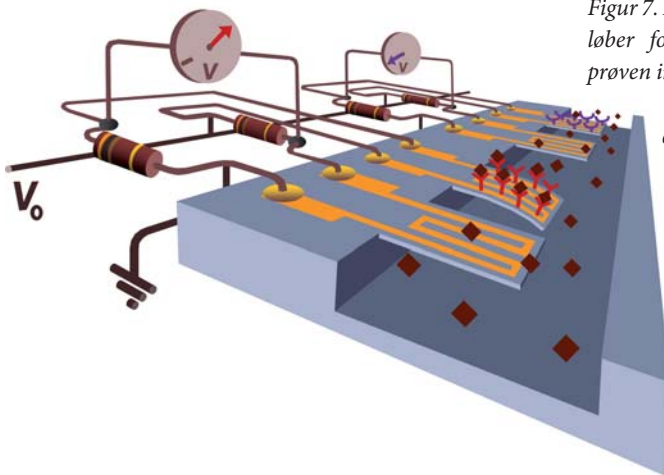
### Bakterier spores med mikroskopiske bjælker

En anden type mekaniske sensorer måler små mængder af for eksempel kemikalier, bakterier, vira og sprængstoffer. Hvert år bliver mange tusinde danskere syge af at spise mad inficeret med sygdomsfremkaldende bakterier som *Escheria coli* og *Salmonella*, som i værste fald kan slå dem ihjel. Hvis bakterier i fødevarer kan spores billigt og hurtigt, kan den enkelte landmand, slagter eller forbruger selv undersøge fødevarernes kvalitet. Hvis testen udføres der, hvor maden produceres, bliver de dårlige fødevarer fundet, allerede før de når ud på supermarkedets hylder. Det sparer bonden eller fabriksejeren for mange penge og forbrugeren for madforgiftning. En anden mulighed er, at du selv hjemme på



køkkenbordet undersøger maden for coli- eller salmonellabakterier. *Biosensorer*, der sporer bakterier nemt og billigt, ville også gøre stor gavn på hospitaler, hvor hygiejne et spørgsmål om liv eller død. Det har store sundhedsmæssige og økonomiske perspektiver at kunne spore bakterier i fødevarer, på hospitaler og andre steder.

En mekanisk biosensor sladrer om selv små mængder af bestemte biomolekyler, for eksempel bakterier og vira. I stedet for svingninger som i massesensoren, afslører biosensoren biomolekyler ved at bukke sig. For at forstå princippet i sensoren kan du tænke på et stykke karton, der bliver malet på den ene side. Når malingen tørrer, trækker den sig sammen og trækker kartonen under sig med, så det bøjer til den side, malingen er på. Hvis du nu tænker på en bjælke, der er 1000 gange mindre end et ark karton og dækket af et tyndt lag kemisk sporstof på den ene side, så har du den mekaniske vippesensor. Vippen bøjer, når et molekyle, der genkender sporstoffer, binder sig til den. Molekylet kan enten få det kemiske lag til at trække sig sammen, ligesom malingen, så vippen bøjer opad, eller det kan få laget til at udvide sig, så vippen bøjer nedad. Ved at bygge vippen sammen med væskekanaler på en mikrochip kan man lave en ekstremt lille sensor, der kan bruges til at undersøge blodprøver, spyt eller andre prøver for udvalgte bakterier, vira eller DNA-molekyler (figur 7).

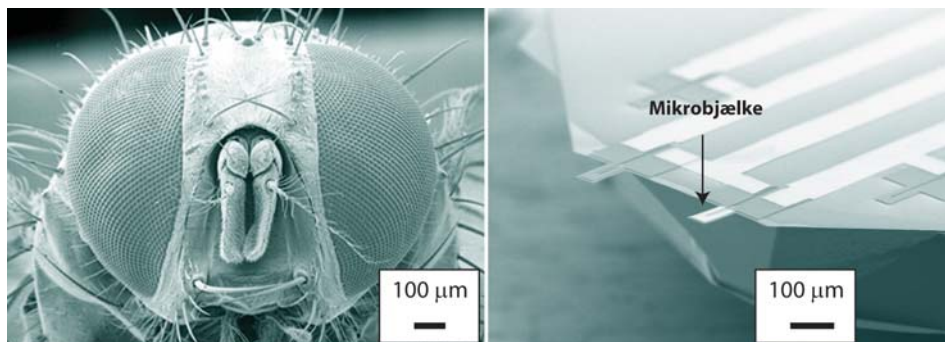


*Figur 7. Eksempel på en biosensor. Væsken løber forbi de små mikrovipper. Hvis prøven indeholder bakterier, der binder til vipperne, bøjer disse og ændrer deres elektriske modstand. Modstandsændringen aflæses på voltmeteret og afslører bakterierne.*

Vippen er lavet af silicium. Når den bøjer til den ene side, bliver den strukket på den modsatte side. For at måle hvor meget vippen bøjer, bygger vi elektriske stræksensorer ind, som ændrer deres elektriske modstand, når de strækkes. Sådanne materialer kaldes *piezo-resistive*, og et af dem er heldigvis silicium, som vi har arbejdet med i laboratoriet i mange år. Som sporstof bruger vi et, der binder præcis det molekyle, vi er interesseret i at finde. For eksempel kan antistoffer mod colibakterier spore bakterierne i en madprøve. Stræksensorerne er så følsomme, at bjælken blot behøver at bøje sig nogle få nanometer for at give et elektrisk udslag og derved slå alarm om tilstedeværelsen af bakterier i prøven. Så selvom bjælken i forhold til molekylerne er temmelig stor, nemlig omkring 1/10 mm



lang, kan man måle massen af blot en enkelt colibakterie (figur 8). Signalet registreres og forstærkes af indbygget elektronik. Derved kan man have et helt kemilaboratorium i lommen, i køledisken – eller i kroppen.



Figur 8. SEM-billede af to mikrobjælker af silicium set på samme skala som en husflue. Bjælkerne er 100 µm lange, 40 µm brede og 1 µm tykke og kan lige anes med det blotte øje.

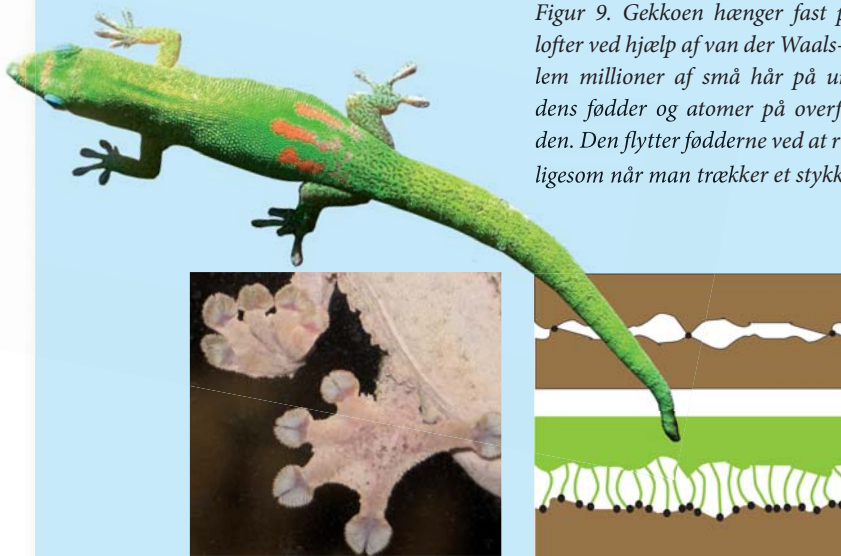
Allerede i dag kan biosensoren spore forskellige typer bakterier en ad gangen. Næste skridt er at kombinere bjælker med forskellige sporstoffer, der passer til hver sin bakterietype. Sensoren på figur 7 har fire forskellige sporstoffer på vipperne. På den måde kan vi undersøge prøver for mange forskellige bakterier på en gang. En anden mulighed er at bruge sporstoffer, der binder til forskellige kemiske forbindelser i sprængstoffer. Et sprængstof består ofte af mange forskellige stoffer, og sensoren kan fungere som en slags kunstig næse, hvor kombinationen af de bjælker, der bøjer, fortæller præcist, hvilket sprængstof der er tale om.

### Nanoroboter er menneskets stedfortrædere

Robotter er vores stedfortrædere i situationer, hvor vi enten ikke er stærke, præcise eller hurtige nok som ved et samlebånd i en bilfabrik eller på steder, hvor vi slet ikke kan opholde os – på dybt vand, i rummet, eller i nanoverdenen. At flytte rundt på nanostørrelser er lidt som at tælle sand med boksehandsker og fedtede briller. De værktøjer, vi benytter, er kluntede, og det er svært overhovedet at se, hvad der foregår. Her kan nanoroboterne heldigvis være os til stor hjælp. Det er dog stadig ikke ukompliceret at arbejde i nanoverdenen. Overfladekræfter, som normalt spiller en mindre rolle, får ting i nanostørrelse til at klistre sammen og gør arbejdet på nanoskala til en klæbrig affære. Det svarer lidt til at arbejde med dobbeltklæbende klisterbånd på fingrene. Du kan læse mere om overfladekræfter i boks 1.

### Boks 1. Kunsten at give slip på en nanopartikel

En af de vigtigste overfladekræfter er *van der Waals-kræfter*. Det er kortrækkende kræfter og har derfor størst betydning mellem meget små objekter som atomer og nanopartikler. Takket være van der Waals-kræfter kan gekkoen løbe rundt på lofter og vægge. Normale overflader er ru på nanoskala. Det vil sige, at to tilsyneladende glatte overflader normalt kun rører hinanden enkelte steder (*figur 9*). Under gekkoens fødder sidder der millioner af små hår, som alle sammen ender i spidser blot 100 nm brede. Hårene kan nå ind i alle de små sprækker og fordybninger i overfladen, og derfor har gekkoen mange flere kontaktpunkter til overfladen under den. Tilsammen bliver van der Waals-kræfterne mellem atomerne på hårene under gekkoens fødder og væggen, den løber på, så stærke, at de kan bære vægten af det relativt tunge dyr. Forskere på NASA har lavet kunstig gekkotape med *carbonnanorør*, som skal bruges til at holde astronauterne fast, når de klatrer på ydersiden af rumskibet.



*Figur 9. Gekkoen hænger fast på vægge og lofter ved hjælp af van der Waals-kræfter mellem millioner af små hår på undersiden af dens fødder og atomer på overfladen under den. Den flytter fødderne ved at rulle foden af, ligesom når man trækker et stykke plaster af.*

### Overfladekræfternes spil

Van der Waals-kræfter skyldes små ladningsforskydninger i atomerne på grund af elektronernes bevægelse rundt om kernerne. Selvom forskydningerne ændrer sig konstant, er nettoresultatet, at alle atomerne bliver en lille smule tiltrukket af hinanden, som om de havde modsat ladning. Van der Waals-kræfterne har en meget kort rækkevidde, så de betyder kun noget for atomer, der sidder i overfladen i modsætning til tyngdekraften, der påvirker alle atomerne lige meget, uanset hvor de befinder sig i partiklen. Vi er vant til at tænke på tyngdekraften som noget, alle genstande er påvir-

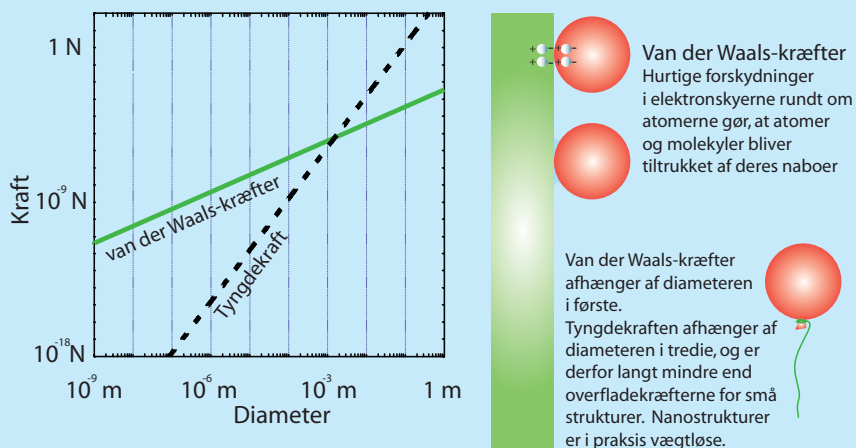
ket af. Forestil dig en partikel med en bestemt diameter. Tyngdekraften, som måles i newton ( $N$ ), er proportional med rumfanget ( $V$ ) og dermed diameteren ( $d$ ) i tredje:

$$N \propto V \propto d^3$$

For en partikel med 10 gange mindre diameter er tyngdekraften derfor 1000 gange mindre. Det er anderledes med van der Waals-kræfter. Korttrækkende kræfter påvirker små partikler relativt mere end store. Van der Waals-kræfterne mellem en partikel og en overflade er proportional med partiklens diameter:

$$F_{\text{van der Waals}} \propto d$$

For en 10 gange mindre partikel er overfladekræfterne derfor kun 10 gange mindre i modsætning til tyngdekraften, som var 1000 gange mindre. For en partikel, der er 100.000 gange mindre end et sandkorn, er tyngdekraften sat fuldstændigt ud af spillet i forhold til overfladekræfterne, som man kan se i *figur 10*. Nanopartikler opfører sig altså som vægtløse, men klistrede objekter; som balloner smurt ind i honning. Dette er selvsagt et alvorligt problem for nanoroboter, nanomekanik og nanomanipulation, fordi det er vanskeligt at give slip på og styre, hvor nanopartiklerne havner. Samtidig er det meget svært at undgå, at de klistrer sig sammen. Prøv selv at bygge en maskine af klistrede balloner! Du kan læse mere om overfladekræfter i kapitel 6.



Figur 10. Overfladekræfterne dominerer totalt på nanoskala.

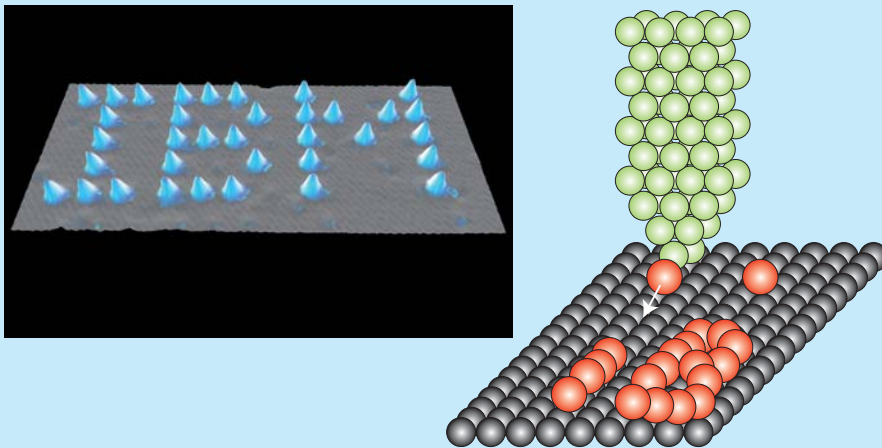
Som vi lige har set, hjælper nanomekaniske maskiner os med at måle og registrere utroligt små stofmængder, biomolekyler og andre materialer. Men de kan også bruges til at flytte og bygge med byggesten, der er under 100 nm store. Det svarer til nogle af de mindste viruspartikler, vi kender. Når vi arbejder med nanobyggesten, kaldes det for *nanomanipulation*.

Lige præcis nanomanipulation er en af de tidligste visioner, forskerne havde: at man en dag ville kunne bygge nanostrukturer, endda atom for atom. Du kan læse mere om IBM's arbejde med nanomanipulation i *boks 2*.

Det er imidlertid ikke manipulation med atomer, der er hovedemnet her, men derimod nogle større nanostrukturer på 10-100 nm. Med nanoroboter, mener vi mekaniske nanopincetter, der kan samle nanostrukturer op og flytte rundt på dem. Vi kigger især på en særlig slags byggekloids, som på grund af sine fantastiske mekaniske egenskaber har mange spændende anvendelser, nemlig carbonnanorøret. En stor del af forskning i nanomanipulation har været rettet mod disse små, diamanthårde rør med de unikke elektriske og mekaniske egenskaber.

### Boks 2. Det atomare flyttefirma

Et af de tidligste og samtidigt mest fantastiske eksempler på manipulation på nanoskala blev lavet af fysikeren Don Eigler fra IBM, der i 1990 rystede den videnskabelige verden ved at skrive navnet IBM med 35 xenonatomer på en overflade af nikkel (*figur 11*).



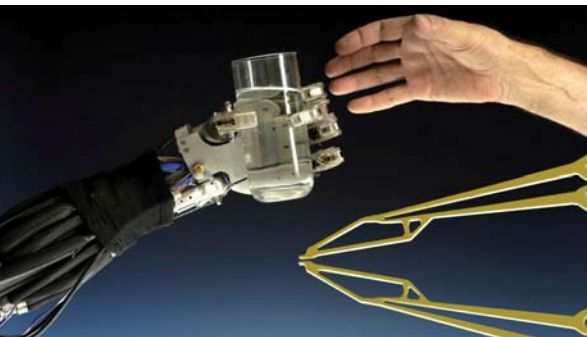
Figur 11. IBM skrevet med 35 xenonatomer (venstre) ved hjælp af et STM (højre).

Eigler brugte et *Skanning Tunnel Mikroskop* (STM), der egentlig ikke er opfundet til at flytte rundt på atomer, men blot til at betragte dem. At STM ud over at 'se' atomerne også kunne flytte dem en ad gangen, var noget af en overraskelse for forskerne, men opdagelsen har ikke ført til nogen praktiske anvendelser. Atomar manipulation er faktisk *for* småt, og alt, alt for upraktisk. Vi skal zoome ud til nanostrukturer, der er 10-100 nm i størrelse og består af millioner af atomer, før manipulation bliver praktisk anvendelig.



### Nanoværkstedet: nanostrukturer sat på spidsen

Et godt eksempel på nanomanipulation der kan bruges til noget, er at montere et carbonnanorør på en nål til et *Atomic Force Mikroskop* (AFM). Et AFM 'føler' overfladen af et materiale ved hjælp af en nål. Jo skarpere spidsen på nålen er, desto bedre bliver billedet. Men nogen gange kræver det endnu mere end en almindelig AFM-nål for at undersøge en overflade. I dette eksempel viser vi, hvordan man med en nanopincet monterer et carbonnanorør på spidsen af AFM-nålen, og på den måde når ned i dybe riller i et materiales overflade. Den slags undersøgelser er ekstremt vigtige for store mikrochipproducenter som Intel og Motorola, der bruger de lange, tynde AFM-spidses til at undersøge dybe riller og huller i mikrochippene. Carbonnanorør er gode til formålet, fordi de kan dyrkes på en siliciumskive ved en kemisk proces, som får dem til at vokse lige i vejret, omtrent som bambusskud (*figur 13*). For at brække de diamanthårde nåle af og flytte dem over til AFM-nålen kræver det imidlertid et helt særligt værktøj. *Nanopincetten* er en kunstig gribeam, der er 10.000 gange mindre end en menneskearm, og som kan lukke sammen om en tråd med en diameter 10.000 gange mindre end et menneskehår (*figur 12*).



*Figur 12. Mekaniske arme giver handicappede forligheden tilbage. På nanoskala er vi handicappede af, at vores arme er cirka 10.000 gange for store. En almindelig hånd kan holde på genstande, der er omkring 10 cm store, mens nanopincetten kan gribe om strukturer, som nanorør, der kun er få hundrede nanometer store.*

### En varm hånd til nanostrukturerne

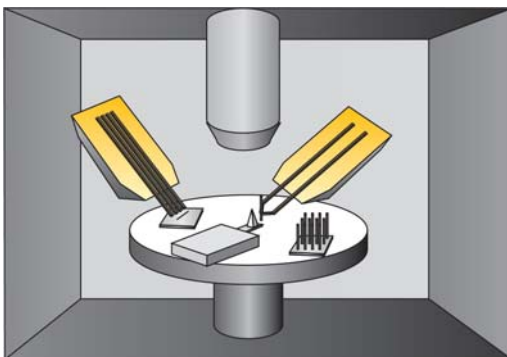
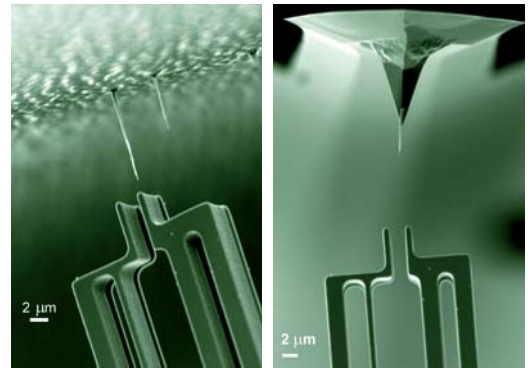
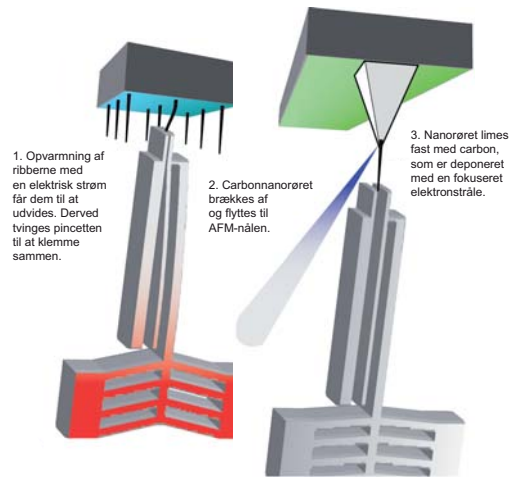
Nanopincetten, som er vist på *figur 12*, er fremstillet af silicium med metoderne fra kapitlet om nanofabrikation (kapitel 8). Pincetten åbner og lukker ved hjælp af *elektrotermisk udvidelse*. Når en elektrisk strøm sendes igennem strukturen, stiger temperaturen. Som næsten alle andre materialer udvider silicium sig ved opvarmning, og pincetten er designet sådan, at udvidelsen bliver omdannet til en åbne/lukke-bevægelse, omtrent som en tang. For silicium er den termiske udvidelse 1 % for hver 300 K, som temperaturen øges. Det lyder umiddelbart ikke af så meget, men nanopincetten er udformet, så selv en lille udvidelse på et par procent bliver forstærket til en lang og stærk gribebevægelse.

Nanopincetten på *figur 13* har en række skrå ribber. Når der sendes strøm igennem ribberne, udvides de og tvinger derved midterbjælken fremad, hvilket får pincetten til at lukke. Lukningen kan ske med en kraft på op til 25 mN, hvilket svarer til vægten af 100.000 nanopincetter. Carbonnanorør er uhyre stærke, så der kræves en betydelig kraft for at brække dem af.

Forskerne styrer 'nanohåndens' bevægelser med et *elektronmikroskop*, der kan stille skarpt på objekter blot få nanometer store. I mikroskopets vakuumkammer er der plads til en nanorobot med fire uafhængige arme, der hver især kan bevæges i tre retninger med en nanometers nøjagtighed (figur 14).

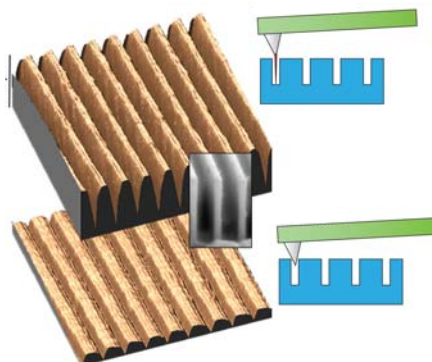
Figur 13 viser også, hvad robotten kan udrette. Nanopincetten sættes fast på en af de fire robotarme og styres derefter hen til og lukker sammen om et kraftigt nanorør. Ved at lukke og trække pincetten sidelæns knækker røret af og kan flyttes hen til spidsen af en AFM-nål. Nanorøret limes fast på nålen med elektronstrålen fra mikroskopet, der danner en tynd, men stærk film af carbon, som holder nanorøret på plads. Når vi herefter bruger AFM-nålen til mikroskopi, kan vi se, at en nål med et nanorør for enden gengiver de dybe riller meget mere præcist end en almindelig pyramideformet AFM-nål (Figur 15).

Figur 13. Øverst: Princippet i arbejdet med nanopincetten. Nederst: En nanopincet trækker et carbonnanorør af en overflade, flytter det over til AFM-nålen og holder det, mens en elektronstråle 'limer' nanorøret fast. AFM-nålen har nu fået en stærk og tynd spids, der er perfekt til at nå ned i dybe huller og riller.



Figur 14. Illustrationen til venstre viser det indre af et elektronmikroskop, hvor robotarme bevæger forskellige nanoværktøjer rundt. På det runde bord i midten ligger de nanostrukturer og kredsløb, vi arbejder med. Et lille robotsystem ses til højre klar til at blive monteret i elektronmikroskopet.

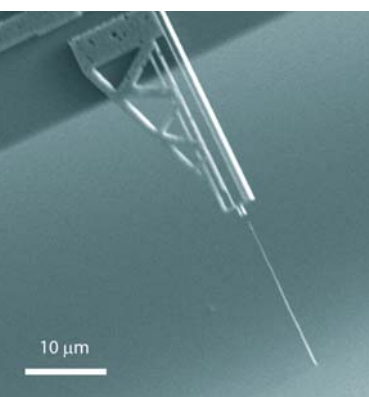
Figur 15. De to billeder til højre viser forskellen på billeder taget med en AFM-nål med nanorøret (øverst) og med en almindelig pyramideformet spids (nederst). Rillerne, som er 2,5  $\mu\text{m}$  dybe og 700 nm brede vises meget mere præcist med nanorørsspidsen.



## Perspektiver

I dette kapitel har vi vist nogle eksempler på mekanik, der er så følsom, at det registrerer ændringer på nanoskalaen. *Massesensoren* måler massen af viruspartikler og bakterier ved ændringer af resonansfrekvensen. *Accelerometret* registrerer bevægelser ved hjælp af et mikroskopisk lod, der bevæger sig blot få nanometer. I *biosensoren* sidder der bittesmå bjælker, der bøjer, når de binder biologiske molekyler eller kemiske stoffer, og endelig er der *nanopincetten*, der kan bruges til at flytte på og bygge med nanostrukturer.

De mekaniske sensorer er her allerede, men i takt med at vi bliver dygtigere til at fremstille billige bevægelige mikro- og nanokomponenter, vil de blive brugt i flere og flere af dagligdagens apparater og ting. Forestil dig, at dit tøj måler, om du bevæger dig nok, eller slår alarm, hvis du falder om. Måske kommer din badmintonketsjer til at kunne gemme alle dine slag, så du kan analysere dem bagefter på computeren. Mikrobjælker i dit køleskab fortæller dig om bakterievækst, og transportable mikrolaboratorier analyserer dit blod for sygdomme på få minutter. Sensorer i maskiner fortæller, når maskinernes dele er ved at være slidte og skal skiftes ud. Nanomekanikken kommer til at ændre vores hverdag mere og mere, så grænsen mellem aktiv og levende på den ene side og passiv og livløs på den anden side flyder ud.

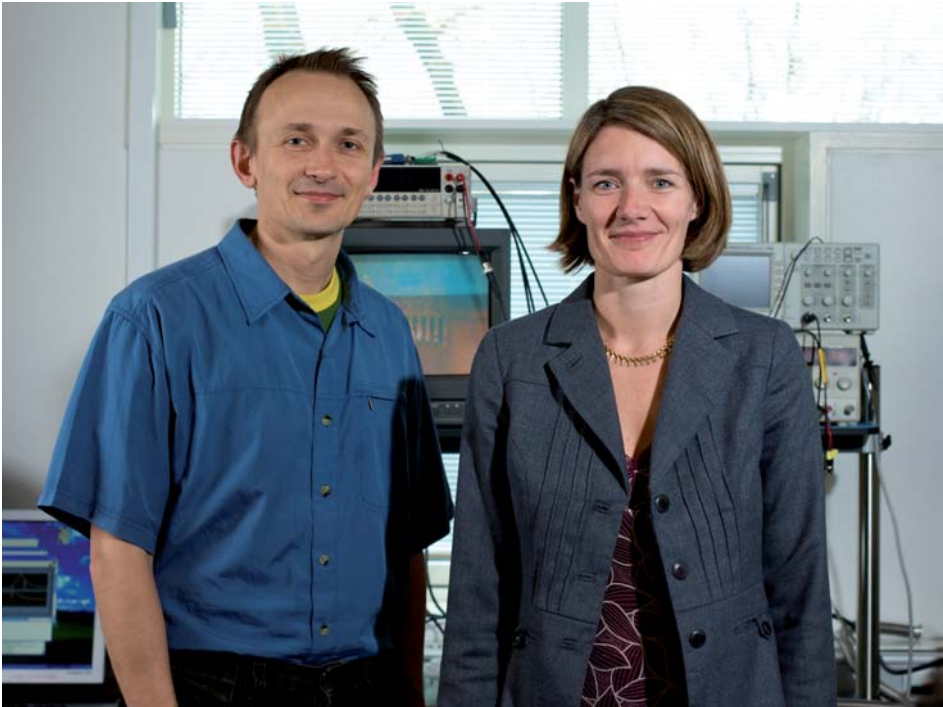


Nanomekanikken gør det muligt ikke bare at måle og røre, men også at flytte objekter, vi indtil for få år siden dårligt nok kunne se. Vi kan allerede i dag lave nanopincetterne endnu mindre end dem du har set i aktion i dette kapitel. *Figur 16* viser en nanopincet, der i sin fulde længde er blot 20  $\mu\text{m}$  – endnu mindre end bredden af et hår. Gabet mellem gribekæberne er kun 300 nm, det vil sige mindre end bredden af en salmonellabakterie. Nanomanipulation med pincetter er stadig så nyt, at ingen – heller ikke forskerne – ved endnu, hvor meget teknikken kan bruges til.

*Figur 16. Verdens mindste massefremstillede pincet er kun 20  $\mu\text{m}$  lang, og har et gab på blot 300 nm – mindre end bredden af en bakterie. Den kan flytte rundt på strukturer på størrelse med et stort molekyle.*

Et perspektiv er at kæde nanopincetter og elektronmikroskoper sammen med et virtual reality-system, så du i fremtiden vil kunne tage særlige briller og handsker på, og bygge nanostrukturer med dine 'egne' hænder. Du kunne for eksempel tage et carbonnanorør op, undersøge det og sætte det ned på et elektrisk kredsløb. Et virtual reality-system vil gøre det betydeligt nemmere at bygge nanokredsløb og -maskiner. Nanopincetten er blot én slags værktøj, vi forestiller os er nyttig. Der er mange andre, man endnu ikke har forsøgt sig med. Hvad med en nanosav, -boremaskine eller -hammer?

Da vi for titusinder af år siden opfandt de første redskaber og maskiner og opdagede, at vi kunne udnytte fysikkens love til at lave mekaniske konstruktioner, skete der et enestående skred i menneskets udvikling. Nu er ingeniørerne og forskerne begyndt på en tilsvarende rejse. Denne gang står der blot nanometer og ikke centimeter på målebåndet.



*Kapitlets forfattere. Lektor Peter Bøggild og Professor Anja Boisen.*