

Innehåll

Förord av Anders Bányó • 9

Förord • 13

1. Nano vadå? • 15

Molekylslöjd – naturens eget hantverk • 15

Revolution med bekymmer • 16

Litet är vackert – och billigt och praktiskt • 22

En kula är en kula – men en nanokula är en vågrörelse • 28

Nano förenar • 31

Nano på gott och ont • 33

Visionären Feynman: Det finns gott om plats på botten • 35

Richard Feynman – hälften geni och hälften narr • 38

Liten atomhistoria för nanoåldern • 44

En annan liten atomhistoria lämpad för nanoåldern • 46

Atomers relationer • 48

2. In i nanovärlden • 53

Atomer i sikte • 53

Spektroskopi – gammal är äldst • 54

Spektroskopins många ansikten • 55

Atomer i mikroskop – en fysikers dröm • 57

Heinrich Rohrer och Gerd Binnig – atomspanarpionjärer • 58

Efterföljarna • 64

Ernst Ruska – mannen som lärde sig se utan ljus • 67

En värld med bollsinn • 71

3. **Materialen • 75**
 - Det märkliga kolet • 75*
 - Kolets bindningar • 76*
 - Hur Bucky fick priset – fotbollshjälten Smalley • 77*
 - Buckybollen som startskott • 81*
 - Sumio Iijima och hans rör • 82*
 - Nanoröret – den starkaste grej som finns • 84*
 - Nanorör i praktiken • 86*
 - Grafen – ännu en kolkonst • 88*
 - Andra byggmaterial • 92*
 - Nanotrådar • 92
 - Nanobygda material • 93
 - Nanopartiklar, nanosfärer och tulpanmani • 94
 - Byggvaruhuset Naturen – livets material • 95*
 - Polymerer och proteiner • 96
 - DNA – en klippare i nanovärlden • 97
 - Amfifiler och liposomer – ett nanoskepp kommer lastat • 98
4. **Att skrida till verket – nanobyggmetoder • 101**
 - Litografi • 102*
 - Mikroskopen • 104*
 - Kemiska metoder • 106*
 - Molekylära knep och finter • 106
 - Katalysatorer • 107
 - Självbyggande processer • 108*
 - Algoritmiska metoder • 111
 - Unik adressering • 112
 - Origami – att vika papper eller (i nanoåldern) en DNA-sträng • 112
 - Cellen – ett välordnat postkontor • 115
 - Bottom up och top down i ett • 116
 - Självbyggandets etik • 117
5. **Medicin – nano i livets tjänst • 119**
 - Diagnostik – labbchip • 120*
 - DNA-kartläggning med biochip • 122*
 - »Superröntgen« • 123*
 - Själv är bästa dräng – hemmalabbet • 123*

- Leverans* • 125
Skepp ohoj • 126
Trojanska nanohästar • 128
Fotodynamisk terapi – »cancerkokerskan« Naomi Halas • 129
Genom huden • 133
Förbenat lurendrejeri • 133
Nanoapparater med nerv • 135
Nano på hjärnan i Lund • 136
6. *Energien och miljön – ny ork till Moder Jord* • 139
Över alltihopa lyser Moder Sol • 140
Naturhärmande solceller • 142
Nano – kråkornas skräck • 143
Termoelektriska apparater • 144
Nano i skogen • 144
Nanobatterier – mer kraft i vardagen • 145
Vätgasbilen – körglädje med nano • 146
Danmarks Mr Nano och katalysatorerna • 149
Att hålla sig på ytan • 151
Ge nanojärnet för en renare värld • 153
7. *Sensorer – bättre koll på världen med nano* • 157
Hur göra? • 158
Problem • 160
Användning • 160
Christoph Gerber – med näsa för nano • 162
8. *Elektronik – mindre och smartare* • 167
Transistorer • 168
Minnen • 170
Spinn, spinn, elektronen min • 170
Andra ess i nanorockärmen – transistorer med kolnanorör och nanotrådar • 172
Enelektrontransistorer • 174
Moltronik • 176
Nanonät – Elektronen som stigfinnare • 177
Mekanikens come back • 178
Den svårslagna kiseltekniken • 179

9. Optik – varde ljus med nano • 183
Från speglar till sensorer • 188
En lysande framtid • 189
En ljus idé i Lund • 191
10. Nanos mörka sida • 195
Nanobots • 195
Nanobekymmer • 198
 Partiklar • 198
 Nanopolitik • 202
Nanoetik • 206
11. Datorer i vågor och vatten • 211
Nanos spelregler • 211
Kvantdatorn – velighetens upprättelse • 216
Kvantkryptering • 221
DNA-datorn • 224
12. Och sedan? • 229
All promise, no products? • 229
En framtid med nano • 232
Är botten nådd? (Apropå Feynman) • 236
- Lästips • 239
 Böcker • 239
 Länkar • 240
- Källor • 241
- Ordlista • 245
- Index • 249

1. Nano vadå?

Om du tror att något kan vara för litet för att påverka, försök då sova i ett stängt rum med en mygga. (Afrikanskt ordspråk)

Molekylslöjd – naturens eget hantverk

Nanos är grekiska för dvärg. En nanometer är en miljarddel meter, och ungefär så stora – eller små – är fem till tio atomer lagda på rad. En bakterie mäter 500–5 000 nanometer. Det minsta föremål vi kan se med blotta ögat är cirka 10 000 nanometer, och ett mänskligt hårstrå är 50 000–100 000 nanometer (eller 0,05–0,1 millimeter) tjockt.

När människan bygger samman materialbitar som är mellan en och några hundra nanometer stora utövar hon nanoteknologi, populärt även kallad molekylslöjd. Men nanoskalan är också storleksnivån där naturen fogar samman den värld vi lever i. Mindre än en nanometer är bara atomer, molekyler och småpartiklar som ensamma driver omkring i världsalltet. Allt som gör universum till något mer än ett dött och händelseöst gasmoln försiggår på nanonivå; molekyler som slår sig samman till vätskor och fasta föremål, kemiska processer som förändrar och förvandlar, världar och liv som föds, dör och föds igen till något nytt.

Om nu den ursprunglige nanoteknikern naturen klarar detta så galant kan man fråga sig om det inte vore bäst att även i fortsättningen överlåta allt nanobyggande till den. Nu är förstås tanken med nanoteknologin inte att ersätta naturens »teknologi«: atomer som går samman och skiljs åt, och molekyler som bildas och ombildas enligt sina egna inbyggda lagar, är och förblir världens gång. Men om människan kan styra vissa av processerna, så att de sker när hon vill och på det sätt hon vill, öppnar sig nya möjligheter för henne att skapa bättre villkor för sig själv och för vår planet. Om vi kan bygga med enskilda molekyler behärskar vi all konstruktion från grunden. Mindre delar finns inte som är meningsfulla att försöka sätta samman.

Revolution med bekymmer

Den 21 januari 2000 reste USA:s dåvarande president Bill Clinton till *California Institute of Technology* (Caltech) med en nyhet i portföljen. I den fanns texten till ett tal där Clintonregeringen lovade att styra över en halv miljard dollar till nanoforskning under 2001 och starta forskningsfinansieringsprogrammet *National Nanotechnology Initiative* (NNI). Till och med 2008 hade det bekostat nanoforskning för sju miljarder dollar [1].

Sju miljarder var visserligen bara en liten del av USA:s totala statliga forskningsbudget som under de åtta åren uppgick till drygt 400 miljarder dollar. Men NNI var ändå en markering av att här fanns en ny forskningsgren som det var viktigt att satsa på. Det var nämligen inte för nöjes skull USA öppnade plånboken. När Bill Clinton satt på planet till Kalifornien visste han att ett hot lurade mot det högteknologisamhälle vi byggt in oss i under de senaste årtiondena. Världens elektronikindustri, som dittills varit mer eller min-

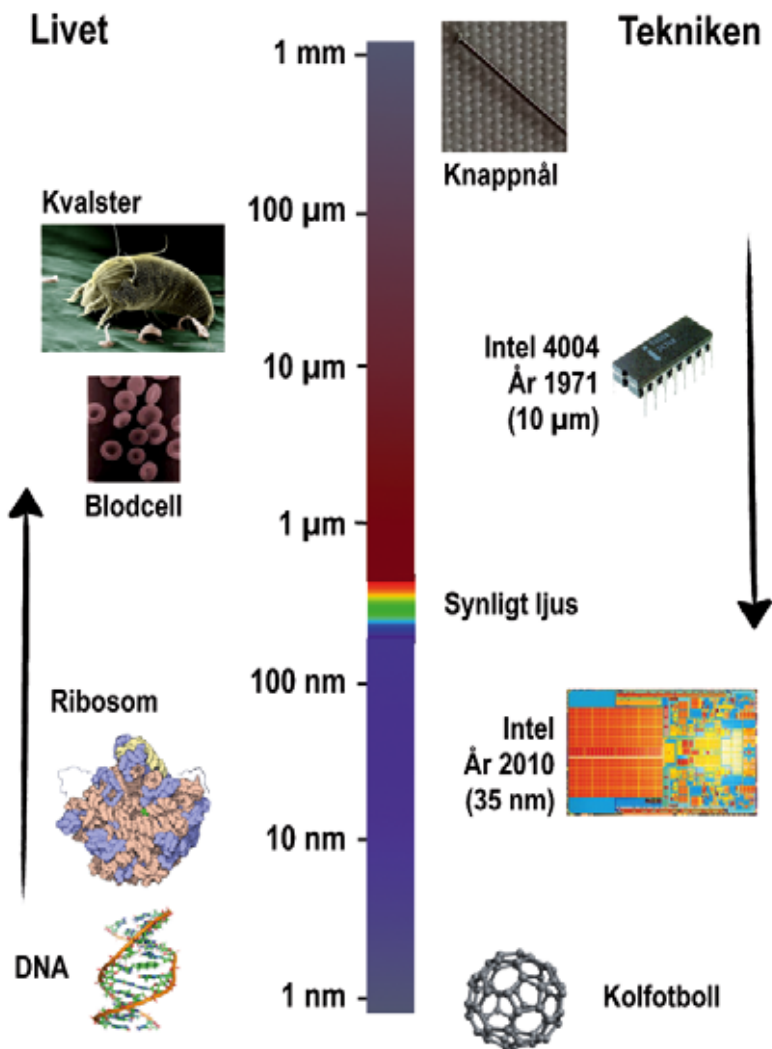


Fig. 1. Livets respektive teknikens skapelser i olika storleksordningar. Medan livets utveckling har gått från molekyler till enstaka celler och vidare till multicellulära organismer, går teknikens utveckling åt motsatt håll, mot allt mindre byggstenar. Till exempel var de minsta detaljerna i mikroprocessorerna, hjärtat i våra datorer, några mikrometer i början av 70-talet då de första tillverkades. År 2010 var motsvarande detaljer bara 35 nanometer.

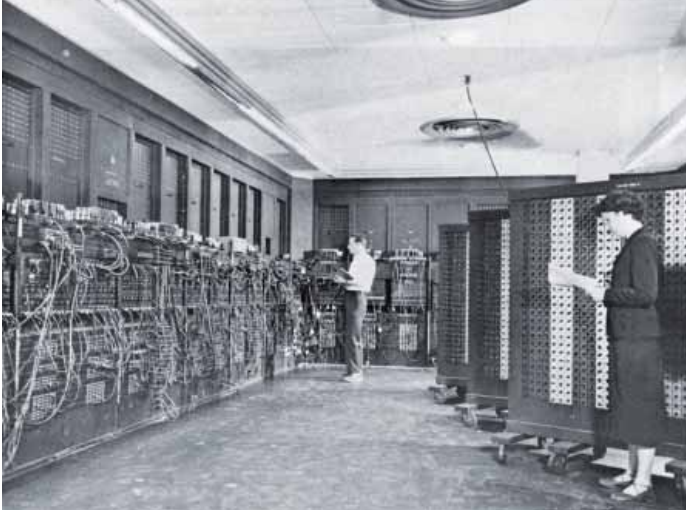


Fig. 2. Datorn Eniac i Philadelphia, USA, programmeras av Glen Beck och Betty Snyder. Eniac färdigställdes 1946 av John Eckert och John Mauchly och hade 18 000 radiorör. Sveriges första dator var Bark (Binär Aritmetisk Relä-Kalkylator), som byggdes av standardtelefonreläer och stod klar 1950. Den följdes tre år senare av elektronrörsdatorn Besk (Binär Elektronisk Sekvens-Kalkylator). Benämningen då var matematikmaskin eller elektronhjärna, och under några veckor var Besk världens snabbaste dator. Bild: US Army Photo/Wikimedia Commons

dre självgående, behövde nu hjälp och stöd för att fortsätta sin lyckosamma frammarsch.

För att förstå den oro han delade med många andra måste vi backa ett drygt halvsekel i tiden till 1950, innan tekniken att tillverka mikrochip i kisel med litografi-metoder fanns. Då var TV:n svartvit, enkanalig och långt ifrån var mans egendom. Världen rymde kanske ett tiotal datorer, var och en stor som en balsal och ompysslad av specialutbildad personal, ibland skrudad i vita rockar. Persondatorer, Internet och mobiltelefoner existerade på

sin höjd i science fiction-böcker och teknikentusiasters drömmar.

Sedan kom kiselteknologin, transistorn och den integrerade kretsen och det var i sanning en revolution. I dag har elektronikens landvinningar förändrat livet för miljoner människor världen över. Få av dem vet hur apparaterna är tillverkade, och det behöver de heller inte för att ha glädje av dem. Men alla är intresserade av att elektroniken blir allt bättre och billigare.

Om en bilförsäljare på fullaste allvar försäkrade att om 20 år kommer en nytillverkad bil att ha en marschhastighet på 100 000 kilometer i timmen, dra en knapp tesked bensin per mil och kosta under tusenlappen i inköp skulle vi inte bara skratta åt honom – vi skulle nog misstänka att han var galen. Men elektroniken har faktiskt genomgått mer än en förvandling av den kalibern. Sedan 1960 har datorchipsen var 24:e månad fördubblat sin kapacitet. Det betyder att de efter 20 år blivit tusen gånger bättre än den första generationens chip. Och eftersom utvecklingen är exponentiell har de efter ytterligare 20 år, alltså 40 år efter generation ett, blivit en miljon gånger bättre.

En som tidigt såg den höga förändringstakten var Gordon Moore, en av grundarna till företaget Intel. År 1965 formulerade han sin upptäckt i det som sedan kallas Moores lag [2]. Den fastslår att antalet transistorer på ett chip fördubblas vartannat år till samma pris per chip. Förutsättningen för den ohejdade förbättringen har varit att transistorerna, byggstenarna i chipen, har kunnat göras ständigt mindre och billigare. Krympande transistorer är kiselrevolutionens främsta grund: ju mindre komponenter, desto fler kan packas in i en dator av bekväm storlek och desto mer kan prestandan öka. Men nu är komponenterna på väg att krympa ned till en nivå där det behövs nya verk-

tyg, metoder och kunskaper för att hantera dem. Den teknik vi hittills använt räcker inte till och i fjärran skymtar den gräns där komponenterna inte kan bli mindre, där naturlagarna själva sätter stopp. Om inte Moores lag kan följas också i framtiden är elektronikens kris ett faktum. Hoppet om räddning står till nanoteknologin.

Med tanke på vad datortekniken betyder för samhället var det förståeligt att USA startade *National Nanotechnology Initiative*, och att det snabbt ledde till att andra länder och även företag följde efter. 2007 nanoforskades det för 12 miljarder dollar i världen, och industrins satsningar var större än regeringarnas. I EU:s sjunde ramprogram för forskning är nanoteknologi ett av nio prioriterade områden och 3,5 miljarder Euro finns avsatta för åren 2007–13 [3]. Det är nästan tre gånger så mycket som föregångaren, det sjätte ramprogrammet, reserverade.

Om datorutvecklingen kan fortsätta följa Moores lag finns om 20 år datorer som är ytterligare tusen gånger kraftfullare än dagens. Då börjar de närma sig en mänsklig hjärnas kapacitet i vissa avseenden, och vad det skulle betyda för kommunikationen, samhällslivet och vardagen kan man bara drömma om. Det är i sig en god anledning till att företag som IBM och NEC plöjer ner forskningsmiljoner, och till att nanoforskningscentrum växer upp vid världens stora universitet, från jättarna Stanford och Caltech på USA:s västsida till det teknikfrälsta Japan i öst, kompletterade med mindre forskargrupper vid de flesta universitet i mindre länder som Sverige. Resultaten har gjort att flera Nobelpris på senare år har gått till forskare med nanoanknytning, och Feynmanpriset instiftades enbart för just det området.

Ändå är inte elektronikbekymren hela svaret på varför nanoteknologin nu går så starkt framåt. Världen hoppas

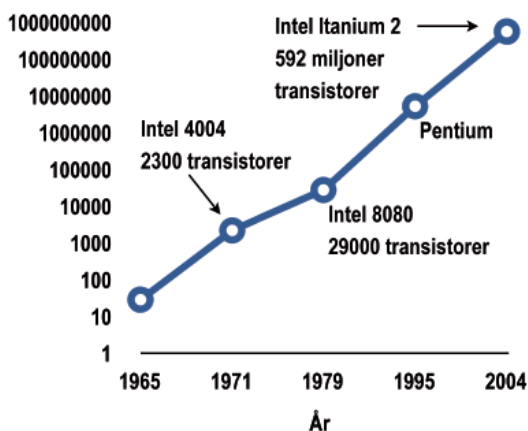


Fig. 3. Moores lag säger att datorer blir dubbelt så kraftfulla var 24:e månad. Grafen visar hur antalet transistorer per chip har ökat med tiden.

också på storverk inom andra områden som kanske känns ännu mer kittlande. Ett och annat har redan lämnat forskningsstadiet: enligt jämförelser som Norbert Malanowski, vd för Technology Center i Düsseldorf, har gjort såldes under 2001 produkter med inslag av nanoteknologi för 80 miljarder dollar i världen. År 2014 räknar han med att siffrorna ha stigit till 1 000 miljarder [4].

Till sådana signaler lystrar investerare, och allt fler av dem knackar nu på dörrarna hos nanoforskarna. Till och med populärkulturen har uppfångat nanovibrationerna och producerar böcker, filmer och TV-serier om grå gegga (*grey goo*) och små nanorobotar som tar över världen, styrda av den galne vetenskapsmannen som är en av genrens favoritskurkar sedan Victor Frankensteins 1800-talsdagar.

Vad är det då som är på gång? Följ med på en snabbtur genom nanoteknologins löften och visioner; en del redan genomförda, vissa realistiska och andra så otroliga att de kanske aldrig kommer att lämna fantasivärlden. Men alla fascinerande.

Litet är vackert – och billigt och praktiskt

Där de största problemen finns kommer de största forskningsansträngningarna att göras och mest resurser att investeras. Därför kan vi räkna med att höra nanoteknologi nämnas allt oftare i samband med energiförsörjning och miljövard.

Så kallade elektrokroma fönster har en beläggning av nanopartiklar i zink- eller titanoxid. De kan reglera mängden solstrålning som faller in i ett rum genom att ändra färg efter solljusets intensitet. Med en knapptryckning kan man själv styra solmängden och få ett svalare inomhusklimat utan att slösa energi på luftkonditionering. Rutor med nanoskopiska speglar kan i stället rikta solljuset så att det faller längre in i rummet. På så vis kan de nordliga länderna utnyttja dagsljuset bättre under vintern.

Om fönstren i stället beläggs med nanopartiklar i kisel kan de ta tillvara solljuset och omvandla det till elektricitet, som solceller. Beträffande solskörd försöker nanoforskarna också ta lärdom av de små nanomaskiner som arbetar i varje planta som utövar fotosyntes, och på så vis framställer all den energi som håller igång växt- och djurlivet, inklusive våra egna kroppar. Artificiell fotosyntes är ett av många spår inom nanoforskningen. Men också dagens solceller i kisel skulle kunna ta upp mer solenergi om de i stället för att vara platta beströks med små knaggliga nanopartiklar. Partiklarna erbjuder större yta som kan träffas av solstrålningen, på samma sätt som ett kilo sandkorn har större sammanlagd yta än en enkilos sten.

Lysdioder gjorda av nanotrådar omvandlar el till nästan bara ljus så att mindre energi går bort i spillvärme. Det är nyttigt för både miljön och ekonomin. Även nanoålderns nya material kan spara energi. Så kallade kolnanorör väger bara en sjättedel så mycket som stål men är hundra gånger

starkare, och ett flygplan byggt i ett kompositmaterial av plast och nanorör skulle bli hållbarare, lättare, snabbare och billigare i drift. Sådana material lovar även omvälvningar för rymdfarten, byggbranschen och kanske till och med för idrotten. Det pågår också experiment med självlagande material, till exempel en sorts syntetiskt gummi där molekylerna binder till varandra på ett sådant sätt att de söker nya partners när de separeras. Andra idéer är material som reagerar på påfrestningar med att mjuka upp sig så att de böjs istället för att brytas. Och man kan bara spekulera kring vad starkare, lättare elkablar, med en ledningsförmåga som minimerar strömförlusterna, skulle betyda för elpriset och miljön.

Med nanodesignade katalysatorer öppnar sig chanser att bryta ner material, som i dag bara ligger på soptippen som tickande miljöbomber eftersom det inte finns teknik att ta hand om dem. Med en perfekt nanofiber skulle vi kunna lyfta en bil med en lina tunn som en sytråd. Plaster, färger och annat som i dag tillverkas kemiskt kan få nya, nanobaserade och miljövänligare arvtagare. Och varför bygga stora maskiner om små kan göra samma jobb, samtidigt som de tär mindre på jordens resurser genom att vara energisnållare och sluka mindre material i tillverkningen?

Efter elektroniken och miljön är medicinen det område som har mest att vinna på nanoteknologin. Allt kroppens grundläggande arbete pågår på nanonivå. Celler är lysande exempel på nanomaskiner som läser bruksanvisningen i vårt DNA och bygger proteiner, som i sin tur bygger upp cellerna och får dem att dela sig till organismer. Inom diagnostiken talas det redan om nanotekniskt tillverkade, förfinade mätverktyg som identifierar kemiska substanser där de inte ska vara (föroreningar) eller där de ska vara (läkemedel som hittat rätt i kroppen). Om en patient bär på sig ett nanostort

labbchip, som kontrollerar hans värden, slipper han sjukhusbesök och väntan på tidsödande storlabbsanalyser.

Ofta är nanopartiklar tillräckligt små för att smyga sig in i och förena sig med biologiska system. När sjukdomar väl är diagnostiserade lovar därför nanoteknologin metoder för säkrare transport av mediciner, som målstyrs till rätt kroppsdel. Då ökar effektiviteten, medan biverkningarna minskar. Redan provas nanobomber som söker upp cancertumörer och attackerar dem på plats. Likaså arbetas det på proteser, som med hjälp av nanoelektroder i hjärnan skulle kunna reagera på »tankekraft«, precis som en riktig kroppsdel.

Men inte bara stora problem står i tur att få nanolösningar, utan också vardagens små förtret. Hur vore det med byxor som tål att få det mustigaste rödvin utspillt över sig utan att bli nedfläckade? Ett textilmaterial som det amerikanska *Nano-Tex* står emot vätska men andas ändå, till skillnad från plast och galon. För flera textilfabrikanter står växtrikets nanofenomenala idéer för förebilden. Den renliga lotusblomman, till exempel, har skaffat sig massor av små vaxade hår, som sitter så tätt ihop att smuts och väta inte får plats att tränga ner mellan dem utan bara glider av. Med samma enkla knep leder blomman regnvattnet till roten.

Självrengörande fönsterrutor fungerar med hjälp av solens ultraviolette strålar. UV-ljuset ger ett extra energitillskott åt titanoxidpartiklars elektroner, som hjälper vatten i omgivningen att reagera till så kallade radikaler. De i sin tur bryter ner organiskt material, som smuts, till bland annat koldioxid, vatten och nitrater. Därefter kan regnvatten skölja bort restprodukterna. Eftersom vattenmolekyler dessutom hålls kvar i en tunn film på fönstret har smutsen svårare att fästa. Kanske är vi den sista fönsterputsande generationen, vars fönsterskrapor snart kommer att visas på museum bredvid smörkärnor och spinnrockar.