

Bengt Kasemo

Nanoteknik

Historik, drivkrafter, trender,
möjligheter och problem

Inledning

Många forskare tror att vi inom de närmaste 20 åren kommer att få uppleva snabb och samhällspåverkande utveckling inom tre ömsesidigt växelverkande områden: Det första, som vilar på kiseltekniken, är informationsteknologin. Den har redan slagit igenom i vår vardag. Bioteknik och molekylärbiologi är det andra området, vilket just är på väg att få sitt verkliga genomslag. Det tredje, som behandlas här, är *nanovetenskap och nanoteknologi* (N & N), som ibland kallas *atomslojd*. Dessa vetenskaps- och teknikområden utvecklas dels var för sig, men är också kopplade till och förstärker varandra. De kommer i framtiden att förändra både vår vardag och vårt arbetsliv och också skapa ett antal etiska utmaningar och frågeställningar kring säkerhet och risker.

Nanovetenskap och nanoteknik är ett av vetenskapssamhällets främsta s.k. "slagord" just nu, i klass med stamcellsteknik, genteknik, proteomik m.fl. Alla i-länder har N & N som högt prioriterade områden i sina forskningsstrategier. President Bill Clinton annonserade i januari 2000, sitt berömda "*National Nanotechnology Initiative: Leading to the Next Industrial Revolution*". Motsvarande satsningar har gjorts, eller görs, i Japan och de andra stora industriländerna. Även mindre länder av Sveriges storlek, t.ex. Holland, har uttalade forsknings- och utvecklingsstrategier inom området. Norge lanserade under hösten 2006 sin nationella nanostrategi (författaren av denna artikel hade förmånen att sitta ordförande i arbetsgruppen). Sverige saknar märkligt nog en explicit N & N-strategi. Det betyder dock inte att det saknas

forskning inom N & N i Sverige – den är tvärtom både omfattande och framstående, men är integrerad i ett antal forskningsprogram och projekt med andra titlar och huvudinriktningar. Om det senare är bra eller dåligt är svårt att avgöra – det får framtiden utvisa. En negativ effekt av denna ”integrerade strategi” är att säkerhets- och etiska aspekter har fått mindre uppmärksamhet i Sverige jämfört med de länder som har en nationell nanostrategi. För att förstå varför N & N har en sådan hausse just nu behöver vi titta i backspegeln och se efter vad drivkrafterna varit för dessa satsningar.

Parallellt med rent naturvetenskapliga och tekniska satsningar inom N & N, som görs med förhoppningen att de skall ge ekonomiskt och samhällsligt utbyte, har området även fått stor uppmärksamhet inom samhällsvetenskap och humaniora. Det senare är ett både intressant och märkligt fenomen, som framför allt initierades av Eric Drexlers bok¹ *Engines of creation: the coming era of nanotechnology*, och Michael Crichtons² *Prey*. Dessa science fiction-beskrivningar, baserade på N & N, skapade både debatt om och satte fantasin i rörelse beträffande vad N & N skulle kunna ge upphov till i framtiden. I den efterföljande debatten växte så småningom området *Nanoetik* fram som ett eget forskningsområde, med framträdande plats både i nationella N & N-strategier, i EU:s 5:e och 6:e ramprogram och i det nyligen startade 7:e ramprogrammet.

I denna artikel ger jag först en bakgrund till hur N & N växt fram och vilka drivkrafterna varit, samt exemplifierar kortfattat vad N & N är ur vetenskaplig synpunkt och beskriver några av deras tillämpningar. Därefter ger jag en kort orientering om några av de etiska aspekter och säkerhets- och riskaspekter som N & N associeras med.

Vad är nanovetenskap och nanoteknik?

Från radiorör till transistorer till datachip

Efter ett sommarjobb i slutet av 50-talet köpte jag min första egna radioapparat – en s.k. *transistorradio*. Den byggde på en banbrytande, nobelprisbelönad uppfinning drygt tio år tidigare vid Bell Telephone Laboratories, i Murray Hill strax utanför New York i USA. De radioapparater jag dittills hade sett hade ett antal radiorör (Fig. 1), som skötte om att radiovågor, som fångades upp av antennen, kunde förstärkas och omvandlas till ljud i högtalarna. Sådana radiorör var sinnrika små vakuummammare där elektroner användes för signalförstärkning och omvand-

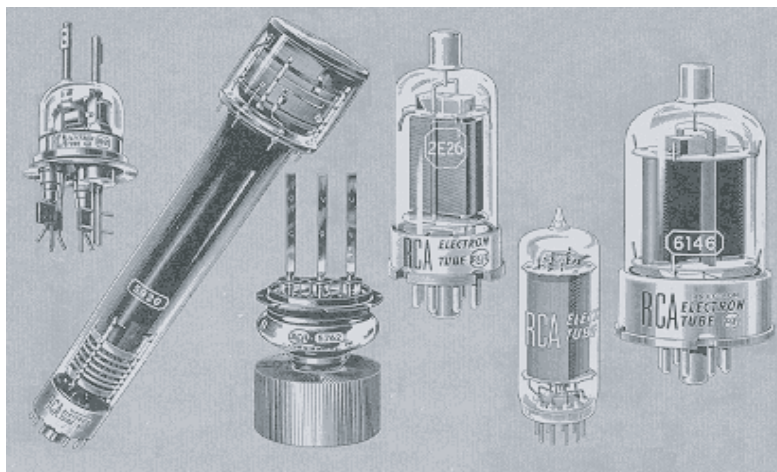


Fig. 1. Före mikroelektroniken (radiatorer).

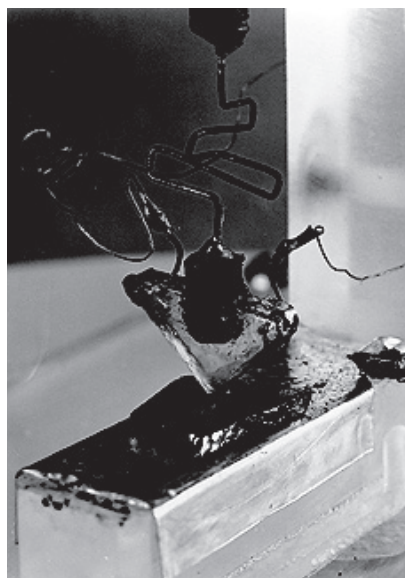


Fig. 2. Den första transistoren, ca 2 cm hög (december 1947).

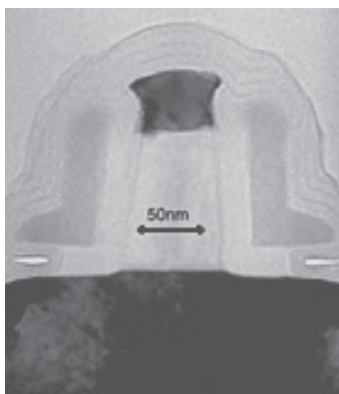


Fig. 3. Intels 90 nm-teknik bygger transistorer med endast 50 nm längd. Dessa CMOS-transistorer är i produktion sedan augusti 2002.

ling. De var minst några centimeter stora, ibland mer än en decimeter höga. De tog mycket plats och utnyttjade mycket energi.

I transistorradion ersattes radiorören av små sinnrikt konstruerade stycken av fast materia, i detta fall kisel. I dessa nobelprisbelönade transistorer gjorde elektronerna ett liknande jobb som i vakuumrören. De stora vinsterna var att transistorerna (Fig. 2) både var mycket mindre och snabbare än radiorören, och krävde mycket lägre energi för signalbehandling och förstärkning jämfört med radiorören, samt blev enormt mycket billigare att tillverka.

Under de närmast följande tio åren lärde man sig att göra många och allt mindre sådana transistorer på ytan av en enda kiselskiva. Den *plana kiselteknologin* och *integrerad kretsteknik* (också nobelprisbelönad, men långt senare) var födda. Nu kunde man göra både transistorer och andra elektriska komponenter, resistorer, dioder, kondensatorer osv. direkt på kiselytan. Man kunde också på ytan deponera de extremt tunna ledningar, av några tiondels millimeters till några mikrometers bredd, som behövdes för att sammanbinda olika komponenter till elektriska kretsar, för massiva och snabba beräkningar, minnesfunktioner och datalagring. Detta är essensen i mikroelektroniken, som idag revolutionerat vårt dagliga, privata och yrkesverksamma, liv i form av datorer, mobiltelefoner, industriella styrsystem och en flora av hemelektronik.

Medan de första diskreta transistorerna var åtskilliga millimeter i storlek är dagens allra minsta transistorer bara några tiondels mikrometer stora (Fig. 3). Det betyder att vi kan lägga mer än tusen transistorer i rad innan de fyller upp en längd av 1 mm eller 100-tals miljoner transistorer på en yta av ett frimärkes storlek. Det är denna ofattbara tätpackning av mikroelektronikkomponenter och deras snabbhet, som gör att våra små datachip kan klara av enorma mängder processsteg och beräkningar per sekund och lagra stora mängder data.

Nanoelektroniken föddes när mikroelektroniken verkade gå i väggen

Beräkningsförmågan och tätpackningen av komponenter har ständigt ökat i våra datachips över flera decennier, i en överraskande konstant takt, som ibland kallas Moores lag (Fig. 4). Personer med insikt i och ansvar för utvecklingen inom området har dock under ganska lång tid befarat och varnat för att dagens teknik kommer att ”gå

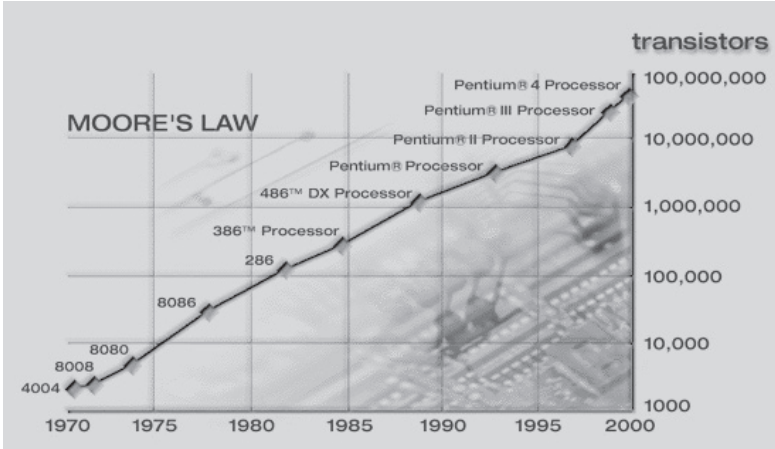


Fig. 4. Moores lag.

i väggen”, och att ökningstakten i prestanda därmed kommer att minska. Orsaken är att den utnyttjade tekniken har en inbyggd begränsning, som man befärdar gör det omöjligt att tillverka t.ex. transistorer, som är väsentligt mindre än ca en tiondels mikrometer (jag återkommer med exemplifiering av hur stor en mikrometer är). Så här långt har dock utvecklingsteknikerna och forskarna kontinuerligt överraskat med att pressa prestanda och storlekar bortom vad som ansågs möjligt för ett tiotal år sedan. Det finns ändå en begränsning, som dels har att göra med tillverkningstekniken, dels med att materialets egenskaper ändras när den består av tillräckligt få atomer. Den svåra frågan är om och när i framtiden denna begränsning inträffar, och i så fall vilken ny teknik som kommer att användas. Helt nyligen (jan. 2007) rapporterade Intel att man tagit steget från 90 nm teknik till 45 nm teknik, vilket betraktas som en oerhörd framgång, som än en gång gör att utvecklingen kommer att följa Moores lag flera år till.

Tänkarna hos forskare och tekniker har därför gått i nya riktningar. Kan och behöver vi finna nya vägar att göra transistorerna ännu mindre? Kan vi uppfinna elektroniska komponenter, som bygger på helt andra principer än dagens mikroelektronik, som tar mycket mindre plats, kräver mindre energi och samtidigt är minst lika bra på att utföra matematiska processer och lagra data som dagens mikrochip? På laboratorienivå finns t.ex. redan idag demonstrationer av s.k. en-

elektronkomponenter där en enda elektron står för en signal eller en ”minnesfunktion”, och dessa komponenter är nere på nivån 10 nm eller mindre.

Spin-off effekter från mikroelektroniken

Redan tidigt under mikroelektronikens utveckling insåg man att den mycket avancerade processteknik som används för att framställa data-chip kunde användas för helt andra ändamål. Ett exempel är tillverkning av mycket små *mikromekaniska* komponenter, t.ex. tunna membran, som fungerar som tryckkännare eller kuggjul, som kan användas i mikromaskiner, eller extremt tunna ”tungor” som böjs under inverkan av ett fåtal biomolekyler och kan användas som biosensorer. Ett annat exempel är extremt små kemiska reaktorer (nanoliter, picoliter eller ännu mindre volymer) eller separationskolonner som etsas fram i kisel med samma teknik, som används för transistorframställning. Ett tredje exempel är kemiska *sensorer*, som framställs på liknande sätt som mikroelektroniska chip och kan känna av olika kemiska ämnen, även i komplexa blandningar.

Exemplen kan mångfaldigas, och vi kan med gott fog tala om att mikroelektroniken har genererat en hel mängd ny *mikroteknologi* i sitt kölvatten, som revolutionerat möjligheterna till miniatyrisering och ökat funktionstätheten inom alla teknikområden. Vi kan alltså tala om ett helt nytt teknologiområde, mikroteknologin, där mikroelektroniken ingår som den viktigaste delmängden.

Successivt skedde sedan en övergång till ännu mindre s.k. nanokomponenter, vilket skapat ytterligare ett nytt vetenskaps- och teknikfält, som på grund av de små dimensionerna, där en nanometer är en lämplig längdenhet, kallas nanovetenskap och nanoteknik (*nano* kommer från grekiskans ord för dvärg).

Nanovetenskap och nanoteknik är långt ifrån bara elektronik

Den utveckling jag skissat ovan inom mikroelektroniken – alltså att den bedömdes vara på väg att ”gå i väggen” när det gäller ytterligare miniatyrisering – var en av de viktigaste drivkrafterna till att det vi idag kallar nanovetenskap och nanoteknik växte fram. Det var dock inte den enda. Utvecklingen drevs på av parallella utvecklingstrender inom några andra vetenskaps- och teknikområden.

Ett exempel är den oerhört snabba utvecklingen inom molekylärbiologin och biotekniken, som i "giftermålet" med N & N ledde fram till *nanobioteknologin*. Ett konkret exempel är medicinska implantat. För att implantatytan skall reagera optimalt mot vatten, proteiner och celler i den biovätska som möter implantatet när det opereras in, måste den ha en kombination av kemisk och topografisk ytmönstring, som passar biovätskans komponenter på både nano- och mikroskalan.

Ett annat exempel från det biomedicinska området är biosensorer och biochip. De bygger på principen att en "detektormolekyl", t.ex. en DNA-sträng eller en antikropp, placeras på en mikro- eller nanometer stor fläck på en yta, för att därigenom "känna igen" matchande molekyler i ett okänt prov. På ett biochip läggs många sådana fläckar ned i ett mönster, där varje fläck har sin specifika igenkänningsmolekyl. (I framtiden kommer kanske även hela celler, eller odlad vävnad, att användas som igenkänningselement.) Efter att det okända provet exponerats mot den diagnostiska ytan läses alla igenkänningshändelser av, t.ex. med ljus, eller också används elektrisk, magnetisk eller piezoelektrisk osv. avläsning. Antalet sådana sensorfläckar, som nanotekniken kan producera är oerhört stort. På en yta av ett frimärkes storlek kommer man, om det behövs, att kunna placera 10–100 miljontals sensorfläckar (jämför det talet med våra ca 30 000 gener). Denna enorma analytiska potential kan faktiskt skapa ett etiskt problem: hur hanterar man den enorma mängd information om en patients hälsostatus och hälsoprognos, som kan erhållas om man i detalj kan kartlägga både genuttryck och proteinsignatur hos en person i ett enda test? Vill doktorn veta så mycket? Vill patienten? Vill vårdsystemet? Vad händer om den analytiska och diagnostiska kapaciteten långt överstiger behandlingsmöjligheterna?

Ett kanske mindre laddat, men inte mindre viktigt, område är materialvetenskapen. Den har genom en kombination av teoretiska beräkningar, avancerad materialsyntes på atomär nivå och nya metoder för materialanalys och materialsyntes med atomär precision, lett till nya material och materialkombinationer med helt nya prestanda, t.ex. mycket starkare och lättare material jämfört med traditionella material. Så kallade kolnanofibrer väntas ge helt nya material med överlägsna elektriska och mekaniska prestanda. Inom energitekniken kan nya lösningar för infångning av solenergi, solceller, erbjudas. Inom industriell produktion kommer nya katalysatorer för effektiv produk-

tion av kemiska produkter och livsmedel, och sensorer för effektiv processstyrning, som både kan bidra till lägre energiåtgång och mindre mängder skadliga utsläpp.

Miniatyriseringsprånget

Denna utveckling gör att vi just nu står inför ytterligare ett miniatyriseringsprång, som troligen får minst lika dramatiska effekter som kiselmikroelektroniken haft på ekonomi, samhälle och privatliv. Det är föreningen om detta intåg i det lillas värld, och den därtill kopplade vetenskaps- och teknikutvecklingen, som gett upphov till det slagord som idag upprepas världen över och som kallas nanovetenskap och nanoteknik.

Den ligger bakom det gigantiska nya forskningsprogram som nämndes inledningsvis, och som president Clinton presenterade år 2000. Programmet innebar en satsning om 450 miljoner dollar enbart för det första året och satsningen har växt sedan dess, bl.a. pådriven av de massiva satsningarna på metoder att spåra och avvärja terrorhot efter 11 september-attackerna. EU har i sitt sjunde ramprogram ytterligare accentuerat satsningen på nanoteknik. Det finns knappast något naturvetenskaps- eller teknikområde som inte berörs av satsningen, och den kommer därmed med stor sannolikhet att i framtiden påverka den industriella och ekonomiska utvecklingen.

Nanovetenskap och nanoteknik nämns ofta tillsammans. De har något olika innehåll och betydelse men gränsen är diffus. *Nanovetenskap* är en sammansmältning av olika forskningsdiscipliner med den gemensamma nämnaren att hantera aggregat av atomer och molekyler i storleksområdet ca 1–100 nanometer. Nanovetenskapen omfattar grundläggande studier av egenskaper och processer på denna längdskala, hos oorganiska, organiska och biologiska material och komponenter. Gränsdragningen mot t.ex. molekylärbiologin är ofta diffus, men i de flesta fall innehåller nanovetenskapen någon komponent av syntetiskt (nanofabricerat) material. Det går inte att exakt bestämma var gränser går mellan nano och mikro. En viktig faktor är var den krympande längdskalan ger upphov till distinkt nya fenomen, som inte observeras för makroskopiska material och prover. Några av de viktigaste naturvetenskapliga områden där nanovetenskapen kommer till användning är mikroelektronik, materialvetenskap, ytor, oorganisk och organisk kemi, polymerkemi, biokemi och molekylärbiologi,

optik och laserteknologi och tillverkning av vetenskapliga instrument. *Nanoteknik* är den teknologi som utnyttjar framstegen i nanovetenskap och syftar mot att bygga komponenter, produkter och system med nya och bättre prestanda än deras konventionella motsvarigheter. Nanotekniken är en s.k. ”enabling technology” som berör alla teknikområden på sikt.

Hur stora är nanokomponenterna?

När man försöker definiera en storleksskala för nanovetenskap och nanoteknik, så brukar man komma fram till att N & N handlar om speciella funktionella strukturer i storleksintervallet 1–100 eller några hundra nanometer. En nanometer betyder en miljarddels meter, dvs. en miljondels millimeter. Fig. 5 visar hur man vanligen definierar N & N, och visar några exempel på strukturer av olika storlekar.

För att vi skall få en grov uppfattning om nanoteknikens storleksintervall använder jag dels en millimeter, dels diametern hos en väteatom som jämförelsemått. Väteatomen är tio miljoner gånger mindre än en millimeter. Storleken 100 nm, som ofta anges som den ungefärliga övre gränsen för N & N (Fig. 5), är den längd vi får om vi skivar upp en millimeter i tiotusen delar. Den minsta transistorn, som jag nämnde tidigare, är något större än en sådan skiva och motsvarar ungefär en hundradel av ett hårstrås tjocklek. Den undre gränsen, som jag angav till 1 nm, är i sin tur en hundradel så lång och alltså mycket, mycket liten. Det är här vi behöver väteatomen som måttstock. 1 nm är den längd vi får om vi lägger tio väteatomer på rad och 100 nm är således tusen väteatomer i rad.

Vi har alltså nu ringat in vår nanoteknik storleksmässigt till att ungefärligen röra sig om strukturer med dimensioner från ett tiotal atomer långa (1 nm) till en hundradel av ett hårstrås tjocklek (100 nm). Proteinerna i vår kropp, eller äggviteämnen som vi kallar dem i dagligt tal, är ett perfekt exempel på strukturer som ligger inom detta område; de minsta proteinerna är ca 1 nm och de största ca 100 nm. Ett annat exempel är det cellmembran, som omger varje levande cell, och som bara är 5–10 nm tjockt. Trots sin tunna vägg reglerar cellmembranet all trafik mellan cellens inre och yttre, och därmed hela livsprocessen. Cellen själv är dock mycket större, ca 10 µm eller omkring hundra gånger större än den gräns vi definierat för N & N-området. Funktionerna hos cellen styrs av proteiner, DNA, cellmem-

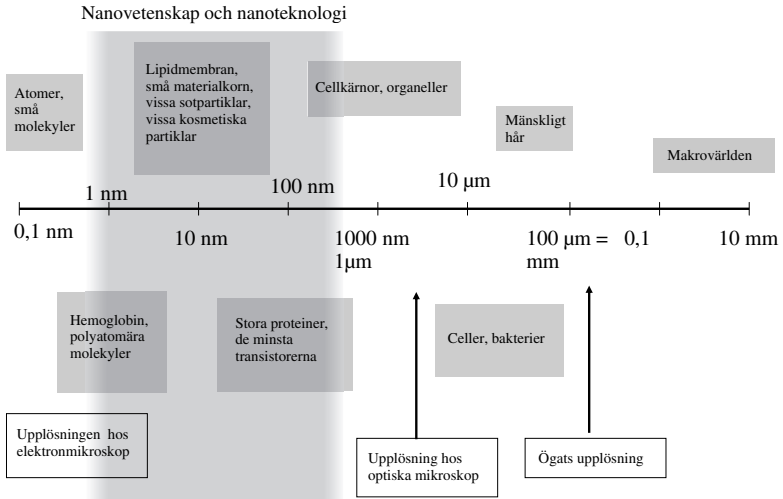


Fig. 5. Nanovetenskapens storleksskala.

brant osv., som alla ligger i det område som definieras som nanoteknik. I nanobioteknik innefattas bl.a. det delområde av nanotekniken som kombinerar biologiska substanser inom nanoteknologins storleksintervall med icke-biologiska komponenter i samma storleksområde. Dit räknas också nanoteknikkomponenter som används för att påverka (t.ex. celldifferentiering) eller avläsa (t.ex. biosensorer) egenskaper och processer hos biologiska system.

När kommer N & N att märkbart påverka hela samhället?

N & N har redan mycket stor omfattning som forskningsområde inom den akademiska världen och som tillämpningsområde inom mikroelektroniken, och är idag ett av de centrala forskningsfälten inom naturvetenskap och teknik. De är fullkomligt disciplinöverskridande. Det går knappast att identifiera något naturvetenskapligt, medicinskt eller tekniskt område som inte berörs. För näringslivet och samhället i övrigt är dock nanotekniken fortfarande i sin linda. Det är under de kommande 10–30 åren som vi successivt kan förvänta oss nya applikationer av N & N, inom materialteknik, miljöteknik, energiteknik, hem- och hushållsutrustningar och många andra områden.

Utvecklingen följer med all sannolikhet en liknande utveckling, som vi sett inom många tidigare teknikområden (Fig. 6), t.ex. radio- och telekommunikation i början av förra seklet, polymer/plastteknologin i mitten av förra seklet och mikroelektroniken och lasertekniken, i dess andra hälft. I första fasen ligger fokus på forskning kring och utveckling av metoder (preparativa och analytiska), vilket är nödvändigt för att utveckla en ”verktygslåda”, som kan hantera den nya tekniken på ett reproducerbart och kvalitetssäkrat sätt. Därefter kommer enkla komponenter och processer, vilka successivt utvecklas till allt mer avancerade och komplexa system, efterhand som tekniken mognar. Av allt att döma kommer nanotekniken att följa en liknande utveckling och är i den meningen mera en evolution än en revolution. Initialt handlar det alltså främst om att utveckla instrument och metoder att framställa enstaka nanokomponenter för forskningssyfte, för att förstå och kartlägga fenomen och egenskaper. Först senare kommer verkliga produkter och processer på bred front, som påtagligt märks i ekonomin och samhällsutvecklingen i sin helhet. Det enda riktigt stora undantaget är inom mikroelektroniken där de minsta komponenterna i kommersiella produkter (datorchips) redan nått under 100 nm-skalan. Denna bild av utvecklingen betyder naturligtvis inte att det inte dyker upp enstaka nya produkter och nischområden baserade på nanoteknik även i närtid. Men den breda användningen av nanotekniken i hela samhället kommer att ta längre tid, troligen ytterligare 10–20 år.

Etiska aspekter och säkerhet

Den nanoetiska debatt som N & N initierat, och som lett till omfattande forskningssatsningar kring nanoetik i t.ex. EU:s ramprogram, bygger dels på de böcker^{1,2} som nämndes inledningsvis, men också på en fundamental osäkerhet kring vad nanotekniken är, och vad den kommer att producera i framtiden. Själva litenheten hos nanokomponenterna är i sig självt ett bränsle i diskussionen om nanoetik. Om man inte med lätthet kan se eller på annat sätt spåra de komponenter som skapas med tekniken, hur kan man då skydda sig? Hur kan man förhindra och kontrollera otillbörlig användning av dem, även om det finns lagstiftning? Och så vidare. Spårbarhet, eller snarare bristen på spårbarhet, är ett ständigt återkommande ämne i debatten om etik, risker och säkerhet. Ett annat återkommande ämne är övervak-

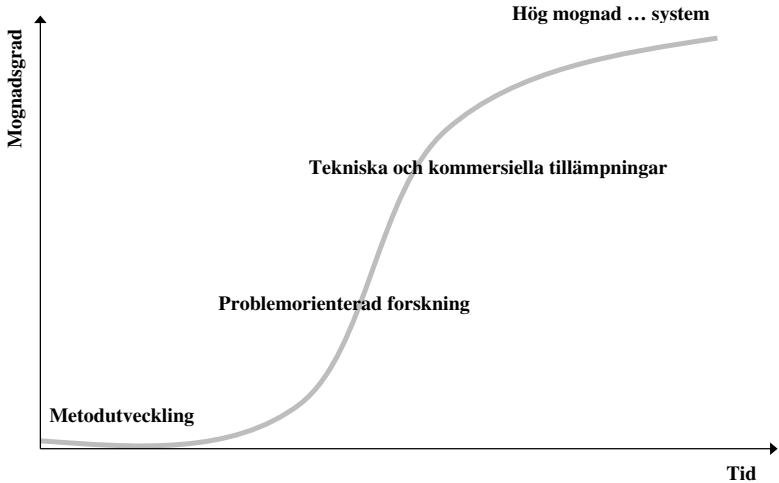


Fig. 6. Nanovetenskapens och nanoteknologins utvecklingsfaser.

ning – hur nanotekniken kan användas i övervakningssyfte, där individen eller gruppen är ovetande om övervakningen och oförmögen att ta reda på om hon/de är övervakad(e) eller inte.

Det kommer idag en kontinuerlig ström av rapporter kring möjliga biologiska effekter av nanopartiklar. Några axplock: Inom EU:s 5:e ramprogram fanns ett projekt⁵ kallat Nano-Pathology med ett anslag om 1 M€. Som huvudmål angavs vid programstart bl.a. att utveckla diagnostiska metoder för identifiering av nanopartiklar, att studera patologiska mekanismer, samt att identifiera patologiska risker med olika material. I en artikel i *Neue Zürcher Zeitung*⁷ 2003 nämns att försäkringsbolagen börjar bekymra sig om vilka skador nanopartiklar och N & N-produkter eventuellt kan orsaka. I ett dokument från EU-kommissionen⁵ 2004 finns en lång rad exempel på pågående eller genomförda studier. Dessa behandlar t.ex. eventuella patologiska effekter av partiklar i solkräm, effekt av nanofibrer i lungor, nanofibrers och nanopartiklars möjlighet att passera blod-hjärnbarriären m.fl. Ett populärt studieobjekt är kolnanofibrer, som i vissa rapporter påvisats kunna passera just blod-hjärnbarriären. Rapporterna handlar mest om *var* man kan finna nanopartiklarna. *Effekterna* av deras närvaro i olika vävnader är fortfarande knapphändig kända, med undantag för sådana partiklar som funnits i vår omgivning under lång tid, t.ex. sotpartiklar från dåligt renade dieselmotorer och kiseloxidpartiklar (silikos).

Nanoetik och nanosäkerhet har debatterats i en lång rad skrifter (se t.ex. referenserna 3–5 och deras vidare diskurs). När det gäller t.ex. Drexlers nanorobotar, som fantasieggande skulle kunna styras i våra blodbanor och kanske påverka vår hjärnaktivitet, så är de flesta seriösa forskare eniga om att detta är ren science fiction, och ser ingen möjlighet att bygga sådana komponenter med någon känd teknik. Om vi däremot tar elektroniska fotbojor som inte syns, kanske förs in under huden, och som man ovetande bär med sig⁶, så kan de inte uteslutas.

Risker i arbetsmiljöer där nanokomponenter kommer att tillverkas är en realitet och förtjänar uppmärksamhet. Ett annat framtida problem, eller snarare utmaning, är de avfallsprodukter, ”nanosopor”, som kommer att följa i nanoteknikens spår. Hur skall återvinning eller destruktion ske?

Generellt sett är min uppfattning att nanotekniken inte har vare sig starkare eller svagare etisk dimension än de flesta av de framväxande teknikområden, som vi exponerats för de senaste två hundra åren – förbränningsmotorer, el- och kraftteknik, telefoni, mikroelektronik, laserteknik, oljeraffinering, fordonsteknik, plastteknik osv. Precis som med dessa områden kommer vi att upptäcka avigsidor med nanotekniken som måste hanteras. Det finns inte samma starka etiska laddning som i t.ex. gentekniken eller stamcellstekniken. Nanoteknikens etiska dimension är mera ”business as usual”: Det gäller att hantera och balansera teknikens för- och nackdelar och säkerhetsproblem. Det främsta undantaget är spårbarheten – svårigheten att hitta och identifiera nanopartiklar och nanokomponenter.

En intressant och speciell aspekt är att nanotekniken kommit att få en etisk dimension, som förstärkts genom association. Jag syftar här på nanoteknikens inneboende potential att bidra till utveckling av andra framväxande medicin-, teknik- och vetenskapsområden, t.ex. stamcellsterapi, nya nanoläkemedel eller en massiv medicinsk diagnostisk kapacitet baserad på molekylärbiologins landvinningar. Detta har gjort att nanotekniken kommit att associeras med t.ex. genteknikens och stamcellsteknikens etiska problematik.

I den nanoetiska debatten sker alldeles för ofta en sammanblandning av etiska frågor och säkerhetsfrågor, vilket medvetet eller omedvetet används för att förstärka den etiska dimensionen i nanotekniken. Visserligen är de två frågorna mer eller mindre kopplade, men när det gäller t.ex. toxikologin hos nanopartiklar, så skiljer sig fråge-

ställningarna inte väsentligt från motsvarande frågor beträffande kemiska ämnen som dioxiner, DDT, kvicksilver, kemiska substanser i livsmedel osv. De senare ser vi inte primärt som etiska problem, utan som säkerhetsproblem, som bör hanteras av olika myndigheter, t.ex. Kemikalieinspektionen och Livsmedelsverket. På samma sätt handlar flertalet av säkerhets- och toxikologifrågorna inom nanoteknologin huvudsakligen om hur farliga material kan vara för hälsan och miljön, när de tas fram i nanopartikelform och kan hamna i kroppen genom inandning, via huden eller via munnen. Vilka är t.ex. hälsoeffekterna av att andas in helt vanliga material, som normalt betraktas som ofarliga, när de uppträder i form av nanopartiklar, vilka lätt penetrerar huden och sedan genom cellmembraner osv.? Det är i detta sammanhang värt att notera att många av de kemiska substanser, som vi testar idag i livsmedel och miljön, består av molekyler, som är mindre än eller lika stora som de minsta nanopartiklarna och nanoteknologiska komponenterna. Här finns en stor utmaning för de tillsynsmyndigheter som har ansvaret.

När det gäller nanopartikeltoxikologi och säkerhet återstår det allra mesta att göra. Visserligen vet vi att vi dagligen och under lång tid utsatts för nanopartiklar, som finns naturligt i vår omgivning och även i form av kosmetiska produkter, solskyddskrämer etc. Men också nya material, som vi aldrig exponerats för, kommer successivt att framställas i nanopartikelformer. Det finns farhågor att det kan uppstå en liknande situation med nanopartiklar, som den som inträffade med asbestpartiklar. Vi vet ytterst lite om vad nanopartiklar av olika storlekar och material kan åstadkomma i kroppen. Asbestpartiklar är mycket längre, ca 10 μm , än den storlek vi associerar med nanoteknik, medan deras tjocklek hamnar precis på gränsen till nanopartikelområdet. Nanopartiklar i området 1–100 nm är, som nämnts ovan, i stort sett utforskade vad gäller toxikologin för de allra flesta material. Det handlar här om hårt metodiskt skyddsarbete och att verkligen i tid initiera detta arbete, så att vi lär oss eventuella risker innan massiv exponering sker.

Budskapet till forskarvärlden, och berörda tillsynsmyndigheter, är därmed att ta den oro som skapats med nanotekniken, på fullaste allvar. Vi måste försöka kommunicera de möjliga för- och nackdelar vi kan se med N & N-produkter och försöka förklara var gränsen går mellan det, som bedöms möjligt att göra redan idag eller inom överskådlig framtid, och ren science fiction. Den kommunikationen måste ske

i realtid, dvs. redan innan man är säker på för- och nackdelar med en viss produkt eller process.

En framåtblick

Vad har N & N åstadkommit om tjugo år? Det är naturligtvis omöjligt att med någon som helst precision och ens kvalitativt sia om vart nanotekniken har fört oss då. Man kan dock se ett antal mycket spännande utvecklingsriktningar. Nanoelektroniken är troligen en realitet åtminstone i ett antal specialtillämpningar, men kanske även på bred front. Risken eller snarare möjligheten att den konventionella kiselteknologin fortfarande är konkurrenskraftig inom IT-området är dock stor. Det är kanske större chans att nya material, nanobioteknik, energiteknik och industriella processer kommer att förändras markant med nanotekniken. På ännu längre sikt är bioelektroniken, där man utnyttjar levande celler eller biomolekyler förmåga att ta emot, behandla och lagra information en spännande möjlighet. För att realisera den krävs mycket avancerad nanoteknologi och nanobiologi.

Ytterligare ett område, som f.n. är hett, är s.k. nanoläkemedel, vilket betyder nanopartiklar som är "målsökande" bärare av läkemedel (Fig. 7). Den grundläggande idén är att designa nanopartiklar, som innehåller en aktiv läkemedelssubstans. Partiklarna har dels ett skyddsskikt, som förhindrar att partiklarna bryts ner överallt i kroppen, dels "målsökande" molekyler i sitt skyddsskal, som gör att nanopartiklarna frisätter läkemedlet när de når sådana celler, som känner igen de målsökande molekylerna. Det finns också varianter där man tänker sig att aktivt öppna partiklarna när de nått målområdet med hjälp av yttre magnetfält (magnetiska partiklar) eller laserljus. Om dessa applikationer lyckas kan de innebära att läkemedelsbehandling av t.ex. tumörer med kemoterapi får både högre effekt och lägre biverkningar.

Förutsägelsen att medicinsk och biologisk diagnostik kommer att revolutioneras genom en kombination av nano-biochip och avancerad enmolekylsdiagnostik, så som jag skissade ovan, är ganska säkert. Snabbheten och precisionen kommer att vara oerhört överlägsen dagens teknik, framförallt genom en kombination av molekyllärobiologins framsteg och nanoteknikens. Här är frågan *hur snabbt* snarare än *om* denna utveckling kommer att ske. Utvecklingen när det gäller sensorer och diagnosystem är för övrigt inte begränsad till diagnostiska

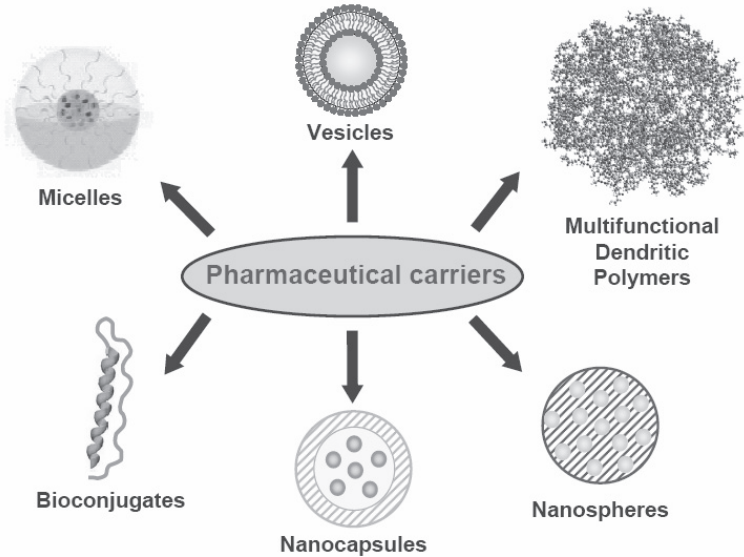


Fig. 7. Nanopartiklar som möjliga bärare av farmaceutiska tillämpningar. Från EU proposal NanoBioPharmaceutics (IP 026723-2, Call identifier FP6-2004-NMP-NI-4).

system för biomedicin. Samma principer och teknik är direkt applicerbara för andra diagnostiska system, t.ex. för miljöövervakning och industriell processtyrning.

Utvecklingen av nya och förbättrade medicinska implantat tack vare både nanostrukturerade ytor och bättre kontroll över biologin är också en ganska säker förutsägelse, men implantaten kommer på sikt att få konkurrens från vävnadsodlade ersättningar av försämrade eller förlorade kroppsfunktioner (s.k. tissue engineering). Stamceller, som styrs med nanostrukturerade ytor till önskade vävnader, är visserligen ännu långt ifrån att realiseras, men ingen omöjlighet. Sådana ytor kan också komma att användas för att styra cell- och vävnadstillväxt utanför kroppen, som sedan används för medicinsk diagnostik och tidig utprovning av läkemedelskandidater.

Ett helt annat område, som jag tror och hoppas har avancerat genom nanoteknikens utveckling på 10–20 års sikt, är uthålliga energisystem. De alltmer alarmerande rapporter vi får om sannolik växthuseffekt och klimatförändringar, riktar fokus på energisystemet och utsläppen av koldioxid och andra växthusgaser. Detta kombinerat med de ändliga

resurserna av fossila bränslen (olja, naturgas, kol) gör utvecklingen av hållbara och rena energisystem oerhört angelägen. Nanotekniken kan bidra på en lång rad områden i ett långsiktigt perspektiv. Solceller och bränsleceller kommer att ha stor nytta av de nanostrukturer som kan framställas. I bränslecellerna handlar det om att förbättra bränslelelektrodernas stabilitet och effektivitet. I solcellerna gäller det att förbättra effektiviteten i omvandlingen av ljus till elektrisk ström eller ljus till kemisk energi, t.ex. väteproduktion. Det finns spännande möjligheter – och sådan forskning pågår – att bygga ihop biologiska och nanotekniska system som härmar fotosyntesen i de gröna växterna för att efterlikna deras processer och utveckla metoder att sönderdela vatten till vätgas och syrgas. Det kan vara en av lösningarna som bidrar till ett framtida uthålligt energisystem. Nanotekniken kommer även in som nyckelteknologi i vätelagringsystem (metallhydrid m.fl.), i batteriteknik och för energieffektivisering av industriella processer.

Oavsett vilka områden som kommer att påverkas mest av N & N, så är det en ganska säker förutsägelse att de radikalt kommer att påverka vårt samhälle, vardagsliv, arbete, företagande och ekonomi om 10–20 år.

Referenser

- 1 K. Eric Drexler, *Engines of creation: the coming era of nanotechnology*. New York: Anchor Books 1986.
- 2 Michael Crichton, *Prey*. New York: HarperCollins 2002.
- 3 A. Huw Arnall, *Future technologies, Today's choices. A report for the Greenpeace Environmental Trust*. London: Greenpeace environmental trust 2003.
- 4 G. Gaskell, T. Ten Eyck, J. Jackson & G. Veltri, "Imagining nanotechnology: cultural support for technological innovation in Europe and the United States". *Public Understanding of Science*, Vol. 14, No. 1, 81–90 (2005)
- 5 EU Commission; *Towards a European strategy for nanotechnology*, COM (2004) 338, Bryssel 12 maj 2004
- 6 G. Herméren, Lunds universitet (privat diskussion).
- 7 Annabelle Hett & Rolf Tanner: Kleine Dinge – grosse Wirkung? Die Nanotechnologie aus der Sicht der Versicherung. *Neue Zürcher Zeitung*, Nr 226 (September 30) 2003, s. 15.