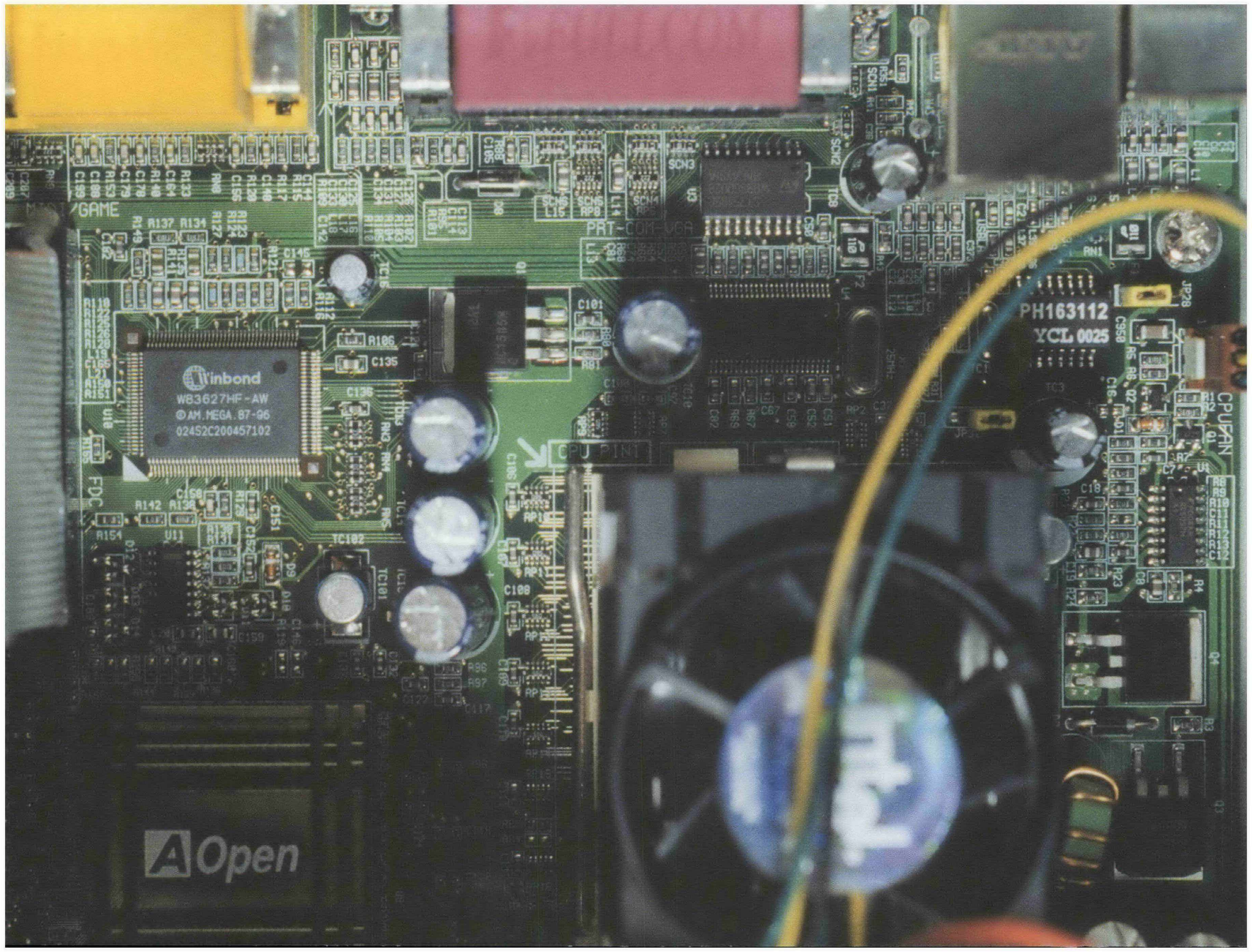

GAME
PRT-COM-VGA
Winbond
W83627HF-AW
©AM.MEGA.87-96
024S2C200457102
FDC
CPU PINT
CPUFAN
PH163112
YCL 0025
AOpen

LENNART JOHNSSON

Datortekniken

En ingenjörsmässig och humanistisk bedrift

Dator- och kommunikationsteknik har genomgått en i verklig mening fantastisk utveckling under den senaste femtio åren. Under senare år har områdena allt mer flätats samman. Datorerna har blivit en integrerad del av kommunikationssystemen genom att koncept och utrustning för datorkommunikation förändrat sätten att ge struktur åt och operativt driva dessa system. Trots att kapaciteten hos datorer har förbättrats exponentiellt alltsedan den integrerade kretsen uppfanns för omkring 40 år sedan så dröjde det till laserteknologin blev kommersiellt användbar i kombination med fiberoptik innan långdistanskommunikation började utvecklas i samma takt. Lasern uppfanns 1960. Lokala nätverk för kommunikation mellan datorer började utvecklas exponentiellt omkring 10 – 15 år efter det datorutvecklingen började, men 5 – 10 år före det att långdistanskommunikationen fick samma utvecklingstakt.

Resultatet av dessa i sanning remarkabla utvecklingslinjer har gjort datorer och telekommunikation till något som varje person i de industrialiserade länderna har råd med och så vanligt förekommande att vi är beroende av datorsystem i det dagliga livet. Datorer är inte längre bara använda av en liten grupp forskare och ingenjörer. Internet, som utvecklats av dessa grupper, har gjort information tillgänglig för vem som helst, var som helst och när som helst. Det har förändrat vårt sätt att tänka om och använda datorer på ett dramatiskt sätt. Det är som Gilder Technology Report ob-

På insidan av datorn.
FOTO TRULS NORD, TEKNISKA MUSEET

serverade i juni 2000: "När nätet är lika snabbt som datorernas interna länkar delas maskinen upp och sprids över nätet." Nätverk för beräkningar och dataöverföring växer fram som virtuella beräknings- och informationsmiljöer som utvidgas över hela jorden.

Fig 2. (Motstående sida) En av de första elektroniska datorerna ENIAC – Electronic Numeric Integrator and Computer – konstruerades av Echert och Mauchly i USA i början av 1940-talet.
FOTO SMITHSONIAN INSTITUTION

Den tidigaste utvecklingen

Människan har i alla tider, så länge vi känner till, insett värdet av att lagra, kommunicera och bearbeta information. Förmågan att göra detta har format våra liv och samhällen. Regeringar, handeln och, kanske mest uttalat, vetenskapen utvecklade tidigt ett behov av att kalkylera för att få fram tabeller som hjälp vid navigation och för astronomiska observationer. Idén att maskiner skulle kunna utföra de arbetskrävande, tråkiga och felkänsliga beräkningarna utgjorde en lockelse för matematiker och forskare för flera hundra år sedan och har resulterat i många konstruktioner och åtskilliga maskiner under gångna sekler.

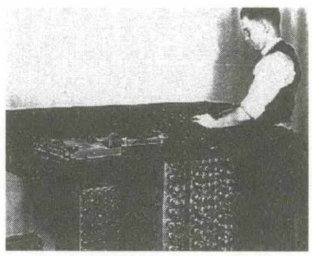
Idag är vetenskapliga upptäckter inom snart sagt varje disciplin beroende av datorer, modeller och simuleringar, datoranalyser, datorstyrda instrument och kommunikation mellan datorer, mellan människa och dator och mellan människor som har stöd av datorer. Vetenskapliga framsteg har gjort det möjligt att lagra, återvinna och bearbeta ständigt mer information vilket har bidragit till att öka insikter som fordrats för att göra nya framsteg.

Fram till en bit in på 1900-talet var beräkningskonsten hänvisad till mekaniska konstruktioner. Men redan på 1600-talet gjorde Pascal försök, även om det var arbeten av Charles Babbage i mitten av 1800-talet som medförde de största framstegen.[1]

Elektronikens entré

När elektronröret uppfunnits och blivit kommersiellt tillgängligt kunde helt elektroniska datorer konstrueras och baseras på elektroniska kretsar för såväl logiska operationer som datalagring. Atanasoff och hans kollega Berry uppfann den första digitala elektroniska datorn, ABC (Atanasoff-Berry-Computer), fig 1. Den byggdes 1937–42 och hade ett trumminne med 30 binära tal på 50 bitar var, en 60 Hz klocka[2] och var ganska långsam.

Fig 1. ABC-datorn.



ENIAC (Electronic Numerical Integrator and Computer), fig 2, byggdes 1943–46 vid Moore School of Electrical Engineering vid universitetet i Pennsylvania.[3] Den hade 10-siffrig decimal aritme-

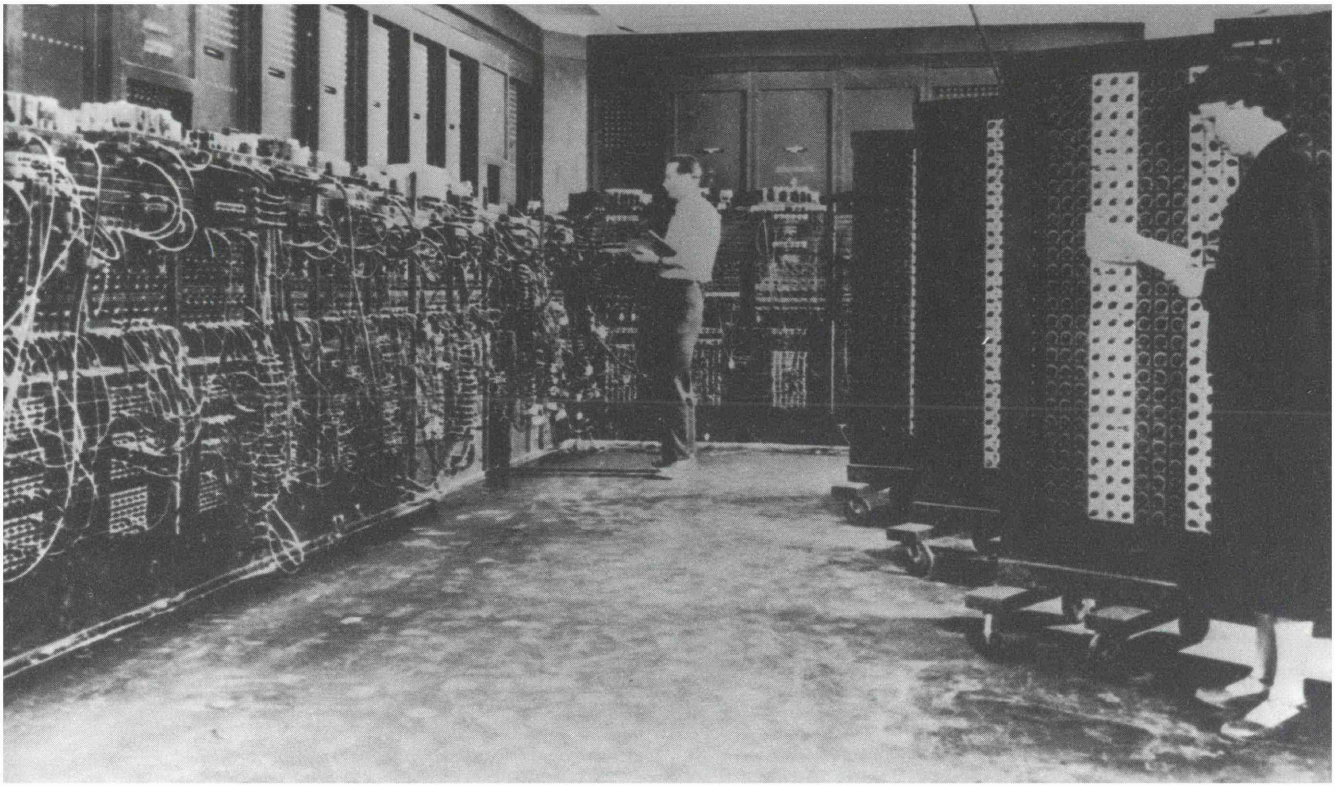
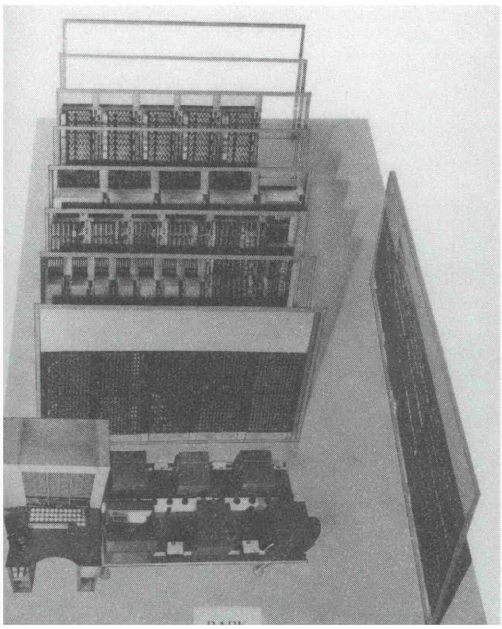


Fig 3. De tidiga svenska datamaskinerna BARK, bildmontage av ett femtiotal bilder (tv) och BESK (th).
FOTO MATEMATIKMASKINNÄMNDEN

tik, med möjlighet att hantera 20-siffriga decimala tal. Snabbheten motsvarade 100 000 pulser per sekund. ENIAC hade 18 000 elektronrör, 70 000 resistanser, 10 000 kondensatorer, 1 500 reläer och 6 000 manuella brytare. Den krävde en eleffekt på 140 kW, upptog 600 kvadratmeter och vägde omkring 30 ton.

Betydelsefulla utvecklingsinsatser för datamaskiner gjordes på den tiden också i Sverige, fig 3. BARK (Binär Automatisk Relä Kalkylator) konstrue-





rades kring det binära talsystemet och använde 5 000 reläer. BARK följdes 1953 av en elektronisk dator, BESK (Binär Elektronisk Sekvens Kalkylator), med 2 400 elektronrör och 400 germaniumdioder, och krävde 15 kW.[4]

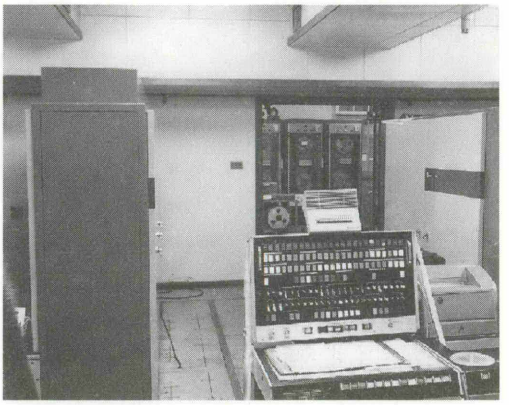


Fig 4. Altasdatorn 1968.

Det var en utmaning att finna lämpliga teknologier för dynamiska och statiska minnen. ENIAC använde elektronrör för dynamiska minnen och brytare för statiska, men ingendera var riktigt lämpliga. BESK använde magnetiska minnen som långsamma minnen och katodstrålerör för snabba. Von Neumann, som var konsult till ENIAC-gruppen och hade lärt sig hur minnen med akustiska fördröjningslinjer användes i radarsystem under andra världskriget, föreslog sådana för EDVAC (Electronic Discrete Variable Automatic Computer). Den hade en klocka med 1MHz i stället för ENIACs 100 kHz och ansågs därför snabb nog för att det skulle räcka med serieoperationer.

Programmeringsspråket som von Neumann föreslog för EDVAC innehöll det revolutionerande greppet med självmodifierande program: adresseringarna för operationerna kunde justeras av programmet självt. Virtuella adresser användes och programmet beräknade och ersatte specifika adresser med virtuella adresser. Von Neumann insåg också behovet av cacheminne[5] när han skrev program för att utvärdera EDVAC-designen.

Vid Institute for Advanced Study (IAS) i Princeton konstruerades en dator baserad på ENIAC och EDVAC. Den hade i grunden samma arkitektur som dagens datorer. Den togs i drift 1952. Maskinen kunde addera tal på 15 mikrosekunder, multiplicera på 400 mikrosekunder och dividera på 1 millisekund. Maskinen upptog 13 kvadratmeter, jämfört med ENIACs omkring 600.

De ovan nämnda maskinerna är på inget sätt en komplett lista på intressanta datorprojekt, men de är några av dem som kom att påverka utvecklingen mest genom att de tillämpande innovationer i datorarkitektur som man fortfarande ser i moderna datorer. IBMs modeller 701, 704, 7090 och STRETCH är andra innovativa maskiner som är värda att nämna.

Uppläggningen av ATLAS-datorn, fig 4, gjordes 1956 och den färdigställdes 1961 under ledning av T Kilburn och introducerade virtuellt minne för en lagringshierarki som bestod av 16k ords kärnminne, ett 96k ords trumminne och åtta däck med magnetband som innehöll upp till en miljon ord med kapacitet att leverera ett ord var 88 millisekund. Den ansågs vara den mest kraftfulla datorn i världen. Systemrutinerna och några ofta

använda biblioteksrutiner hölls i ett 8k endast läsbart minne med en accesstid på 0,3 millisekunder. Trettiotvå sidors adressregister bildade ett associativt minne för att omvandla virtuella till verkliga adresser.

Ett "truminlärningsprogram" som placerades i ett endast läsbart minne försökte optimera siduppdelning genom att ackumulera statistik kring användningen av sidor. Detta lärande program var den första tillämpningen för artificiell intelligens på en vanlig dator. ATLAS hade ett operativsystem från 1964 och kunde programmeras i Fortran och Algol.

Mot slutet av 1950-talet ersattes elektronrören av transistorer i de logiska kretsarna och magnetkärnminnen blev den dominerande tekniken och gav upphov till uttrycket "kärndump" vid fel eller felsökning. Med uppfinningen av den integrerade kretsen kunde äntligen samma teknik användas för alla huvudfunktionerna i datorsystemet: logik, minne och interna länkar.

Under de tre senaste decennierna har den exponentiella förbättringen av prestanda hos halvledarelektroniken blivit den viktigaste drivkraften för den anmärkningsvärda tillväxten och spridningen av datorer och datoranvändning. Produkter baserade på integrerade kretsar har förändrat både näringslivet och den offentliga sektorn. Under de första tio åren växte den till en marknadsomsättning på 100 miljarder dollar per år. Idag är omsättningen i storleksordningen biljoner (miljoner miljoner) dollar varje år. Halvledarlaser i kombination med den snabba utvecklingen av fiberoptik och datorkommunikation har omformat kommunikationsindustrin och skapat Internet, vilket under sina första fem år etablerade ett affärssegment värt över 800 miljarder dollar år 2000 och sysselsätter över tre miljoner människor enbart i USA.

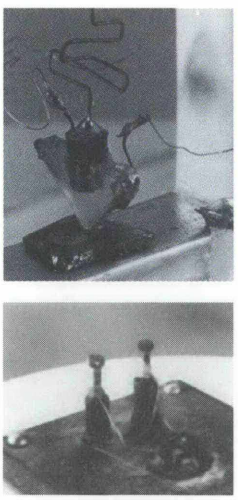


Fig 5. Spetstransistor från 1947 (övre bilden) och skikttransistor från 1951 (undre bilden).
FOTO TELEMUSEUM (ÖVRE BILDEN)

Datorteknologin

Under åren 1947 – 1951 upptäckte och demonstrerade Bardeen, Brattain och Shockley den första transistorn. Spetstransistorn uppfanns 1947 och skikttransistorn demonstrerades 1951, fig 5. Kommersiellt tillverkade transistorer blev tillgängliga 1954. Jack Kilby vid Texas Instruments demonstrerade 1958 den första integrerade kretsen och Robert Noyce vid Fairchild utvecklade oberoende av Kilby en integrerad krets som demonstrerades 1959, fig 6.

Texas Instruments visade först en dator med integrerade kretsar 1961 i ett projekt för USAs flygvapen. Efter detta har en mycket anmärkningsvärd utveckling ägt rum. Halvledarindustrin har präglats av mycket snabb, kontinuerlig förändring. Den dominerande transistortypen förändrades

sex gånger mellan 1950 och 1960. År 1958 kostade en transistor tio dollar. Idag finns det omkring hundra miljoner transistorer i ett arbetsminne (DRAM, Dynamic Random Access Memory) och detta kostar 20 – 50 dollar.

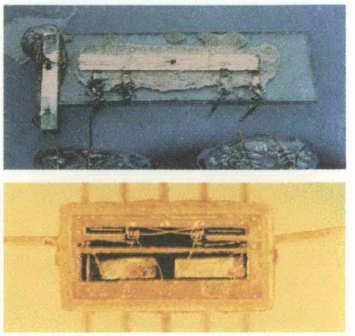


Fig 6. De första integrerade kretsarna från 1958–59, Kilbys överst och Noyces underst.

Integrerade kretsar

Gordon Moore skrev 1965 i en artikel i Electronics: "Komplexiteten hos en komponent med lägsta kostnad har ökat med grovt sett en faktor två per år (se figur). I det korta tidsperspektivet kan denna takt säkert förväntas fortsätta, och kanske öka. I ett längre tidsperspektiv är ökningstakten lite mer osäker, även om det inte finns skäl att den inte kan fortsätta i nästan samma takt i åtminstone tio år till. Det betyder att 1975 kommer antalet komponenter per integrerad krets av lägsta kostnad att vara 65 000. Jag tror att en så stor krets kan byggas på en kiselskiva." Denna förutsägelse var anmärkningsvärd vid den tiden med hänsyn till det tidiga skede i vilket integrerad kretsteknik befann sig, men har visat sig vara förvånansvärt korrekt. Ett chips innehöll 1965 omkring 50 element. Komplexiteten hos integrerade kretsar har fortsatt att fördubblas årligen långt efter 1975. Fördubblingstakten har först på senare tid saktat av till omkring 18 månader. Figuren som det hänvisas till i citatet visas i figur 7. Ökningen i kretskomplexiteten fram till år 2000 visas i figur 8.

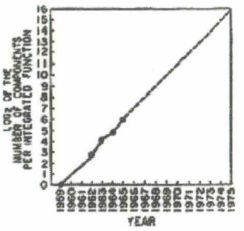


Fig 7. Figuren i Moores artikel i *Electronics* 19 april 1965.

Intels senaste mikroprocessor, Pentium IV, har 42 miljoner transistorer på en kiselplatta (chips) som är 217 kvadratmillimeter och producerats med linjer[6] med bredden 180 nm (miljarddels meter eller miljondels mm), vilket betyder en typisk storlek som är mer än 500 gånger smalare än tjockleken på

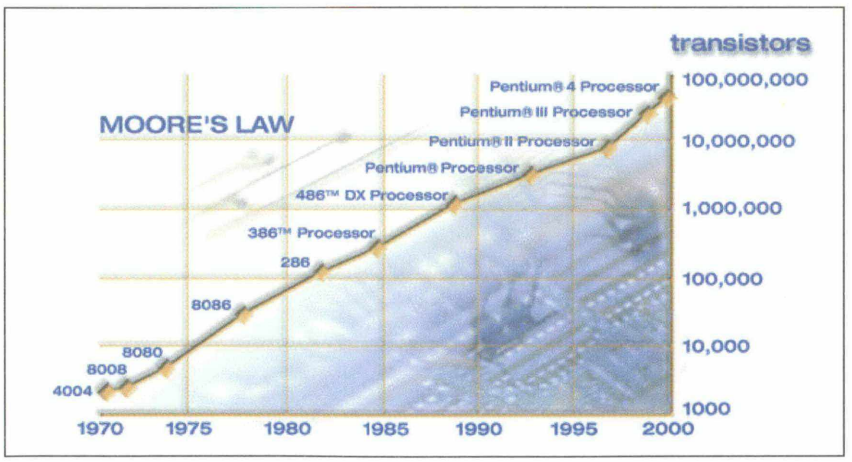


Fig 8. Utvecklingen av komplexiteten hos Intels processor.
FOTO INTEL

ett genomsnittligt hårstrå. Det är intressant att jämföra detta med vad som 1989 förutsades av Patrick P Gelsinger, Gerhard H Parker och Albert Y C Yu: "Mikroprocessorn år 2000 kommer att ha 50 miljoner transistorer på en platta av en kvadrattum (645 mm^2) och kan bestå av multipelprocessorer som kan utföra över 2 000 miljoner instruktioner per sekund." Pentium IV släpptes nyligen med en klocka på 2 GHz. GeForce3, den år 2000 av nVidia introducerade kretsen för datorgrafik, har 53 millioner transistorer.

Carver Mead vid California Institute of Technology förutsade 1969 att förbättrad tillverkningsteknik kunde tillåta halvledare med delar som endast var 150 nm stora. Nyligen annonserade Intel att de ska starta produktion av kretsar baserade på en linjebredd av 130 nm. Linjebredden i kretstillverkningen 1965 var omkring 25 mikron (miljondels meter) eller omkring en fjärdedel av tjockleken på ett hårstrå.

Datorns minnen

Arbetsminnet i datorn, RAM, har, genom att det är så enhetligt och i allt väsentligt bara innehåller ett slags logiska kretsar, alltid varit ledande när det gäller antalet transistorer per krets. RAM finns i två former: dynamisk RAM (DRAM) och statisk RAM (SRAM). DRAM är ett kortlivat minne, d v s dess information måste uppdateras regelbundet om den inte ska ändras. Det har optimerats för täthet och används som huvudminne i datorer. Enstaka transistorer används för informationslagring i DRAM, som, optimerade för pris, med modernaste teknik idag kan lagra 512 miljoner bitar. En DRAM minnescell designad för 130 nm linjebredd upptar en fjärdedels kvadratmikron[7] och chipsen är omkring 130 kvadratmillimeter. DRAM chips som kan lagra en miljard bitar väntas finnas 2003, tillverkade med en linjebredd av 100 nm (en tusendel av ett hårstrå). Chips med fyra miljarder bitar har demonstrerats i laboratorier. De kan lagra data motsvarande 32 000 tidningssidor, 1 600 fotografier eller 64 timmar ljudinspelning.

SRAM används när information inte får gå förlorad. Sex transistorer används ofta för att lagra en enda bit i SRAM, att jämföra med en enda transistor i DRAM. SRAM cellerna i 130 nm teknologin är omkring två kvadratmikron.

Tillverkningen av chips och integrerade kretsar

Förmågan att tillverka chips med så små detaljer innebär avsevärda kostnader. För omkring 25 år sedan kostade en tillverkningsenhet för chips mindre än 4 miljoner dollar (cirka 13 millioner dollar i dagens penning-

värde). Idag kostar motsvarande enhet omkring 1,5 miljarder dollar. Inte desto mindre har kostnaden för integrerade kretsar minskat dramatiskt, från omkring 55 000 dollar (cirka 1,7 miljoner dollar i dagens penningvärde) för 8 miljoner bitar för 25 år sedan till omkring 25 cent idag. Det betyder alltså att samtidigt som kostnaden för tillverkningsenheten ökat omkring 100 gånger har kostnader per bit reducerats med en faktor på ungefär 8 miljoner.



Fig 9. Den första kalkylatorn från 1967.
FOTO TEXAS INSTRUMENTS

Potentialen för integrerade kretsar att revolutionera datoranvändningen och göra att den kom i så allmänt bruk var långt ifrån uppenbar på 1960-talet. För att skapa uppmärksamhet presenterade Texas Instruments 1967 en bärbar elektronisk kalkylator som var bara omkring 15 cm hög, fig 9. Den hade funktioner fullt jämförbara med den heltransistoriserade räknare som släppts året före, men som var en apparat som vägde nästan 30 kilo och då kostade 2 500 dollar (cirka 13 300 dollar i dagens penningvärde).

Intel, som grundats av Gordon Moore och Robert Noyce 1967, skapade den första mikroprocessorn 1971. Den var utvecklad av Ted Hoff i ett projekt som syftade till att designa och producera chips för en ny serie kalkylatorer för det japanska företaget Busicom. Hoff designade chipset och Frederico Faggin började bygga produkten, men Busicom tyckte att utvecklingen tog för lång tid. Intel, som var övertygade om att designen skulle bli lyckad, löste tillbaka hela Busicoms investering på 40 000 dollar. Chipset blev senare känt som Intel 4004, se fig 8, hade omkring 2 300 transistorer på en platta med storleken 5 kvadratmillimeter. Det var lika kraftfullt som ENIAC.

Den ökade komplexiteten i chipsen, och deras förbättrade snabbhet, beror på att komponenternas storlek minskar med linjebredder som gått från 20 – 30 mikron kring 1965 till 130 nm i dagens moderna tillverkningsenheter. Till den minskade kostnaden har också bidragit att kiselskivorna som används för att tillverka chipsen blivit större. Skivstorleken har ökat från omkring 30 mm 1965 till 300 mm idag. Idag finns det bara två sådana produktionsenheter i världen, vardera till en investering av 1,5 – 2 miljarder dollar. Chipstillverkning liknar en fotografisk process. Den ständiga minskningen av storleken av detaljerna på skivorna kräver att ljuset som används för exponeringen måste få allt kortare våglängd.

Idag används 248 nm ultraviolett ljus, men litografisk teknik för exponeringen kommer att använda 193 nm inom en nära framtid och 157 nm är under utveckling. Ett extremt ultraviolett ljus, EUV, med 13 nm våglängd finns på forskningsstadiet. Synligt ljus har våglängder mellan 400 och 700 nm. Med EUV skapades nyligen den första exponeringen av ett helt chips. Vid en våglängd på 13 nm kan ljuset avbilda transistorelement

som bara är 40 atomer vida. Vid 13 nm blir masker och linser som släpper igenom längre våglängder ogenomskinliga, vilket gör att speglar måste användas i stället. De 80 lager med alternerande kisel och molybden som bygger upp speglar och masker måste slipas med toleranser på enstaka atomer. Hela kretstryckningen måste göras i vakuum eftersom luften själv absorberar strålningen vid dessa våglängder. Maskerna kommer också att förvränga bilden om de innehåller mer än en handfull defekter av storleken 50 nm. En 50 nm defekt på ett chips motsvarar en fel stort som en basketboll i Texas, eller ett hårstrå på en fotbollsplan.

Utvecklingstakten

Kan denna halsbrytande takt i utvecklingen fortsätta? Semiconductor Industry Association, SIA, tror det. SIA har i många år gjort prognoser som nu löper till 2014. Introduktionen av 100 nm litografisk teknik förväntas under perioden 2003 – 2005, och 70 nm teknik i perioden 2005–2007. Kring 2009/2010 kan 30 nm litografi vara i produktion. Fig 10 visar transistorer med en grindlängd på 20 nm. Minskningen av storleken på detaljerna i en takt på omkring 30 procent för varje treårsperiod har förutsatts i dess prognoser. Men under de senaste åren har reduktionen ägt rum på två år snarare än tre år.

Prognoserna är genomarbetade och inte bara enkla framskrivningar. Alla teknologiska utmaningar, som måste beaktas, granskas och bedöms och några scenarier för hur utmaningarna ska mötas utvärderas. Dessa utmaningar är, som framgått av tidigare redovisade analogier, formidabla. Att avbilda chips med 30 nm litografin motsvarar att avbilda ett mynt på ett avstånd av 300 km. En minnescell (1 bit) i ett DRAM chips med 16 miljarder bitar väntas 2010 uppta en yta på omkring 0,008 kvadratmikron. Kostnadsreduktionen per bit väntas motsvara en faktor 20 under de kommande tio åren. Trovärdigheten i dessa prognoser stöds av Intels tillkännagivande i juni 2001 att forskare i ett av deras laboratorier hade producerat världens första transistor som kunde operera med 1,5 THz (1 500 GHz) och uppvisa strukturer som bara bestod av tre atomlager, se fig 10.

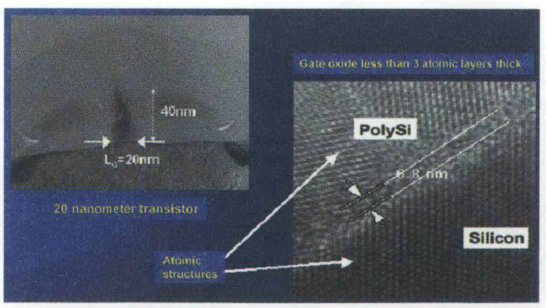


Fig 10. En transistor för 1 500 GHz som demonstrerades 2001. Till vänster visas transistorn med 20 nm grindlängd och till höger syns atomstrukturen.
FOTO INTEL

Minnen

Varaktig lagring på skivor (disketter eller hårddiskar) eller magnetband är en viktig del av varje system för informationsbehandling. Trots

att dessa lagringsmedia inte direkt använder integrerade kretsar för lagring så gör läs- och skrivenheterna det. Magnetiska media i olika former används för informationslagring. Förbättringen av kapaciteten hos skivor för lagring har varit minst lika spektakulär som halvledarkretsteknologin. Under tiden 1970 till 1990 halkade takten i förbättringarna för lagringsminnen efter de integrerade kretsarna, men sedan dess har lagringskapaciteten ökat snabbare än för DRAM. För närvarande fördubblas skivornas lagringskapacitet varje tolvmånadersperiod, fig 11, jämfört med 18 månader för DRAM. Det betyder att tätheten är ungefär fyra miljarder bitar per kvadratcentimeter (cm^2)och att tätheter på 16 miljarder bitar per cm^2 väntas till 2003. Omkring 2006 väntas tätheten ha nått 160 miljarder bitar per cm^2 och 2010 en biljon. Vid en täthet på 16 miljarder bitar per cm^2 kan en 3,5 tums diskett som används i bordsdatorer lagra texter från 400 000 böcker, innehållet på 84 DVD eller 600 CD. En 2,5 tums skiva som typiskt sett används i bärbara datorer kan lagra hälften av detta, mikrodrivar, d v s 1 tums skivor, väntas kunna lagra 6 Gbit eller motsvarigheten till 13 timmar MPEG-4 digital video.

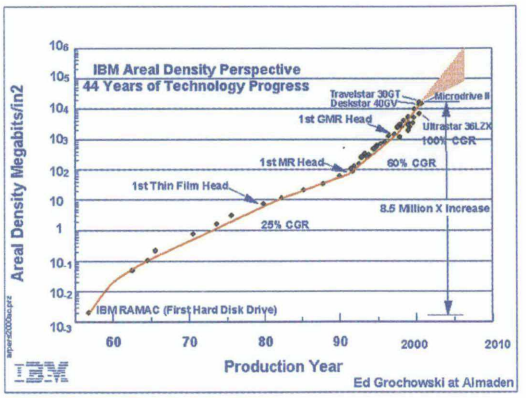


Fig 11. Utvecklingen av lagringstätheten hos IBMs skivmaterial.
FOTO IBM

Problemen

För att dessa utvecklingstakter ska kunna bestå finns det några problem som måste övervinnas. Skivlagringsmedia är beroende på kornstorlek i magnetiska media där åtskilliga hundra korn representerar en bit information, fig 12. När avståndet mellan bitarna minskar används färre och färre korn för att lagra informationen om kornstorleken är konstant. Det reducerar signal-till-brus-förhållandet eftersom de individuella kornen kan ändra orientering till följd av excitationsimpulser. Att reducera kornstorleken för att bevara signal-till-brus-förhållandet är dock inte utan problem. När kornen blir tillräckligt små blir de "superparamagnetiska" och magnetiseringsriktningen blir beroende av termiska variationer. För att reducera det superparamagnetiska uppförandet av flerkorniga magnetiska lager används en tre-lager-teknik som nyligen har introducerats av IBM, fig 13. Det mellersta lagret, bara tre atomlager tjockt, stabiliserar den magnetiska orienteringen i två kornlager, ett ovanför och ett under. De två kornlagren tvingas bli orienterade i motsatt riktning. För bittätheter omkring 16 miljar-

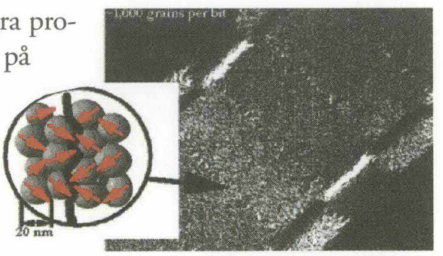


Fig 12. Kornen på en magnetskiva och en förstoring av deras magnetiseringsriktning.
FOTO IBM

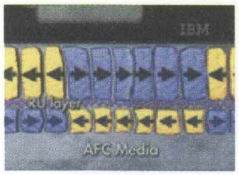


Fig 13. IBMs tre-lagerteknik.
FOTO IBM

der per cm^2 går det att forma mönster av tunt magnetiskt material i små öar med 50 nm storlek eller mindre med teknik som är känd. För att nå tätheter på 100 miljarder bitar eller mer per cm^2 håller teknologi för holografiska skivor på att utvecklas.

Den förväntade utvecklingen av lagringskostnaderna är av största betydelse när det gäller att bedöma inverkan av lagringsteknik såväl i samhället som för vetenskap och utbildning. Kostnaden för tio megabit på en 3,5 tums skiva är redan under en cent medan kostnaden på en 2,5 tums skiva är 2–3 gånger detta och en 1 tums skiva omkring 50 gånger högre. Dessa kostnader betyder idag att en bok på 350 sidor med text, figurer och tabeller kan lagras för mindre än en cent i en bordsdator, lite över en cent i minnet på en bärbar dator och för 40 cent i en fickdator. Den nuvarande takten i kostnadsminskning med en faktor över 100 på en femårsperiod väntas fortsätta. Det betyder att 40 000 bilder med skaplig kvalitet kommer att kunna lagras i ett bordsdatorminne för mindre än en dollar. Det motsvarar för de flesta alla foton de tar under en livstid. Det är uppenbart att kostnaderna för lagring inte kommer att bli en begränsande faktor när det gäller att använda bilder och video för att kommunicera idéer och dela erfarenheter.

Utvecklingens gränser

Under 2010-talet väntas fysiken eventuellt resa fundamentala barriärer när det gäller den uppskalning av kiselbaserad halvledarteknik som industrin har hanterat så framgångsrikt de senaste 40 åren. Forskning som idag pågår när det gäller molekylära datorer och nanoteknologier kan dock erbjuda alternativ som gör att kapaciteten för lagring och bearbetning kan fortsätta öka i exponentiell takt. Utrustning baserad på nanoteknologi studeras av några få grupper och transistorer som är 500 gånger mindre än dagens har byggts. Nanoteknologins alster väntas bli bara några få atomlager i storlek. Nanoteknologin kommer också att följas av försök att konstruera minnesenheter.

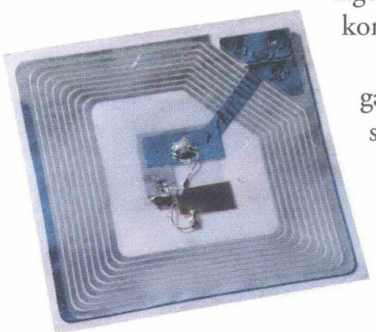


Fig 14. Radiofrekvent identifieringssändare från Philips.
FOTO PHILIPS

Skapandet av molekylära datorer baserade på organiska eller oorganiska molekyler, följs också aktivt. Även om det finns ett mått av skepticism beträffande möjligheterna att åstadkomma molekylära datorer, som kan tävla framgångsrikt med kiselbaserad teknologi på grund av den lägre elektronmobiliteten och därav följande lägre snabbhet, så har området redan uppnått vissa framgångar när det gäller skärmar och identifieringsutrustning som innehåller radiosändare, fig 14.

Forskningsgrupper har redan kunnat bygga elementära logiska kretsar. Ett 16 bitars minne med en storlek på en hundradels kvadratmikron är ett näraliggande mål. DNA lagrar information med en täthet på omkring en bit per kubik-nm, medan dagens DRAM lagrar en bit i omkring 0,25 kvadratmikron, vilket är ungefär 100 000 gånger glesare. En lagringstäthet som hos DNA skulle göra det möjligt att lagra ett helt livs registrerade data i minnesenheter som inte är större än ett armbandsur.

Beräkningar i en DNA-datorer skulle i detta perspektiv kunna uppnå omkring 10^{20} operationer per sekund. Det väntas dock ta decennier att lära sig behärska DNA-datorteknik med logiska kretsar och minnen på molekylär nivå. De förväntas bli kommersiellt tillgängliga före slutet av detta decennium och finna tillämpningar på nya områden, som programmerbara adresslappar och en variation av sensorer och aktörer.

Som exempel på spännande tillämpningar av molekylär elektronik kan nämnas sensorer som reagerar intelligensliknande på biologiska och kemiska nycklar som de får genom att påverkas eller interagera med andra molekyler, exempelvis i kroppen. Carver Mead, som 1969 förutsade att transistorer kunde byggas med 150 nm litografisk teknik, tror att datakonstruktörer kan lära sig mekanismer från biologin. Mead har skapat både en retina och bensnäcka i kisel genom att undersöka analogier mellan biologin och kiselteknologier.

Framtiden

Den exponentiella ökningen av prestanda, som för integrerade kretsar ägt rum sedan 40 år och för fiberoptik sedan 15 år, har redan genomgripande påverkat vårt dagliga liv. Under de kommande 10 åren kommer den omfattande datorbearbetning vi inte ser ändå att påverka allt vi gör. Och den kommer också att påverka hur vi reagerar på förändringar i vår omgivning. Kommunikationsnätverken är på väg att skapa en *hinna* (Netravali 1999) runt jorden med smarta sensorer som trådlöst kommunicerar med smarta aktörer med bärbar utrustning som förser dem med en utvidgad verklighetsbild i realtid understödd från mängder av datorer och databaser.

Datorer och kommunikation kommer att bli allestädes närvarande med ständigt och överallt uppkopplad bredbandsanslutning. Ny presentationsteknik kommer att göra det möjligt att överallt utnyttja bilder, video och 3-D-utrustning oavsett om det är genom elektroniskt papper, elektroniska böcker, bildglasögon eller skärmväggar, fig 15. Enligt Kris Pister vid University of California i Berkeley kommer trefärgssystem, som både läser

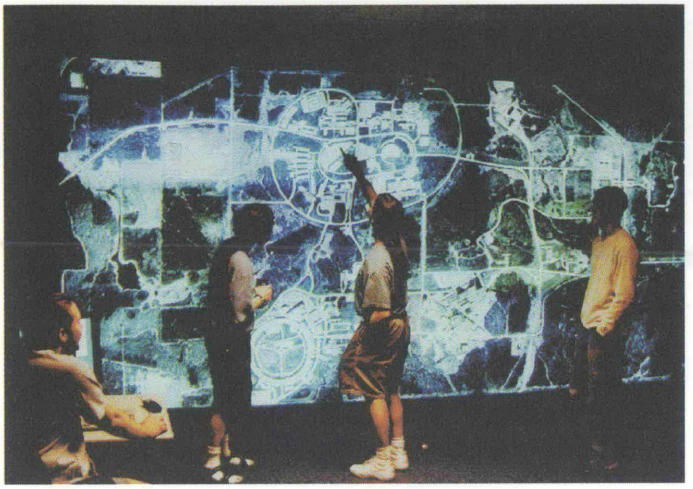


Fig 15. Skärmvägg som presentationsteknik.

in och projicerar bilder, att år 2010 vara stora som ett risgryn och kosta under en dollar. De kommer att kunna sättas in i vanliga glasögon. De kommer att finnas i laserpekpinnar och kan förvandla vilken vägg som helst till en elektronisk skärm. De kan skapa häftiga 3D-föreställningar med ljusstyrka, kontrast och bildvinklar som inte motsvarar någon teknik som finns idag eller som vi kan föreställa oss nu.

Tillämpningar i bilar

Sensorer och aktörsnätverk kommer att finnas överallt, med information som flödar till och från *hinnan*. Sensorerna kan registrera trafiken på varje väg, vädret och väglaget och datorer kan förutsäga förändringar i trafiksituationen de närmaste minuterna eller timmarna. Sedan kan informationen förmedlas som syntetiskt tal, eller till bilder i glasögon, eller till vindrutan så att bilföraren inte behöver vända uppmärksamheten från vägen. Sensorer kan också kontrollera viktiga system i bilen och varna föraren när och var han eller hon behöver fylla bensin – inte bara beroende på hur mycket som gått åt och var det finns en mack, utan också var det är bäst med hänsyn till pris, kvalitet eller betalningsmöjligheter. Information om parkeringssituationen vid färdmålet blir alltid tillgänglig och systemet i bilen kan rekommendera alternativ.

Parkeringsmätare som är uppkopplade över Internet finns redan nu på några platser, även om det ännu är mest för underhållsplanering. Bilens verkstad kan på avstånd och kontinuerligt följa bilens kondition och göra

föraren uppmärksam på när service behövs. Om ett fel uppstår kan sensorer och trådlös kommunikation tillsammans med datorsystem i bilen inte bara diagnostisera orsaken utan också föreslå vilka reparationer som kan göras med hänsyn till vad verkstaden och reservdelsförrådet kan erbjuda.

Transportplanering

Flygindustrin har redan börjat tillämpa delar av denna framtida möjlighet genom att underhållsingenjörerna fortlöpande kan följa vitala funktioner i flygplanen oavsett var de befinner sig. När det är nödvändigt kan reservdelar fraktas till de destinationer flygplanen har för att minimera tiden det tar för att utföra underhållet. Färdrutter och hastigheter bestäms sedan några år för varje färd, inte bara med hänsyn till färdvägen utan också till vind och väderförhållanden, så att bränsleförbrukningen minimeras och vidare att flygplanen bara bär med sig det bränsle de behöver för den aktuella rutten, farten och lasten.

Att arbeta fram arbetsscheman för besättningen med hänsyn till underhållsbehov för utrustning, besättningars tillgänglighet och kompetens är en utmaning också för de mest kraftfulla datorerna. Det kan ännu inte utföras i realtid med tillräcklig noggrannhet. År 2010 ska dock datorer kunna ge underlag för hur avvikelser från planerade scheman på grund av väderförhållanden kan rättas till. Det kommer att avsevärt minska tiden för att återgå till ordinarie tidtabeller.

Datorer som arbetar i nätverk är avgörande viktiga system i många transportsammanhang. Det ger till exempel möjlighet att hålla reda på var distributionsfordon befinner sig och ger förarna möjlighet att hitta bästa vägen till destinationen genom att utnyttja det globala positioneringssystemet (GPS). Det erbjuder också möjligheten att planera färdvägar så att fordonen kan hämta upp och lämna gods i rätt tid och till lägsta kostnader, att hålla reda på var fordonen befinner sig, och att möta de krav som ställs av egenskaperna hos godset, som vikt, volym, krav på kylning och annat.

Mikroelektriska mekaniska system

Mikroelektriska mekaniska system, MEMS, är en teknologi som liknar tillverkningen av halvledarkretsar. Kris Pister förutsäger att MEMS sensorer som inte är större än sandkorn kommer att finnas överallt och avläsa i praktiken allt. Pister hänvisar till sensorerna och aktörerna som "smart damm", fig 16. Genom att hämta energin från solljus, vibrationer, termis-



Fig 16. MEMS-krets idag.

ka gradienter och bakgrundsradiovågor kommer sensorerna att vara helt självförsörjande enkelchipsdatorer med förmåga att avläsa och kommunicera och med inbyggd energiförsörjning. Man kommer att omedelbart kunna se när bilar, möbler, stereor och andrar värdesaker stjäls, genom att smarta sensorer kommer att följa dem på väg mot ytterdörren. Ditt hus eller kontor kommer att känna till din närvaro och också i vilket rum du är. Ljus, värme och annan komfort kommer att justeras därefter. Att hitta ett ledigt sammanträdesrum blir enkelt. Sensorerna kommer att veta och meddela vilket som är närmast. I en främmande byggnad kommer du att vägledas av ljusränder på golvet eller i väggen, där namnet på det rum du ska till visas.

Ett batteri som är en kubikmillimeter stort räcker i tio år för att klara energiförsörjningen till enklare uppgifter som att registrera temperatur och sända uppgiften en gång i sekunden. En kubikmillimeter stor vibrationsförstärkare kan fungera med den takten i evighet. Inomhus kan en kvadratmillimeter stor solcell ge tillräcklig energi för att utföra 100 uppgifter per sekund, och i fullt solsken 100 000 uppgifter per sekund. Ett kubikmillimeter stort batteri kan ge en optisk kommunikationslänk inomhus tillräcklig energi för att överföra 500 miljarder bits (motsvarande ett halvdussin biofilmer). MEMS-teknologin kan också användas utanför området för normal och korträckviddig radiokommunikation.

I hemmen kommer hushållsmaskinerna, underhållnings- och säkerhetssystem, och uppvärmning och luftkonditionering att vara anslutna till "hinnan" och kommunicera med hyresgästen eller bostadsägaren. Kylskåp med platt skärm och Internetanknytning finns att köpa redan idag. Sensorer och aktörer kommer att vara en källa för ett ökande antal förbindelser maskin-till-maskin eller föremål-till-förmål. Netravali förutser i själva verket att denna typ av "infrachatt" kommer att bli mer omfattande än kommunikationen mellan personer. "Hemma kommer din diskmaskin att kunna tillkalla tillverkaren när något fel uppstår, och tillverkaren kommer att kunna diagnostisera felet på håll," förklarar han. "Sprinklern på din gräsmatta kan kontrollera vädertjänstens hemsida, för att kolla att väderprognosen inte förutser regn, innan den slår på sig själv,."

Kommunikationsapparaterna kommer att vara av samma storlek som smycken. Dessa "metofoner" kommer att kunna förstå våra röster. "Hur man slår numret på en telefon kommer bara att läras ut på historielektionerna. För att ringa mamma behöver man bara säga 'mamma' ", sa Joseph Olive, chef för Bell Labs. "De små metofonerna på ditt rockuppslag kommer att kunna läsa hemsidor och e-post åt dig." Bell Labs frimärksstora "kamera på chipset" kommer till exempel att kunna visa videobilder som

är lika bra som smygfotografers. Tillsammans med mikroskopiska mikrofoner som också uppfunnits vid Bell Labs kan en bildtelefon som sitter runt din handled byggas runt videochipset. Tusentals runt-horisonten-kameror och stereomikrofoner placerade på idrottsarenor, musikkonserter och affärsmöten kommer att ge dem som deltar över webben full kontroll över vad de ser, hör och upplever.

Några praktiska tillämpningar

I ett extremfall kommer datorerna att bli så billiga att de kan betraktas som konsumtionsvaror. I ett annat extremfall kommer de mest kraftfulla datorerna med exceptionella egenskaper fortfarande att kosta tiotals miljoner dollar. Sådana datorer har av tradition använts för att vidga gränserna för vetenskapen, men de allt större datorsystemen används nu för att hantera informationssystem, som de system som är anknutna till Internet. Så har till exempel America Online (aol.com) ett datorsystem som är fullt jämförbart med de största systemen för naturvetenskaplig och teknisk forskning och utveckling som traditionellt drivit på datorutvecklingen. Den kommersiella marknaden har tillfört finansiella incitament till industrin som krävs för att påskynda teknikutvecklingen. I ökande grad har massmarknaden erbjudit den stimulans som teknikutvecklingen behöver för en fortsatt snabb utveckling.

Sist men inte minst ska vi ge några exempel på problem och datortillämpningar som blivit aktuella genom datorernas enorma bearbetningsförmåga. Genom att flertalet datorer inte används större delen av tiden kan ett gemensamt och kollegialt utbyte mellan många hopkopplade datorer öka datorkraften avsevärt. Ett sådant gemensamt användande har i själva verket redan skapat den mest kraftfulla datorn för uppdrag där behovet av signalutbyte mellan processorer är litet eller medelstort. Stora grupper med miljoner datorer har på detta sätt redan använts för tillämpningar när det gäller livsvetenskaper, matematik och i sökandet efter liv utanför jorden.

En annan tillämpning som växer fram är televetenskap, d v s fjärranvändning av vetenskapliga instrument som elektronmikroskop eller radioteleskop. Eftersom dessa instrument kontrolleras av datorer och registrerar data digitalt, och genom att datorerna är anslutna till nätverk, har det blivit möjligt att fjärranvända instrument och att påverka deras funktion så att nyttan av deras observationer kan maximeras. I några fall krävs det avsevärda beräkningsinsatser på registrerade data för att besluta om ett teleskops inriktning mot ett astronomiskt objekt eller orienteringen av ett

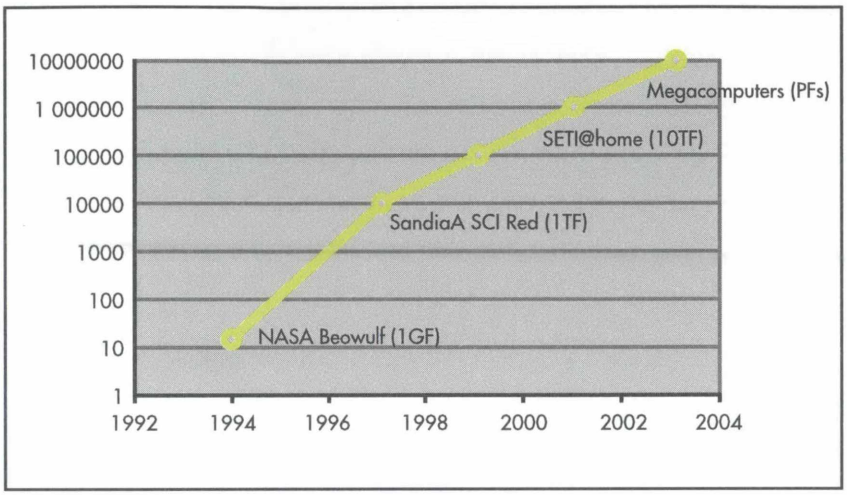
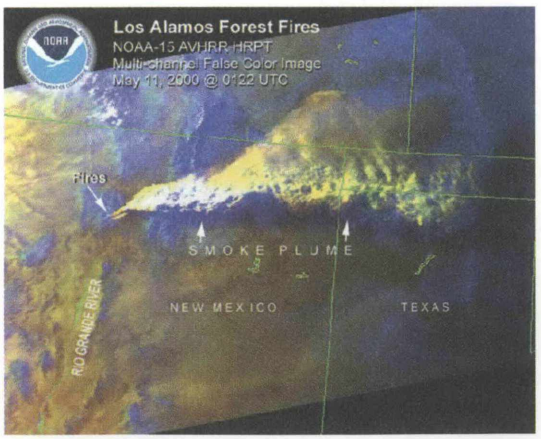


Fig 17. Tillväxten i parallellutnyttjandet av persondatorer (antalet pc på vertikala axeln).
FOTO LARRY SMALL COMPUTER SCIENCE & ENGENEERING

prov i ett elektronmikroskop. Nätverken eller beräkningskapaciteten är idag inte helt utvecklade för att göra sådana tillämpningar till rutin, men innan detta decennium är slut kommer det att finnas många lösningar på denna möjlighet, fig 17.

Inom livsvetenskaperna finns det många utmaningar när det gäller datorberäkningar och dataanalys som precis har börjat bearbetas. Återskapande av bilder, förstärkning av observationer och analyser har stor betydelse inom detta område. Bildbehandling är ett av de viktigaste redskapen. I den strukturella biologin är utmaningen idag att uppnå en upplösning på 4 – 5 ångström, något som med dagens instrument skulle kräva analyser av fem miljoner bilder, var och en med en upplösning av en miljon pixel (bildpunkter). Idag har man uppnått ungefär hälften av detta. Biomedicinsk bildhantering och simulering av biomedicinska system är exempel på andra krävande datorapplikationer.

Fig 18. Identifiering av en skogsbrand.
FOTO LARRY SMALL COMPUTER SCIENCE & ENGENEERING



Prognoser för väder med stormar och orkaner är andra viktiga tillämpningar som inte bara är utmaningar för datorutvecklingen utan också för naturvetenskapen eftersom laser- och sensorteknologi erbjuder nya möjligheter att mäta. Nätverken gör det möjligt att samla in och bearbeta data till prognoser i realtid. Också när det gäller skogsbränder och andra bränder finns det stora datormässiga utmaningar, fig 18.

Slutligen vill jag nämna simuleringar av olika aspekter på vår miljö och tillämpningar av traditionell vetenskap och teknik som fordrar avsevärd beräkningskapacitet, såsom kompletta maskinsimuleringar, dynamiken i komplexa mekaniska system, schemaläggning i stora system som för flygtrafik och besättningar och analyser av acceleratordata i elementarpartikelfysiken.

NOTER

1. Den intresserade läsaren kan hitta förslag till litteratur på s 114–115.
2. Klocka och dess frekvens är ett mått på hur snabbt en dator kan arbeta och anges ofta i multiplar av Hz, d v s pulser per sekund.
3. ENIAC har beskrivits av Göran Kjellberg i *Daedalus* 1979/80.
4. Dessa maskiner har tidigare beskrivits i *Daedalus* – BARK och ENIAC av Sigvard Strandh i *Daedalus* 1965 och BESK utförligt av Jörgen Lund i *Daedalus* 1987.
5. Tillfällig lagringsplats där datorn lägger viss information för att ha den snabbt tillgänglig.
6. Med linjer avses anslutningsledningarna mellan komponenterna i den integrerade kretsen.
7. En kvadratmikron motsvarar en kvadrat med en sida som är 1/100 av ett hårstrås tjocklek.

REFERENSER – ETT URVAL

Babbage, Henry Prevost (ed) *Babbage's calculating engines.* Los Angeles, 1982 (Charles Babbage Institute reprint series for the history of computing ; 2)

Burks, Alice R & Burks, Arthur W, *The first electronic computer : the Atanasoff story.* Ann Arbor, 1988

Burks, Arthur W & Burks, Alice R (eds), "The ENIAC: first general-purpose electronic computer" i *Annals of the history of computing,* vol 3, 1981, nr 4, s 310–399

Carpenter B E & Doran R W, *A M Turing's ACE report of 1946 and other papers.* Cambridge, Mass, 1986 (Charles Babbage Institute reprint series for the history of computing ; 10)

Catlett, Charlie, & Forster, Ian, *The network meets the computer: architectural implications of unlimited bandwidth, 2001.* Url: http://www.east.isi.edu/NGI-S/lsn2000/Argonne_Nat_l_Lab-Catlett.pdf (2001–11–02)

Gelsinger, Patrick P, Garginn, Paolo A, Parker, Gerhard H & Yu, Albert Y C, "Microprocessors circa 2000" i *IEEE Spectrum,* October 1989, s 43–47

Hartree, Douglas R, *Calculating machines; and, Calculating instruments and machines.* Cambridge, Mass, 1984. (Charles Babbage Institute reprint series for the history of computing ; 6)

IBM Systems Journal, vol 38, 1999, nr 4. Special issue on pervasive computing

Katz, Randy H et al, *The Endeavour expedition: charting the fluid information utility,* Electrical engineering and Computer science department. Berkeley, Calif, 1999 Url : http://endeavour.cs.berkeley.edu/ (2001-11-01)

Kuck, David J, *The structure of computers and computation.* New York, 1978

Martin, Ernst, *The calculating machines.* Cambridge, Mass, 1992 (Charles Babbage Institute reprint series for the history of computing ; 16)

McRobbie, Michael A., *Indiana Pervasive Computing Initiative,* Indiana University, 1999 Url: http://www.indiana.edu/~ovpit/ipcres/ (2001–11–02)

Moore, Gordon, *Electronics*, vol 38, 1965, nr 8, April 19

Morrison, Philip and Morrison, Emily, *Charles Babbage and his calculaiting engines.* Dover, 1961

Netravali, 1999. Url: http://www.lucent.com/press/1199/991112.bla.html

Pister, K, Khan, J & Boser, B, *Smart dust, autonomous sensing and communication in a cubic millimeter,* Electrical Engineering, Berkeley, Calif
Url: http://robotics.eecs.berkeley.edu/~pister/SmartDust/ (2001–11–02)

Stix, Gary, "Getting more from Moore's" i *Scientific American*, vol. 284, 2001, nr 4, s 20–24

Weiser, Mark & Brown, John Seely, *The coming age of calm technology,* Xerox PARC, October 5, 1996
Url: http://www.ubiq.com/hypertext/weiser/acmfuture2endnote.htm (2001–11–02)

Von Neumann, John, *Papers of von Neumann on computing and computer theory.* Cambridge, Mass, 1987 (Charles Babbage Institute reprint series for the history of computing ; 12)