LIDT OM REGNEMASKINEN EDSAC.

Af *Peter Naur.*

Den første gang jeg stiftede bekendtskab med EDSAC, Electronic Delay Storage Automatic Calculator, var en dag i november 1950. Der havde været et foredrag i Cambridge University Mathematical Laboratory, men efter diskussionen følte jeg mig mere tiltrukket af det virvar af ledninger og radiorør, som kunne skimtes gennem en dør ind til maskinen, end af den obligate te. Jeg traadte nærmere uden at blive antastet og saa nu væsenet i dets helhed. Den bestaar af tre mandshøje paneler med radiorør, modstande osv., en stor kasse paa gulvet, som man faar at vide indeholder hukommelsestankene, og saa et bord med en mekanisme til at aflæse de perforerede papirstrimler, som den fodres med, og en fjernskriver, som leverer resultaterne. Saa er der endelig monteret seks katodestraalerør, som til enhver tid viser, hvad der foregaar i maskinen. Da jeg kom, var den i fuld gang med et problem. Den løste en differentialligning, som fremkommer i problemet om stjernernes indre struktur. Katodestraalerørenes figurer dansede med en ubegribelig fart, og med jævne mellemrum gav fjernskriveren sig til at trykke tal i en nydelig tabel. Det var næsten for utroligt at se, til at det kunne være sandt.

I nogle maaneder blev det ikke til mere end dette flygtige bekendtskab — der var meget andet at lave, men jeg kunne ikke faa den ud af tankerne, og resultatet blev, at jeg i slutningen af februar 1951 tog fat paa sagen paa en ganske anden maade. Jeg ville ikke blot være tilskuer, maskinen skulle sættes til at beregne de perturbationer, som ellers er saa tunge at komme igennem. Fra da af og til jeg forlod Cambridge i juni, var det ikke faa timer, vi tilbragte i hinandens selskab, maskinen og jeg, og den skuffede heller ikke. Vi fik tilrettelagt problemet, og vi fik ogsaa brugt metoden til noget.

Der er mange forskellige ting, man kan fortælle om en saadan stor regnemaskine. Først hvad den kan gøre rent matematisk set, saa hvordan den gør det, altsaa hvad der foregaar inde i den, og man kan fortælle om, hvordan vi faar den til at gøre det, vi vil have, at den gør, for det gaar ikke altid saa nemt lige med det samme.

Nu først om hvad EDSAC kan gøre. Det er egentlig nemt sagt. Den kan gøre nøjagtig det samme som en menneskelig beregner, som er udstyret med en almindelig multiplikationsmaskine, og som har tid nok. Der er i virkeligheden en vidtgaaende analogi mellem maskinens funktion og det, som en menneskelig beregner kan sættes til at gøre, og den nemmeste maade at forklare maskinens arbejde er at forfølge denne analogi lidt videre.

Vi vil udstyre vor beregner med papir og blyant. For at udføre en lang og indviklet beregning uden at han maa spørge os om vejledning, vil vi nu bruge noget af papiret til at skrive regneformlerne paa. En anden del af papiret kan saa bruges af beregneren til at skrive mellemresultaterne ned. Det, beregneren gør, er nu skiftevis at se paa formlerne for at vide, hvilke tal han nu skal have fat paa, og skiftevis at finde det rigtige tal til at anbringe i regnemaskinen.

Hvad nu EDSAC angaar, stiller sagen sig paa meget nær samme maade. En del af maskinen kan udføre additioner og multiplikationer og har ligesom andre regnemaskiner et sumværk og et multiplikatorværk, men hvad der er lige saa vigtigt er, at der er en hukommelse, svarende til beregnerens papir. Og ganske som papiret bruges baade til at opbevare formlerne og tallene, kan EDSAC's hukommelse rumme baade instruktioner og tal. Hukommelsen er opdelt i bestemte pladser, som er nummererede fra nul og – for tiden – op til 511. Hver saadan plads kan rumme en elementær instruktion eller et femcifret tal. Hver elementær instruktion er af ganske simpel karakter. En ordre kan for eksempel hedde A 14 og det betyder: adder det tal som staar paa hukommelsesplads nr. 14 til sumværket, H 22 betyder: anbring i multiplikatorværket det tal som staar paa plads nr. 22. Ialt er der atten forskellige bogstaver som kan staa i en ordre. Foruden O- og I-ordrerne, som omtales særligt nedenfor, vil vi faa brug for følgende ni af dem:

A n Adder tallet paa plads nr. *n* til sumværket.
S n Subtraher tallet paa plads *n* fra sumværket.
T n Anbring sumværkets indhold paa plads nr. *n* og slet ud.
U n Anbring sumværkets indhold paa plads nr. *n*, men slet ikke ud.

H n Anbring tallet paa plads nr. *n* i multiplikatorværket.
V n Multiplicer tallet paa plads *n* med tallet i multiplikatorværket og adder resultatet til sumværket.
N n Multiplicer tallet paa plads *n* med tallet i multiplikatorværket og subtraher resultatet fra sumværket.
R Multiplicer tallet i sumværket med $\frac{1}{2}$.
E n Hvis tallet i sumværket er nul eller positivt, spring da hen til ordre nr. *n*, gaa ellers videre til næste ordre.

Hvert skridt af maskinens arbejde bestaar nu, ligesom den menneskelige beregners, i to tempi: først tager den en ordre fra hukommelsen, og derefter udfører den den. Normalt tager maskinen ordrerne een efter een, i den orden de staar i hukommelsen, men som det fremgaar, kan en E-ordre bevirke, at man springer hen og begynder fra et andet sted.

Ethvert tal, som staar i hukommelsen, sumværket eller multiplikatoren, vil blive staaende, indtil maskinen adlyder en ordre, som bevirker, at det ændres. Saaledes vil for eksempel det tal, der staar paa plads nr. 8, kun forsvinde, ved at der skrives noget andet i stedet, det vil sige, ved at maskinen adlyder enten ordren T 8 eller U 8. Et tal, der ved en H-ordre er anbragt i multiplikatorværket, vil kunne bruges saa mange gange, man ønsker det. Kun en ny H-ordre vil faa det til at forsvinde. Hvorvidt maskinen arbejder eller af en eller anden grund er standset, berører ikke indholdet af hukommelsen.

Maskinen har kun eet ytringsmiddel, nemlig en fjernskriver. Denne styres ligesom alt maskinens arbejde ved hjælp af ordrer, som findes i hukommelsen. Hver O-ordre bevirker, at eet tegn trykkes, men naar et tal i maskinen skal trykkes, sker det i reglen ved, at man faar maskinen til at adlyde en hel serie ordrer, en saakaldt „sub-routine". Disse ordrer sørger dels for, at tallet, som er opbevaret i 2-talsystemet[1]), omregnes til decimalsystemet, og dels for, at cifrene bliver trykt eet efter eet af fjernskriveren.

Paa ganske samme vis er der kun een maade, hvorpaa man kan give oplysninger til maskinen. Det er i form af perforerede papirstrimler. Hullerne er anbragt i rækker paa tværs af strimlen med mulighed for fem i hver række. Papirstrimlen anbringes i en særlig læsemekanisme, og naar maskinen møder en I-ordre, læses den næste række huller, og der anbringes et tilsvarende tal i hukommelsen. Igen bruger man i regelen en sub-routine ved læsningen. Hvis det er et tal, man skal læse, maa man altsaa sørge for, at cifrene paa papirstrimlen, som altid gives i decimalsystemet, bliver omregnet til 2-talsystemet.

1) Om 2-talsystemet se f. eks. N. A. T. 1951 s. 53. *Red.*

Ordrerne i maskinen svarer ganske nøje til beregnerens formler, og arbejdet med at bruge maskinen paa et problem bestaar i at omdanne det til en saadan form, at det kan løses ved at maskinen udfører en række af de ordrer, som er til raadighed. Langt det bedste indtryk af, hvad det drejer sig om, faar man ved at se et eksempel, og vi vil derfor gennemgaa løsningen af et problem, selv om det vil medføre, at vi kommer til at bruge lidt matematik. Vi vil forklare, hvordan man kan beregne funktionen $1/x\sqrt{x}$ med maskinen. Altsaa givet et tal x vil vi finde det tal, som fremkommer ved først at gange x med sin kvadratrod og derefter dividere 1 med resultatet. Maskinen kan umiddelbart kun addere og multiplicere, saa aabenbart maa der anvendes noget matematisk hokus-pokus. Det bestaar i at bruge en saakaldt iteration. Denne skrives i vort tilfælde

$$y_{n+1} = y_n(3/2 - \tfrac{1}{2}x^3y_n^2).$$

Meningen hermed er: Vi gætter os til en værdi for resultatet. Dette tal kalder vi y_0. Nu siger formlen, at vi faar en bedre værdi for resultatet, altsaa et tal som ligger nærmere det rigtige, ved at indsætte y_0 paa højre side af lighedstegnet i stedet for y_n. y_1 er altsaa bedre end y_0. Men nu kan vi sætte y_1 ind i ligningen og faa en endnu bedre værdi y_2. Og saadan kan vi blive ved, indtil vi er nær nok ved det rigtige. At vi er det, kan vi se deraf, at to paa hinanden følgende resultater kun afviger meget lidt fra hinanden. Det var nu den første del af problemet: vi har reduceret opgaven til noget, som maskinen kan klare, for vi ser, at i ligningen forekommer kun multiplikationer og additioner.

Nu kommer anden afdeling af opgaven: at skrive den i maskinens kode. Vi vil antage, at vi allerede har udregnet x^3 og anbragt det paa plads nr. 1, og at y_0 staar paa plads nr. 2 og tallet 3/2 paa plads nr. 3. Løsningen af problemet bliver nu følgende ordrer, som vi tænker os anbragt fra plads 50 og fremefter:

50	H	2	Anbring y_0 i multiplikatorværket.
51	V	2	Multiplicer det med sig selv og læg til sumværket.
52	T	4	Anbring resultatet ($= y_0^2$) paa plads 4 og slet sumværket.
53	H	4	Anbring y_0^2 i multiplikatorværket
54	N	1	Multiplicer det med x^3 og subtraher fra sumværket
55	R		Multiplicer tallet i sumv. ($= -x^3y_0^2$) med $\tfrac{1}{2}$
56	A	3	Adder 3/2 til sumværket
57	T	4	Anbring resultatet ($3/2 - \tfrac{1}{2}x^3y_0^2$) paa plads 4 og slet sumv.
58	H	4	Anbring $3/2 - \tfrac{1}{2}x^3y_0^2$ i multiplikatorværket
59	N	2	Multiplicer med y_0 og subtraher fra sumværket

60	U	4	Anbring tallet i sumv. i nr. 4 uden at slette sumv.
61	A	2	Adder y_0 til sumværket, saaledes at $y_0 - y_1$ dannes
62	E	67	Hvis sumværket er negativt, gaa da videre med næste ordre, hvis det er nul eller positivt, spring da hen til ordre nr. 67
63	T	2	Slet sumværket
64	S	4	Subtraher $-y_1$ fra sumværket
65	T	2	Anbring $-(-y_1) = y_1$ paa plads 2.
66	E	50	Spring, da sumværket er nul, op til ordre nr. 50.
67	. . .		

Ordrerne 50-60 sørger for at y_{n+1} bliver udregnet efter formlen. Denne størrelse anbringes paa plads 4 og staar ogsaa i sumværket, begge steder med omvendt fortegn. Ved at man adderer y_n dannes $y_n - y_{n+1}$. Nu kan man af formlen udregne, at y_{n+1} altid maa være større eller lig med y_n, hvis man blot vælger y_0 paa passende maade, og $y_n - y_{n+1}$ vil altsaa være negativ. Ordrerne 63-66 sørger for, at y_{n+1} kommer til at erstatte y_n, hvorefter man springer op til ordre nr. 50 og begynder forfra paa spillet. Kun naar de to tal y_n og y_{n+1} er lige store, springer man fra ordre 62 til ordre 67 og udfører hvad der nu videre findes af instruktioner. At y_n og y_{n+1} er lige store, er netop tegn paa, at vi har naaet resultatet, og det findes nu paa plads nr. 2 parat til videre brug.

Dette eksempel giver forhaabentlig et indtryk af, hvordan man maa behandle et problem, før det kan løses med maskinen. Især illustrerer det brugen af betingelsesordren, E-ordren paa plads 62. Den muliggør, at de samme ordrer adlydes flere gange – og netop saa mange gange, som er nødvendigt. Ved udstrakt brug af dette princip kan man i høj grad reducere det antal ordrer, som er nødvendigt i en beregning. Iøvrigt er det maaske ikke overflødigt at nævne, at vort eksempel kun er en lille smule forenklet. Der er set bort fra afrundingen af tallene, og fra, at iterationsformlen kun giver det rigtige resultat, naar x ligger inden for visse bestemte grænser.

Det var nu lidt om det skrivebordsarbejde, som gaar forud for brugen af maskinen. Vi kommer nu til den anden del af problemet: at faa prøvet det med maskinen. Som nævnt er der kun een maade, vi kan give maskinen oplysninger om, hvad den skal gøre: gennem perforerede papirstrimler. Disse er 18 millimeter brede og giver plads til en række symboler, som bestaar af rækker af indtil fem huller i bestemte positioner. Hver saadan række med indtil fem huller giver, som man let kan udregne, 32 forskellige muligheder. Strimlerne er meget lette at fremstille, da man har apparater ganske som skrivemaskiner, som blot trykker huller i strimlen i stedet for at skrive bogstaver. Disse apparater har altsaa netop 32 forskellige tangenter. Nu ligger sagen meget simpelt, for det, vi skal trykke, er netop de symboler, som vi nedskrev ovenfor, sammen med nogle faa ekstra, som sørger for, at oplysningerne gaar hen paa de rigtige pladser i hukommelsen. Paa laboratoriet er der et værelse med adskillige saadanne apparater, og der er apparater til at kopiere strimler og til at sammenligne to strimler for at afgøre, om de er ens. Her findes ogsaa det, der er næsten lige saa vigtigt som maskinen selv: biblioteket med færdige metoder. Værdien af et saadant bibliotek er indlysende. Det vil gang paa gang ske, at man har brug for de samme metoder som dele af forskellige problemer. I stedet for da at udarbejde dem paa ny hver gang, laver man en gang for alle en løsning, som kan indføjes som led i en større helhed, d. v. s. en subroutine. Det sparer naturligvis en mængde tid. Biblioteket bestaar af et metalskab fuldt af papirstrimler, svarende til de forskellige subroutiner. Der finder man for eksempel metoder til at udregne logaritmer, sinus og cosinus funktioner, til at løse differentialligninger og ogsaa de læse- og trykkesubroutiner, som vi nævnte ovenfor. Hvis man har brug for en sinus et sted i et problem, finder man den rigtige strimmel i biblioteket og kopierer den over paa sin strimmel, forsynet med nogle faa ekstra symboler. En subroutine bestaar af en række ordrer ganske som ethvert andet problem, men ved brugen behøver man slet ikke bekymre sig om, hvordan den virker i enkeltheder. Det er gennemtænkt og kontrolleret een gang for alle.

Resultatet af arbejdet med strimmelmaskinerne er en — ofte lang — strimmel. Den giver hele problemet, og vi er nu parat til at prøve med maskinen. Hvilket dog ikke betyder, at den er parat til at prøve med os. Der er mange, der arbejder med den, og man maa naturligvis vente i en kø. Der er to af dem, een for eksperimentelt arbejde, som muligvis endnu ikke virker rigtigt, een med færdigt produktionsarbejde. Hvis køen er lang, kan man blot hænge sin strimmel paa sin klemme med en seddel til operatøren om, hvordan den burde virke. Men ofte kan man hurtigt selv komme til — og man venter i regelen gerne lidt for at se, om ens problem nu faktisk virker. Naar det saa bliver ens tur, faar man selv lov til at betjene maskinen. Det er ogsaa meget simpelt. Der er fire knapper at trykke paa, een som sletter ud alt det, der staar i hukommelsen, een til at standse maskinen, een til at sætte den i gang igen og endelig een til at gøre den parat til at tage et nyt problem ind. Vi anbringer altsaa vor strimmel i læsemekanismen, trykker først paa „Clear store“ knappen — saa ved man, hvor man er — og derefter paa startknappen. Det afføder en lyd som et maskingeværs knitren, og ti sekunder efter begynder læsemekanismen pludselig at blive levende og læser oplysningerne med forrygende fart. Saa vidt gaar alt i regelen smertefrit. Først naar slutningen af strimmelen naas, og det trivielle arbejde med at anbringe ordrerne i hukommelsen er forbi, og maskinen begynder at adlyde dem, bliver det spændende. Har man nu tænkt alle mulighederne igennem, og er strimlerne korrekte? Det er ikke svært at afgøre, om der er noget galt. Ofte standser maskinen, hvilket let ses fra katodestraalerørene. Sommetider gaar den i ring, bliver ved at komme tilbage til den samme ordre. Spørgsmaalet er nu: hvad er der galt? Det er selv sagt umuligt at følge, hvad der sker. Maskinen adlyder normalt op mod tusinde ordrer i sekundet. Een maade at finde ud af, hvad der sker, er at lade maskinen udføre ordrerne een for een, og samtidig undersøge paa katodestraalerørene, om den har gjort det, man har tænkt sig. Det er imidlertid en meget ineffektiv metode, der tager en mængde tid baade for een selv og — hvad værre er — for maskinen. Langt bedre er det at bruge en af de kontrolroutiner som findes i biblioteket. Princippet er ganske enkelt: hvorfor bryde sin hjerne med at finde ud af, hvad maskinen laver, naar vi kan faa den til selv at fortælle os det. Som oftest vil man med det samme, naar man laver sin strimmel, ogsaa anbringe en kontrolroutine paa den. De hyppigst anvendte kontrolroutiner virker nu saadan, at ordrerne i ens problem adlydes normalt, men samtidig trykkes hver gang bogstavet paa den ordre, som er udført. I vort eksempel ville vi altsaa faa trykt paa papiret: HVTHNRATHNUAETSTEHVT.... Selv om problemet nu løses meget langsommere – for hver oprindelig ordre adlydes nu en hel række andre, som sørger for, at dens navn bliver trykt – er denne kontrol baade langt hurtigere og bekvemmere end det at adlyde en ordre ad gangen. Der trykkes nemlig omkring fem bogstaver i sekundet og man kan saa senere i ro og mag finde ud af, hvad der er gaaet for sig, i særdeleshed hvor det ikke gik, som man havde tænkt sig.

Alle disse problemer hører naturligvis kun til forberedelsen af problemet. Naar man een gang har faaet udryddet alle fejltagelser, vil man være i besiddelse af en permanent løsning. Saa kan man anbringe det i produktionskøen og faa løn for sin møje i form af en mængde resultater.

Hidtil har vi kun talt om maskinen fra forbrugerens synspunkt. Nu kommer vi til det ganske andet spørgsmaal om de midler, som bliver anvendt for at faa den til at gøre disse ting for os. Principielt er det ikke saa forfærdelig indviklet, men i praksis bliver det hele lidt kompliceret, og vi vil nøjes med at tale om de vigtigste principper i maskinen, først og fremmest den maade den opbevarer tallene paa, og iøvrigt henvise til Thernöes artikel i NAT's sidste hæfte.

Tallene og ordrerne opbevares i 2-talsystemet, altsaa ikke i titalsystemet. Et tal bestaar saaledes af en række „binaler“, svarende til decimaler, som hver enten kan være 0 eller 1. I maskinen findes de nu i form af en række strømstød, som følger efter hinanden i tiden. Problemet er nu: hvorledes kan man opbevare en saadan række strømstød, saaledes at man hurtigt kan faa fat i dem igen? Dette problem løses af en forsinkelsesanordning. Denne bestaar af et langt rør fyldt med kviksølv. I hver ende af røret er der anbragt en kvartskrystal, den ene til at afsende og den anden til at modtage lydimpulser. Naar man nu skal opbevare en serie impulser, sker det paa den maade, at man først laver hver enkel af dem om til et kort „dyt“, altsaa til en tone af ganske kort varighed. Det er ikke en sædvanlig tone – frekvensen er 13.5 millioner svingninger i sekundet, at sammenligne med frekvensen 30000, som er grænsen for hørligheden for de fleste mennesker. De korte lyde udsendes nu fra den ene kvartskrystal og løber saa med lydens hastighed ned gennem kviksølvet i røret. Saa snart de ankommer til den anden ende, sendes de ad elektrisk vej tilbage til begyndelsen igen, een efter een, og paa den maade bliver de ved med at løbe rundt i dette kredsløb, saa længe man har brug for det. Hvor mange impulser, der kan rummes i et rør, afhænger af dets længde og af, hvor hurtigt impulserne følger paa hinanden. I Cambridge kan der komme mere end en halv million impulser i sekundet, og før en bestemt af dem har gennemløbet et rør, som er ca. halvanden meter langt, er der tid til at endnu 576 impulser kan være paa vej ned gennem røret. Man maa naturligvis holde nøje regnskab med, hvornaar man sender en bestemt række impulser ind i et rør, for det er den eneste maade at vide, hvornaar de kommer til syne igen. En væsentlig del af maskinens kontrolsystem har derfor til opgave at sørge for, at der bliver lukket op og i for forbindelserne mellem de forskellige dele af maskinen til de rigtige tider.

I dette princip for maskinens hukommelse finder vi forklaringen paa de to ord i dens navn: Delay Storage. De maa nærmest oversættes ved forsinkelses-oplagring.

Hukommelsestankene kan som nævnt hver indeholde 576 impulser, svarende til 16 ticifrede tal. I den del af maskinen, som udfører de aritmetiske operationer, den aritmetiske enhed, findes der desuden nogle korte tanke, som kun indeholder et enkelt tal. De aritmetiske operationer udføres af forskellige radiorørsystemer, hvoraf det vigtigste er en adderanordning. Naar man skal addere to tal, sender man samtidig de to impulsserier ind i denne, og saa kommer resultatet ud af en tredie ledning, igen i form af en serie impulser. Multiplikationer udføres som en række additioner, som er automatisk koblet sammen.

Til sidst er der et spørgsmaal, som er af overordentlig betydning for maskinens brugbarhed, nemlig hvor stabil den er. Det er klart, at der let kan ske noget galt i et system, som indeholder over 3000 radiorør og en tilsvarende mængde af andet skørt materiale. Erfaringerne som er gjort i Cambridge, er, at effektiviteten varierer meget. I maskinens bedste perioder, som fra november 1950 til hen i marts 1951, arbejder den effektivt i gennemsnitlig 60-70 % af den tid, den er slaaet til. Resten af tiden gaar væsentlig med at varme den op og foretage mindre rettelser i den. Til gengæld hænder det ogsaa, at der er noget alvorligt i vejen, som det tager dage eller maaske endda uger at faa effektivt repareret. Dertil kommer, at maskinen stadig er paa det eksperimentelle stadium i den forstand, at der arbejdes med forbedringer af den. Det vil naturligvis ogsaa fortsat tage noget af dens tid.