

STICHTING
MATHEMATISCH CENTRUM
2e BOERHAAVESTRAAT 49
AMSTERDAM

DR 5

Algemeen overzicht van moderne rekenmachines.

A. van Wijngaarden.



1949

Printed at the Mathematical Centre, 49, 2e Boerhaavestraat, Amsterdam.

The Mathematical Centre, founded the 11-th of February 1946, is a non-profit institution aiming at the promotion of pure mathematics and its applications. It is sponsored by the Netherlands Government through the Netherlands Organization for the Advancement of Pure Research (Z.W.O), by the Municipality of Amsterdam, by the University of Amsterdam, by the Free University at Amsterdam, and by industries.

Commissie Werk. (Sociale) *Programma 20 dagen*
win. vordrecht
26 III *tech. hielden in* *academ. vordrecht, 2. 1949*
14 Mei. *23 mei.* *5*
11/11/49

Concept Lezing

Algemeen overzicht over moderne rekenmachines

door
Dr. Ir. A. van Wijngaarden,
Mathematisch Centrum,
Amsterdam
op
14 Mei 1949.

D. 5.

Onder een rekenmachine versta ik in het volgende elke fysische constructie, welke gemaakt is met de bedoeling om min of meer ingewikkelde berekeningen uit te voeren. Onder deze definitie vallen apparaten, waarvan het zo duidelijk is, dat zij rekenmachines zijn, dat zij die naam ook in het dagelijks leven dragen, n.l. de rekenmachines, welke men, althans in normale tijd, in de winkel kan kopen. Deze zullen wij hier aanduiden als tafelrekenmachines (TRM). Maar ook vallen onder de definitie laboratoriumopstellingen, welke niet zo gemakkelijk als zodanig worden herkend. Spant een physicus een dun rubbervlies of een zeepvlies over een aantal obstakels en meet hij de vorm van het vlies om zekere fysische wetten te onderzoeken, dan is deze laboratoriumopstelling een fysisch experiment. Vertrouwt hij echter op de geldigheid van bekende wetten, dan kan hij de opstelling als rekenmachine gebruiken, n.l. om zekere potentiaalvraagstukken in twee dimensies op te lossen. Essentieel is de overgang van het fysische gebeuren naar een wiskundig probleem, dat van wijdere strekking is. Zuiver modelonderzoek is niet als rekenen te duiden.

Het is dus al duidelijk, dat een rekenmachine velerlei vormen en eigenschappen kan bezitten. Aan de beide genoemde voorbeelden, de TRM en het rubbervlies kan men reeds een aantal belangrijke kenmerken onderscheiden.

De eerste en zeer fundamentele onderscheiding is deze, dat de TRM een zgn. digitale machine en het rubbervlies een analogonmachine is. Een digitale machine (naar het Engelse woord "digit" voor cijfers in een getal) rekent met eenheden (registers of telwerken van de TRM) welke fysische toestand (de stand van de telwielletjes van de TRM) een getal definieert als een bepaalde groepering van cijfers. Elke component van deze eenheden (dus een telwielletje van de TRM) kan slechts in evenveel fysisch te onderscheiden toestanden verkeren als de basis van het gebruikte telstelsel bedraagt (dus 10 bij de TRM). Tussenposities zijn bij juist functioneren van het apparaat uitgesloten en in elk geval zinloos. Natuurlijk berust de werking van de machine op fysische wetten, maar veelal van zulk een eenvoudig karakter, dat men ze nauwelijks als zodanig zou herkennen, b.v. dat bij een gave tandwieloverbrenging niet af en toe een tand van een van beide wielen kan worden overgeslagen.

Bij een analogonmachine wordt de grootte van de verwerkte wiskundige grootheden door de waarde van zekere fysische grootheden, bijv. de uitwijking van het rubbervlies, een potentiaalverschil, een stroomsterkte, een uitwijking op het scherm van een kathodestraaloscillograaf, een aantal omwentelingen van een as, enz. voorgesteld, welke i.h.a. continu veranderen, maar slechts met een eindige, door fysische meetmethoden bepaalde precisie gemeten kunnen worden. De werking van de analogonmachine berust op de equivalentie van het op te lossen wiskundige probleem en de fysische wetten, waaraan het apparaat onderworpen geacht wordt, b.v. de differentiaalvergelijking van de uitwijking van het rubbervlies en de randvoorwaarden, gedefinieerd door de vorm van de obstakels. Deze wetten zijn van veel minder elementaire natuur dan die, waarop de werking van de digitale machine berust, en vrijwel immer slechts grove benaderingen van de werkelijkheid. Vandaar dan ook, dat de eindige meetnauwkeurigheid doorgaans al veel te goed is, in die zin, dat ze in de verleiding brengt nauwkeuriger te meten dan verantwoord is met het oog op de onvolledige equivalentie tussen het wiskundige probleem en het fysisch gebeuren. Hoe dan ook, het resultaat van rekenen met een analogonmachine is beperkte precisie, meestal niet beter dan 1% en zelden zo goed als 0,01%. Met een digitale machine als een TRM kan men althans in principe, b.v. als men genoeg tijd van leven heeft, iedere gewenste precisie behalen.

Een ander verschil tussen een TRM en een rubbervlies is de graad van automatisme. Immers na een aantal voorbereidingen, b.v. het plaatsen van de obstakels (definitie van de randvoorwaarden) en spannen van het vlies (definitie van de differentiaalvergelijking) wordt het vraagstuk automatisch door het

vlies opgelost en men behoeft slechts met een geschikt meetapparaat (hoogtemeter gecombineerd met een coördinatenmeter) de uitwijking van het vlies te meten in elk punt, waar men de oplossing wenst te kennen. Een TRM is niet automatisch afgezien eventueel van enkele zeer elementaire bewerkingen als vermenigvuldigen en delen, zodat het oplossen van hetzelfde vraagstuk als waarvoor het rubbervlies dient, vereist voortdurend handelen van de rekenaar benevens papier en schrijfgerei.

Een derde verschil is de universaliteit. Met een TRM kan men allerlei vraagstukken oplossen, maar met een rubbervlies slechts een zeer bepaalde klasse, n.l. welke betrekking hebben op bepaalde potentiaalvraagstukken in twee dimensies.

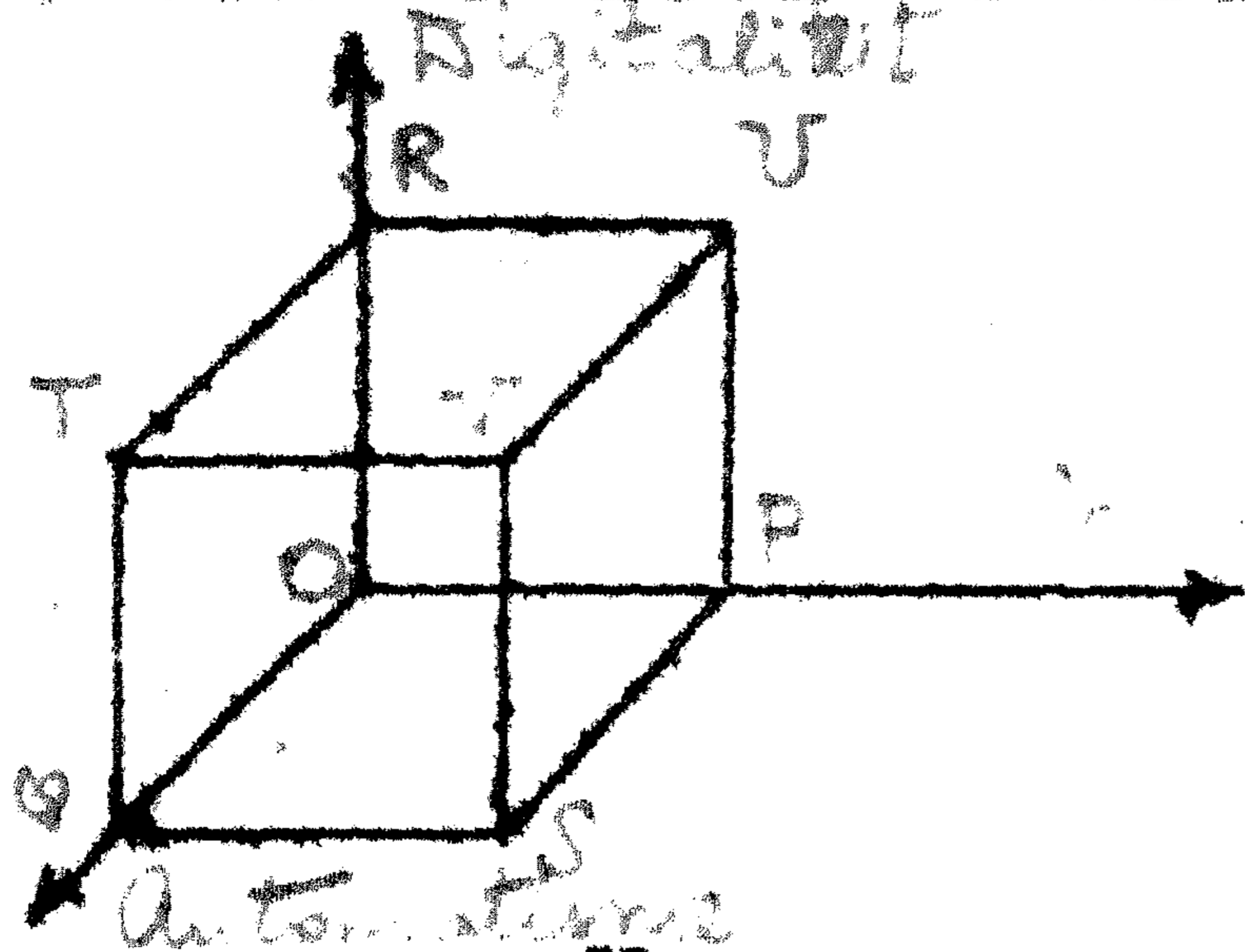
Een vierde verschil is de commercialiteit. Hieronder versta ik de mate van het "over de toonbank" verkrijgbaar zijn van de machine. Een TRM wordt in grote series gefabriceerd en biedt derhalve buitengewoon veel voor zijn prijs en goede service wordt er bij verstrekt. Een rubbervliesapparaat moet speciaal gemaakt worden en is derhalve, hoe eenvoudig ook, relatief kostbaar. Daar staat tegenover, dat niet de wiskundige de klant is, waarvoor de TRM gemaakt wordt, zodat de commerciële machine doorgaans niet voorzien is van alle faciliteiten, die de wiskundige gaarne aanwezig zag. Een TRM zou voor de wiskundige aanzienlijk aan belang winnen door het aanbrengen van enkele kleine toevoegingen, als b.v. wat registers, waarin tussenresultaten konden worden opgeborgen en waaruit ze weer aan de machine toegevoerd konden worden. Was dit voor de commerciële toepassingen ook belangrijk, dan zou er zeker in voorzien worden door de fabrikanten voor luttel extra kosten. Wenst men ze speciaal aan te brengen, dan kost het een kapitaal.

Een vijfde verschil is de graad van parallelisme. Een rubbervlies pakt het vraagstuk op alle punten tegelijk aan, rekent als het ware met een heirleger van kleine rekenartjes tegelijk, welke alle slechts hun eigen omgeving overzien. Met een TRM moet men van punt tot punt springen, daarbij het geheel steeds in het oog houdend.

Een ander verschil is de snelheid en bij bepaalde vraagstukken werkt het rubbervlies zeker sneller dan de TRM.

Wanneer men grote berekeningen heeft uit te voeren zij men zich goed bewust van de gewenste eigenschappen van de te gebruiken rekenmachines. Als tegen één regel vaak gezondigd is, is het wel die om eerst te zien of een bestaande commerciële machine het werk niet kan verrichten. Vele speciaal te maken machines kwamen nooit klaar (~~Babbage~~). Andere kwamen juist klaar om ongebruikt te verroesten (b.v. de cinema-integraaf van Busch voor het oplossen van integraalvergelijkingen en Wilbur's mechanische machine voor het oplossen van lineaire algebraïsche vergelijkingen), terwijl de meeste in elk geval economisch onverantwoord zijn (b.v. Mallock's elektrische pendant van Wilbur's machine). Waarschijnlijk zullen slechts twee grote types speciale machines hun bestaansrecht blijvend bewijzen, n.l. de differentiaalanalysator en de automatische digitale machine (relaismachine of elektronische machine), waarover U in de volgende lezingen nog allerlei zult horen. De prijs van een TRM zowel als het jaarsalaris van de rekenaarster bedraagt enige KG (G=gulden), die van de grote speciale machines van de orde van 100 KG tot enige MG. Maar er zijn vraagstukken te over, wier oplossing van groot belang is doch zo lang zou duren met TRM's, dat het vraagstuk alle belang verloren zou hebben als de berekening beëindigd was. In deze tijdsfactor ligt de grote betekenis van de supermachine. Bereikt is op het ogenblik een snelheid van ca. 10^3 à 10^4 maal die van de met de TRM uitgeruste rekenaar. Waarschijnlijk zal een extra factor van 10^2 binnen een decennium wel bereikt worden. Om deze snelheden te bereiken zijn belangrijke overwegingen over het functioneren van een rekenmachine in het rekenproces nodig. Alvorens hier wat nader op in te gaan, wil ik U echter op grond van de bovenvermelde eigenschappen, een vluchtige classificatie van rekenmachines i.h.a. geven. Stel U een ruimte voor, een rekenmachineruimte, waarin elk punt een rekenmachine-type voorstelt. De ruimte is veeldimensionaal. De dimensies zijn eigenschappen als digitaliteit, automatisme, commercialiteit, universaliteit, parallelisme, prijs, snelheid, betrouwbaarheid, volume, kleur, enz. Met het oog op de voorstelbaarheid zal ik de projectie van deze ruimte op de driedimensionale ruimte gevormd door de dimensies digitaliteit, automatisme en commercialiteit. Met enige goede wil kan men zich daarvan een kubus voorstellen, waarvan de zijvlakken betekenen: praktisch niet of praktisch geheel digitaal, resp. automatisch,

resp. commercieel verkrijgbaar.



In het vlak OPQS liggen de analogonmachines. De meeste ervan liggen langs OP. De oorsprong O is b.v. een museum-exemplaar van een rekenschuif. Het punt P b.v. een gewone rekenschuif. Het punt Q b.v. een differentiaal-analysator (DA) of een rubbervlies. Het punt S bijv. een speciale integreermachine in de vuurleiding van het afweergeschut.

In het vlak RUVT liggen de zuivere digitale machines. R is b.v. een museum-exemplaar van een TRM, U een TRM of een abacus, V een ponskaartenmachine, T de automatische digitale machine (ADM) te weten de relaisrekenmachine (RRM) of een elektronische rekenmachine (ERM).

Natuurlijk is er voortdurend variatie in het schema. In het algemeen is er een voortdurende tendens tot commercialiteit en automatisme. Overgangen tussen digitaal en analogon zijn zeldzaam (de filmrekenlineaal of de stapstap servoeenheid en de functieeenheid bij DA). Maar er is een duidelijke neiging in de laatste jaren naar digitaliteit. De algemene tendens is dus een algemene verwijdering van de oorsprong, de ruimte drijft dus uit.

Naast de bekende TRM wijzen we nog speciaal op de DA en de ADM, omdat wij hieraan vandaag nog veel tijd zullen wijden. De DA, waarover Prof. Zernike U zal vertellen, is geheel of hoofdzakelijk een analogonmachine van het oplossen van gewone differentiaalvergelijkingen. De variabelen van het probleem worden voorgesteld door de hoek waarover bepaalde assen vanaf een zekere begintoestand draaien. Zij bezit als meest interessante eenheden integratoren, die $\int y dx$ uitrekenen; voorts optellers, functietafels, enz. De ADM is een super TRM, die na ontvangst van instructies op zuiver digitale wijze elk numeriek probleem kan oplossen. Zij is snel, omdat zij relais- of elektronische schakelingen gebruikt i.p.v. mechanische schakelingen als tandwielen. Hierover zal de Heer van der Poel U het een en ander vertellen.

Evenals diersoorten in al hun verscheidenheid zekere organisatievormen gemeen hebben als spijsvertering, ademhaling, voortplanting en evenals het gemakkelijker is deze als zelfstandige organen te onderscheiden bij de hogere dieren dan bij de lagere dieren, zo bezitten alle rekenmachines zekere organen, welke noodzakelijk zijn voor de werking, maar welke bij de eenvoudige vormen vaak moeilijk als zodanig te onderscheiden zijn. Dit zijn:

- A) Rekenkundig orgaan
- B) Geheugen
- C) Besturing
- D) Invoer en uitvoer.

Allereerst het rekenkundig orgaan. Het is duidelijk, dat dat aanwezig moet zijn, anders was de machine geen rekenmachine. Bij digitale machines vinden wij het als een duidelijk onderscheidbare eenheid, uitgerust met tandwielen, relais of elektronenbuizen. Bij een analogonmachine is het soms zeer moeilijk onderkenbaar, b.v. bij het rubbervlies, soms duidelijk zichtbaar, b.v. de integrators en de optellers van de DA. Dat men met mechanische hulpmiddelen als tandwielen kan rekenen is wel duidelijk, ook al weten wellicht niet velen, hoe men zelfs zo iets eenvoudigs als een optelling er mee zou moeten realiseren. Een analogonmachine kan b.v. optellen of aftrekken door gebruik te maken van de wetten van Kirchhoff, vermenigvuldigen of delen door de wet van Ohm toe te passen, integreren met een condensator, differentiëren met een zelfinductie, enz., zoals men na kan gaan door de betreffende wetten in formule neer te schrijven.

Vervolgens het geheugen. Natuurlijk moet de machine enig geheugen hebben, want anders kon ze de getallen, waarmee ze op een bepaald moment manipuleert niet tijdens dit proces onthouden. Dit minimum aan geheugen bezit b.v. een TRM in zijn drie registers (instelregister, omwertelingsregister en resultaatregister) alsmede een rekenschuif (de plaats van de schuif t.o.v. de lineaal en de plaats van de loper t.o.v. de lineaal en de onderlinge positie van de schaalverdelingen). In een meer dan elementaire berekening moet papier en potlood te hulp geroepen worden om gegevens of tussenresultaten voor later gebruik in de berekening te bewaren. De

automatische machines moeten hiervoor dus een speciaal orgaan bezitten. Ook de instructies voor de berekening moeten onthouden worden. Dit kan soms met hetzelfde orgaan, soms met twee streng gescheiden geheugenorganen geschieden. Een DA onthoudt b.v. in de differentiaalvergelijking voorkomende functies als grafieken op zg. functietafels getekend of numeriek gegeven in functieeenheden. Daarentegen onthoudt hij de differentiaalvergelijking zelf in de aangebrachte mechanische of servo-koppeling van zijn assen en het recept voor integratie in de constructie van zijn integratoren. Als wij deze scheiding analyseren, zien wij dat er hier twee zaken herinnerd worden. Ten eerste nl. de oerfuncties, welke van tevoren vastliggen en voorts de berekeningsinstructies, welke op ieder moment gelden. De eerste worden onthouden in de functietafels of functieeenheden en de laatste in een groot parallel geheel van rekenorgaanelementen (integratoren, koppelingen, etc.). Dit is voldoende om een gewone differentiaalvergelijking op te lossen. Maar het kan ook gebeuren, dat het op te lossen probleem algemeen is, b.v. doordat in de vergelijking naast de te berekenen grootheid $f(x)$ ook bijv. $f(x-1)$ voorkomt (differentiedifferentiaalvergelijking). Dan moet de machine dus ook geheugen hebben na langere tijd voor wat het zelf heeft berekend. Dit kan hier geschieden, omdat de uitkomsten van de berekening door de machine worden afgeleverd als grafieken, gelijk aan de reeds vermelde functietafels, waarvan de machine dus zelf de benodigde gegevens kan putten. Bij de DA bestaat het geheugen dus uit functietafels, welker inhoud tijdens de berekening niet verandert, uit een groot parallel stelsel van rekeneenheden en tenslotte uit functietafels, waarin de machine zelf opschrijft tijdens de berekening. Dit is dus al een hele organisatie, maar een DA is ook een hoog ontwikkelde analogomachine. Bij de ADM kan men in grote lijnen vaak een soortgelijke organisatie waarnemen. Ook hier wordt wel parallelisatie van rekenorganen toegepast, maar meestal beperkt men zich tot één enkel rekenorgaan en voert alle berekeningen in serie uit. Dan moet de machine beschikken over een aanzienlijk geheugenorgaan, een deel waarvan vaste gegevens kan bevatten (functies en vaste instructies), maar de rest waarvan beschrijfbaar en overschrijfbaar door en leesbaar voor de machine zelf moet zijn. Bij voorkeur moet dit zo ingericht zijn, dat het in staat is schoon schip te maken en gegevens en bloc van en naar een massaal geheugenapparaat te laten verhuizen. Het centraal geheugenorgaan moet i.h.a. voldoen aan de volgende voorwaarden:

A) Grote capaciteit; B) Grote snelheid; C) Inschrijfbaarheid, overschrijfbaarheid en leesbaarheid; D) Redelijke grootte en prijs.

De constructie van dit centraal geheugenorgaan is wel de grootste moeilijkheid van de ADM, want de bovenstaande eisen zijn bijna met elkaar in strijd. Zo voldoet de combinatie: mens + papier + potlood + stuf aan alle eisen, behalve B. Een relais- of elektronische schakeling kan alle eisen bevredigen, behalve D (dus b.v. wel geschikt voor een klein supersnel geheugenonderdeel). Een vaste bedrading met schakelaars kan voldoen aan alles behalve aan C (dus b.v. wel geschikt om functietafels in op te bergen).

Geponste kaarten (Hollerith) en banden (teletype) voldoen niet aan de eis van overschrijfbaarheid en maar matig aan B. Dit is voor niet te snelle machines al een niet duur en bereikbaar element. Band is sneller dan kaarten. Bij beide materialen wordt onderscheiden tussen twee fysische stabiele toestanden, n.l. al of niet aanwezig zijn van een gat, waardoor een stroomkring gesloten kan worden. Dat twee toestanden voldoende zijn, zal U nog door de Heer van der Poel nader verklaard worden. Waar ik hier op wil wijzen is de ongelijkwaardigheid van beide toestanden. Immers de ongeponste toestand is de normale toestand van het materiaal. Noemen wij de twee toestanden 0 en 1, dan bestaat het 0-signaal eenvoudig uit het afwezig zijn van het 1-signaal. Dat is een gevaarlijke taktiek. Immers omissie van een signaal heeft een 0 ten gevolge.

Al deze bezwaren treden niet op bij de magnetische draad of band, bekend uit de geluidswaergavetechniek. Hier worden 0 en 1 voorgesteld door magnetisatie met tegengestelde polariteit en omissie van het signaal betekent een ongemagnetiseerde toestand, die geweigerd kan worden door de leesapparatuur. De snelheid kan worden opgevoerd tot vele m/sec. Zonder gevaar voor onleesbaarheid van het signaal kan men enkele miljoenen signalen op een km draad aanbrengen, wat nog maar een uiterst bescheiden volume inneemt. Voor

het massale geheugen is dit derhalve een uitstekend materiaal. Voor het centrale geheugen is het echter niet bar geschikt, want het zoeken van een enkel signaal op bepaalde plaats kost relatief veel tijd. Men kan evenwel magnetisch materiaal aanbrengen op een snel roterende niet-magnetische trommel. Men kan dan op een klein trommeltje vele duizende signalen aanbrengen, welke één keer per omwenteling ter beschikking staan om afgelezen te worden (n.l. wanneer ze voorbij de leesapparatuur draaien). De gemiddelde wachttijd van een dergelijke trommel is dus een halve omwentelingstijd, dus b.v. 10 msec., een alleszins redelijk getal voor een snelle relais-machine. Om kortere wachttijden te krijgen moet men overgaan tot minder mechanische systemen. Een uit de radartechniek voortgekomen hulpmiddel is de acoustische verdragingslijn. Een buis is gevuld met kwik en aan beide zijden afgesloten. Aan beide uiteinden is een kwartsplaatje aangebracht, eenzijdig in contact met het kwik. Op het linker kwartsplaatje worden elektrische pulsen toegevoerd (1-sigitaal) of met (0-sigitaal). Tengevolge van piezoelectrische koppeling gaat dat kwartsplaatje even mechanisch trillen, welke trilling zich als een acoustische trilling door het kwik voortplant en door het rechtse plaatje opgevangen wordt, zodat weer een zwak elektrisch signaal kan worden afgenomen, dat na versterking en fatsoenering weer toegevoegd wordt aan de linkerzijde. Stel b.v. de frequentie van de pulsen 1 Mc en de loopduur van de acoustische trilling 1 msec., dan kan op deze wijze een trein van 1000 signalen rond blijven lopen. De wachttijd bedraagt in dit geval gemiddeld 500 μ .sec., wat zonder de capaciteit te verminderen door opvoeren van de puls-frequentie met de huidige technische mogelijkheden nog wel gedrukt kan worden tot 100 μ sec.

Nog snellere apparaten kan men maken door op het isolerende scherm van een kathodestraalbuis of meer ingewikkelde buizen kleine ladingen op bepaalde plaatsen te schrijven met behulp van een electronenstraal. Deze lading lekt natuurlijk vrij spoedig weg, zodat maatregelen moeten worden getroffen ter fixering. Dit kan nog op verschillende wijzen geschieden. Men kan n.l. binnen de vervaltijd van de lading met de straal op dezelfde plaats terugkomen en op grond van zekere daarbij optredende effecten nagaan wat de toestand ter plaatse was (geladen of niet geladen) en deze herstellen. Een andere methode berust op het fixeren met een electronendouche, een permanente langzame electronenbestraling op het gehele scherm. Is op een bepaalde plaats een negatieve lading aanwezig, dan vallen daar de electronen van de douche met relatief kleine snelheid in. De secundaire emissiefactor is dan kleiner dan 1, zodat de negatieve lading wordt versterkt en de potentiaal van de plek neergedrukt wordt tot practisch die van de kathode van de douche. Is een plek daarentegen positief, dan slaan de electronen van de douche hard in en worden meer secundaire electronen geëmitteerd dan er invallen, zodat de potentiaal opgevoerd wordt tot practisch die van het rooster, dat tot taak heeft de secundaire electronen te vangen. De douche stabiliseert dus de bestaande potentiaalverdeling. Uitgebreide apparatuur is nodig om de plaats van de ladingen vast te leggen, de te lezen gebieden te selecteren, enz. Men kan met dit soort hulpmiddelen zeker tot wachttijden van 10 à 100 μ sec. komen.

De invoer en uitvoer van de machine, welke het contact met de buitenwereld onderhoudt, hangt nauw samen met het geheugen. De uitvoer is bij een analogonmachine meestal een meetinstrument, al of niet zelf-registrerend, b.v. de hoogtemeter van het rubbervlies, de tekentafels en omwentelingtellers van de DA. De invoer bestaat uit een instellingsmogelijkheid van fysieke grootheden als plaatscoördinaten, weerstanden, enz., b.v. de mogelijkheid om obstakels van bepaalde vorm op bepaalde plaatsen onder het rubbervlies te plaatsen.

Bij de ADM zijn het meestal elektrisch bediende pons- en schrijfmachines, vaak van het teletype-type, dat voor de telegrafie is ontwikkeld.

Tenslotte de besturing, het hart van de automatische machine. Het is het orgaan, dat op ieder moment bepaalt, wat het rekenkundig orgaan dient uit te voeren met welke gegevens uit het geheugen of wat ingevoerd uit resp. uitgevoerd in de buitenwereld dient te worden naar resp. uit het geheugen.

Bij de niet-automatische machines als TRM of rekenschuif berust de besturing bij de rekenaar. Bij de zg. automatische TRM is een eerste begin van besturing, b.v. voor het automatisch vormen van een kwadraat, doch pas

bij de echte automatische machines treedt de besturing als een belangrijk orgaan op. Bij de automatische analagonmachine zijn het vaak de fysische wetten zelf, die de besturing leveren. Bij het rubbervlies b.v. zijn het de elastische krachten, die door hun structuur wel gedwongen zijn om het vlies in de gewenste vorm te brengen. Zij doet dit overigens op ongeveer dezelfde wijze als de rekenaar dat doet, want ze voeren een iteratieproces uit, waarbij steeds functiewaarden gevarieerd worden, tot uiteindelijk een stabiele oplossing verkregen is, alleen met een infinitesimaliteit en een parallelisme, dat de rekenaar nooit kan evenaren. Bij de DA berust de besturing van de integratieprocessen bij de fysische wetten, die de integratoren beheersen, terwijl de elementaire wetten, die de koppeling beheersen ervoor zorgen, dat de gewenste differentiaalvergelijking blijft gelden.

Veel duidelijker treedt het orgaan op bij de ADM. Moet deze b.v. een differentiaalvergelijking oplossen, dan moeten haar zowel instructies gegeven worden over de differentiaalvergelijking alsook over de te volgen tactiek bij het uitvoeren van de integraties. Al zulke instructies kunnen gesteld worden in een gecodeerde vorm, niet te onderscheiden van getallen, welke in het geheugen van de machine opgeborgen kunnen worden. De besturing is het orgaan dat deze instructies kan begrijpen en de betreffende organen kan dwingen deze instructies op te volgen. De aard van de besturing zelf is te technisch om hier besproken te worden, maar wel wil ik nog iets vertellen over de aard van de instructies. Naast directe en van tevoren vastliggende instructies is het tegenwoordig mogelijk (en al door Babbage voorzien!) om twee zeer merkwaardige instructies te geven, welke de flexibiliteit van de machine fantastisch opvoeren. De eerste is de substitutie-opdracht, welke de machine in staat stelt zelf bepaalde gegevens te substitueren in reeds bestaande instructies, welke gegevens niet van tevoren bekend zijn, doch veel eerder het resultaat zullen zijn van de berekening. De tweede speciale instructie is de voorwaardelijke opdracht, welke de machine beveelt na te gaan of aan een bepaald criterium is voldaan en op grond van het resultaat hiervan te bepalen welke van twee instructies als volgende gekozen zal worden. Deze twee mogelijkheden geven de machine een schijn van eigen beslissingsmogelijkheid, waaraan ten onrechte de naam van "electronisch brein" te danken is. Toch schuilt er wel de mogelijkheid in om een groot deel van het programmeren van de berekening te laten verrichten door de machine zelf. Zo is het b.v. mogelijk een programma op te stellen, dat de machine leert om een matrix n maal n te inverteren zo, dat de machine, wanneer haar n^2 getallen toegevoerd worden met de mededeling, dat dit de coëfficiënten van een matrix zijn en met de opdracht deze te inverteren allereerst dit programma opzoekt, dan telt hoe groot n is, overal waar n voorkomt in de algemene opdracht dit vervangt door de gevonden waarde en dan aan het werk gaat, b.v. zo, dat, indien n beneden een bepaalde grens ligt, door directe rekening, doch wanneer n groter is volgens een iteratieproces, regelmatig controlerend of de vereiste precisie al bereikt is en eventueel, indien blijkt dat de convergentie niet voldoende is, overschakelend op een ander proces. Weliswaar is alles voorzien door de wiskundige en de machine is slechts een slaaf, maar de leider van een rekenteam zou zich wellicht toch gelukkig prijzen als zijn rekenaars zo nauwgezet hun lesje kenden!