

Drijfveren in de ontwikkeling van de electronica

Citation for published version (APA):

Groendijk, H. (1982). *Drijfveren in de ontwikkeling van de electronica*. Technische Hogeschool Eindhoven.

Document status and date:

Gepubliceerd: 01/01/1982

Document Version:

Uitgevers PDF, ook bekend als Version of Record

Please check the document version of this publication:

- A submitted manuscript is the version of the article upon submission and before peer-review. There can be important differences between the submitted version and the official published version of record. People interested in the research are advised to contact the author for the final version of the publication, or visit the DOI to the publisher's website.
- The final author version and the galley proof are versions of the publication after peer review.
- The final published version features the final layout of the paper including the volume, issue and page numbers.

[Link to publication](#)

General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal.

If the publication is distributed under the terms of Article 25fa of the Dutch Copyright Act, indicated by the "Taverne" license above, please follow below link for the End User Agreement:

www.tue.nl/taverne

Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us at:

openaccess@tue.nl

providing details and we will investigate your claim.

DRIJFVEREN IN DE ONTWIKKELING
VAN DE ELEKTRONICA

Prof. dr. H. Groendijk

DRIJFVEREN IN DE ONTWIKKELING VAN DE ELEKTRONICA

Afscheidscollege van
PROF. DR. H. GROENDIJK
UITGESPROKEN OP 29 OKTOBER 1982
AAN DE
TECHNISCHE HOGESCHOOL EINDHOVEN

Geachte toehoorders,

Bij mijn aanvaarding van het ambt van hoogleraar, nu 18 jaar geleden, heb ik in een bijeenkomst als deze mijn inaugurele rede gehouden. De toespraak die ik nu ga houden heeft niet zo'n wijdse naam en heet gewoon afscheidscollege. Het is het laatste college dat ik aan deze hogeschool ga geven. Er is echter een verschil met de colleges die hier normaliter worden gegeven voor de studenten. Daar is een college één van een serie van ca. 28 toespraken over hetzelfde onderwerp en men kan dus meestal voortbouwen op reeds in vorige colleges overgedragen kennis en behoeft een onderwerp niet volledig te behandelen, want men kan een deel laten liggen voor een volgend college. Bij dit afscheidscollege daarentegen wordt van mij verwacht dat ik mijn onderwerp nu afrond. Ik krijg geen gelegenheid er later voor hetzelfde gehoor nog verder op door te gaan.

Dit college wil ik gebruiken om U iets te vertellen over mijn vak, hoe dat zich ontwikkeld heeft en hoe het wellicht in de toekomst zich nog verder zal ontwikkelen. Tevens wil ik met U nagaan wat de drijfveren zijn bij deze ontwikkeling.

Ik begin met een korte schets van de ontwikkeling van mijn vak, elektronische bouwstenen, en ga daarbij iets verder terug dan het begin van mijn ambtsperiode, nl. tot 1950, het tijdstip waarop ik mijn werk in dit gebied begon. Dat was in een groep waar gewerkt werd aan onderzoek en ontwikkeling van vacuümbuizen, in die tijd ook nog wel radiobuizen genoemd, hoewel de toepassingsgebieden reeds toen al veel meer omvatten dan alleen de radio.

De lagen-transistor was juist uitgevonden. Men verwachtte er veel van, maar intussen waren de buizen nog geruime tijd onontbeerlijk. Er moest nog veel gedaan worden aan de ontwikkeling van de transistor voordat hij de radiobuis van zijn plaats kon verdringen. Een nadeel van de transistor was, zoals men het toen zag, zijn grote temperatuurgevoeligheid. Men heeft er echter mee leren leven. Nieuwe schakelingen zijn uitgevonden waarbij die temperatuurgevoeligheid, hoewel nog wel aanwezig, geen invloed heeft op de eigenschappen van de

schakeling. Bovendien bleek dat de eigenschappen van de transistor nauwelijks veranderden in de loop van de tijd, hetgeen bij buizen wel het geval was. Dit gevoegd bij het feit dat tenslotte transistoren veel goedkoper te fabriceren waren, maakte dat zij het in verreweg de meeste toepassingen van de buizen gewonnen hebben.

Na een jaar of tien was het zover dat de transistor volwassen begon te worden en er radioapparaten op de markt verschenen waarin transistoren zaten. Aanvankelijk kon een transistor nog niet veel vermogen afgeven, zodat in de eindtrap, die de stroom voor de luidspreker levert, nog buizen voorkwamen. Dit veranderde al snel en er kwamen radio's met uitsluitend transistoren. Deze waren veel kleiner dan de overeenkomstige apparaten met buizen. Een dergelijk apparaat werd, vreemd genoeg, ook transistor genoemd. Deze naam wordt nog wel eens gebruikt voor een kleine radio.

Die tien jaar waar ik zo juist over sprak: het tijdsverloop tussen de uitvinding van de transistor en de eerste commerciële toepassingen ervan, is een soort standaardtijd. Het geldt voor uitvindingen in het algemeen, als ze tenminste van voldoende belang geacht worden om veel geld en mankracht aan de ontwikkeling te besteden.

Nu is sinds 1950 een tijd van 30 jaar verlopen. Er is dus plaats voor drie opeenvolgende uitvindingen in dit gebied. Men zou hier kunnen noemen transistor, geïntegreerde schakeling en large-scale integration. Inderdaad kan men aan hun eerste begin ongeveer de jaren 1950, 1960 en 1970 verbinden en verschijnen tien jaar later de betreffende elektronische bouwstenen in grote aantallen op de markt.

Het is wellicht goed als ik voor dit gehoor de gebruikte termen iets nader toelicht. Een transistor wordt gemaakt op een klein plaatje éénkristallijn silicium, ook wel chip genoemd. Men kan er digitale signalen 1 of 0 mee weergeven door de transistor al of niet stroom te laten voeren. Ook kan men er kleine signalen, zoals worden ontvangen op de antenne van een radio, mee versterken. Om voldoende te versterken of om ingewikkelder bewerkingen met digitale signalen uit te voeren heeft men echter verscheidene transistoren en andere elementen zoals weerstanden nodig. Men is er nu in geslaagd zo'n complete versterker

met zeg 20 transistoren en bijbehorende elementen op één plaatje silicium aan te brengen. Dit noemt men een geïntegreerde schakeling of, in het Engels, integrated circuit, afgekort I.C. Voor ingewikkelder bewerkingen heeft men echter veel meer transistoren nodig. Als het aantal transistoren dat aangebracht wordt op één plaatje silicium of chip boven de 1000 ligt, dan spreekt men van large-scale integration.

Als we nu deze ontwikkeling nader beschouwen, dan valt het op dat de drie genoemde uitvindingen niet van dezelfde aard zijn. Bij de uitvinding van de transistor kan men zowel een uitvinder als een eerste publicatie aanwijzen. Dit geldt niet voor de beide andere. Zij volgden min of meer uit de ontwikkeling, maar vertegenwoordigden net als de transistor telkens wel een geheel nieuw stadium in die ontwikkeling, zowel wat de technologie als wat de toepassingsgebieden betreft.

Na de uitvinding van de lagen-transistor door Shockley was voor de uiteindelijke realisatie ervan in grote aantallen, nodig de ontwikkeling van de technologie, van nieuwe werkwijzen en nieuwe instrumenten. Dit vergde het werk van zeer velen en ook nieuwe uitvindingen, niet zo fundamenteel als die van de transistor, maar wel zeer noodzakelijk.

Deze technologische vooruitgang was zodanig dat de volgende stap, geïntegreerde schakelingen, voor de hand lag. Ik weet niet wie het eerst dit idee heeft uitgesproken, maar dat is ook niet zo erg belangrijk. Een uitvinding in de zin van de octrooiwet was er niet voor nodig. De noodzakelijke basis was al gelegd bij de ontwikkeling van de fabricage-technieken van de transistor. Men ziet dan ook dat na 1960, toen de belangrijkste problemen van de transistorfabricage waren overwonnen, allerwegen researchlaboratoria zich richtten op de realisatie van geïntegreerde schakelingen. Dit vergde een nieuwe technologische stap: het kleiner maken van de afmetingen van de afzonderlijke elementen en hun verbindingen en het verder terugdringen van het aantal kristalfouten in het silicium. Hiervoor waren nieuwe instrumenten nodig – in het bijzonder nauwkeurige optische instrumenten – en nog zuiverder werken. Een opbrengst van 95% bij de fabricage van transistoren is een redelijk resultaat. Maar wil men een schakeling met 20 transistoren maken, dan is de opbrengst aan schakelingen gering als

gemiddeld 1 op de 20 transistoren niet zou werken.

Pas toen men dit goed onder de knie had, kon men denken aan schakelingen met 1000 of meer transistoren: de large-scale integration. Weer een voor de hand liggende stap, die echter opnieuw voor zijn realisatie nieuwe en betere technieken vergde. Hierbij kwam ook een geheel nieuw probleem naar voren: hoe ontwerpt men dergelijke grote schakelingen en hoe test men ze op hun goede werking als ze klaar zijn. Zonder hulp van de computer is dit eigenlijk niet mogelijk. De T.H. Eindhoven heeft reeds vroeg ingezien dat dit een belangrijk probleem zou worden en daarvoor in 1970 een aparte leerstoel gesticht.

De tendens naar steeds kleinere afmetingen van de transistoren en gecompliceerder schakelingen zet zich voort. Hoewel ik niet uitvoerig wil ingaan op de specifieke technologieën die hiervoor nodig zijn, wil ik U toch enig idee geven voor wat voor soort problemen men bij deze ontwikkeling komt te staan. Het zou te ver voeren hier de hele serie bewerkingen uiteen te zetten die een siliciumplak moet ondergaan bij de fabricage van geïntegreerde schakelingen. Maar een basisstap die herhaalde malen wordt toegepast, is dat de siliciumschijf bedekt wordt met een lichtgevoelige lak waarop met behulp van licht een bepaald patroon wordt geprojecteerd. Door vervolgens de lichtgevoelige laag te ontwikkelen en te fixeren, zoals gebruikelijk in de fotografie, bereikt men dat op de onbelichte plaatsen de lak verdwijnt. Daar is het silicium dan toegankelijk voor verdere bewerkingen, terwijl de rest van het oppervlak beschermd wordt door de belichte, nu gefixeerde, delen van de laklaag.

We naderen thans de grens waarbij die openingen zo klein moeten worden (nl. enkele 0,001 mm of micron) dat dit met licht niet nauwkeurig meer te doen is. De golflengte van het licht, die 0,5 micron is, vormt hier de begrenzing. Daarom gaat men over op het gebruik van ultraviolette straling die een kleinere golflengte heeft dan zichtbaar licht. Ook denkt men wel aan het toepassen van röntgenstralen. Een andere mogelijkheid is te „belichten” met elektronen in een apparaat dat veel overeenkomst vertoont met een elektronenmicroscop. Het zal duidelijk zijn dat de gebruikte apparatuur steeds ingewikkelder

wordt. Ook moeten daarvoor telkens weer nieuwe stralingsgevoelige laksoorten ontwikkeld worden.

Intussen vindt men in de literatuur reeds ideeën voor een verdere vooruitgang naar nog kleinere afmetingen, waarbij essentieel nieuwe technieken een rol zullen gaan spelen. Maar hierover straks meer.

Uit deze korte schets van de geschiedenis van de technische vooruitgang op dit gebied blijkt hetgeen ik reeds opmerkte: de drie uitvindingen waarover ik sprak zijn niet van dezelfde aard. De transistor is het idee van één man, de volgende stappen – geïntegreerde schakelingen en large-scale integration – berusten op het werk van zeer velen.

Toch is het verschil minder groot dan men op het eerste gezicht geneigd is te denken. Ook de uitvinding van de transistor kwam niet uit de lucht vallen. Eraan voorafging de ontwikkeling van de fysica van de vaste stof, die op zijn beurt pas mogelijk was geworden door de quantummechanica. De eerste ideeën daarvan ontstonden omstreeks 1910. De namen van Planck, Einstein en Bohr zijn hieraan verbonden. Een goede basis voor het verdere werk werd gelegd even voor 1930 door Schrödinger, Heisenberg en vele andere nu beroemde fysici. In de veertiger jaren leidde dit tot een beter inzicht in de vaste-stoffysica, waardoor de uitvinding van de transistor mogelijk werd.

De belangrijkste uitvinding van de laatste eeuw is geweest dat men heeft uitgevonden hoe men moet uitvinden, nl. door te beginnen met systematisch onderzoek. Edison bedoelde hetzelfde toen hij zei: een uitvinding is voor 99% transpiratie en voor 1% inspiratie. Zonder aan de noodzaak van die inspiratie tekort te willen doen, kan men zeggen dat het daardoor mogelijk is geworden dat zovelen hebben bijgedragen tot de technische vooruitgang en dat dit niet meer uitsluitend het werk is van enkele briljante geesten. Men heeft zich gerealiseerd dat voor de verdere ontwikkeling van de techniek research noodzakelijk was. Wij zien dan ook dat in 1920 de grote industrieën reeds vrij sterke researchafdelingen bezitten, die zich niet uitsluitend richten op de directe vragen van de fabricage, maar hun doel verder en algemener stellen, in de hoop daarvan op den duur profijt te trekken. De resultaten hebben getoond dat dit inderdaad juist gezien was.

Wat waren nu de drijvende krachten bij deze ontwikkeling? In de eerste plaats waren deze natuurlijk van economische aard, maar mijns inziens is het onjuist om alleen deze factor te beschouwen. Ik kom daar straks nog op terug.

De economische factor is enerzijds het eigenbelang van de industrieën die op dit gebied werkzaam zijn. Zij moeten zich handhaven in een sterke concurrentiesfeer. Anderzijds is er de vraag van de gebruikers. De eerste impuls kwam uit de ruimtevaart. Het is duidelijk dat daar kleine en lichte apparatuur van het grootste belang is. Elke kg meer betekent een veelvoud daarvan aan brandstof nodig om de satelliet omhoog te brengen. Daarnaast is de computerindustrie een grote afnemer en helaas ook defensie. Een produkt creëert ook zelf een vraag. Het beschikbaar zijn van de nieuwe bouwstenen maakt het mogelijk apparaten te maken die steeds complexere functies kunnen vervullen en daardoor allerlei menselijke handelingen overbodig of eenvoudiger maken.

Hoe snel die complexiteit is toegenomen, laat zich het beste illustreren aan geheugens. Het geheugen is een belangrijk onderdeel van vele apparaten. Daarin kan men verkregen gegevens bewaren ter verdere bewerking later, in combinatie met andere gegevens en ook de bewerkingen zelf en hun volgorde kan men erin vastleggen. Zo'n geheugen bestaat grotendeels uit vele identieke componenten. Het aantal componenten laat zich gemakkelijk uitbreiden en wordt daarom praktisch alleen bepaald door de stand van de technologie: hoe groot men zo'n geheugen kan maken met nog een redelijke opbrengst.

Reeds in 1964 werd al opgemerkt dat het aantal componenten dat de meest geavanceerde geïntegreerde schakeling bevat, ruwweg elk jaar verdubbelde. Deze trend zet zich tot op heden voort. De verkleining van de afzonderlijke componenten hield hiermee niet helemaal gelijke tred. In de laatste tien jaar zijn de lineaire afmetingen van de componenten ca. 10 maal kleiner geworden. Elke component beslaat dus een 100 maal zo klein oppervlak. Het aantal componenten per chip is echter in die tien jaar toegenomen met een factor $2^{10} = 1000$, zodat de chips nu 10 maal zo groot geworden zijn. Een geïntegreerde schakeling

of chip had tien jaar geleden een oppervlak van ongeveer 1 mm^2 , nu ligt dat in de orde van 10 mm^2 .

De waarneming uit 1964 dat het aantal componenten per schakeling sinds 1960 gegroeid was met een factor 2 per jaar, werd tegelijk geponeerd als voorspelling: de lijn werd doorgetrokken naar de toekomst. Maar daardoor werd ook een taakstelling geformuleerd. Elke industrie die op dit gebied werkzaam was, ging zijn plannen daarnaar richten, omdat men wist dat ook de andere hetzelfde doel nastreefden. Zij zetten daarom zoveel mensen op dit gebied in dat inderdaad dat doel bereikt werd. Het was daarbij niet zo dat ze elk jaar met een tweemaal zo groot geheugen kwamen. Dat zou commercieel niet aantrekkelijk zijn, noch voor de fabrikant, noch voor de gebruikers. Als een geheugen met bv. 16000 componenten gerealiseerd was, dan was het volgende doel, voor over 4 jaar, een $2^4=16$ maal zo groot geheugen. Men is er inderdaad in geslaagd dit doel steeds te verwezenlijken, zij het dat het tempo de laatste jaren iets afneemt. Maar globaal gezien geldt de voorspelling uit 1964 nog steeds. Doordat hij als taakstelling ging fungeren, heeft hij het karakter gekregen van een „self-fulfilling prophecy”.

We zien dat economische factoren de ontwikkeling van steeds complexere elektronische schakelingen op gang brachten en verder stimuleerden, maar tegelijk ook aanleiding gaven tot een bijna autonome voortzetting van die ontwikkeling. De vooruitgang lijkt daardoor zijn eigen dynamiek te hebben. Maar mensen spelen er een rol in. Er moeten dus ook mensen zijn die zich aangetrokken voelen tot dit werk. Ook hierbij spelen weer economische motieven een rol, nu persoonlijke, maar er is meer.

Als iemand in zijn jeugd voor de keus staat in welk vak hij zich wil bekwamen, dan wordt hij slechts ten dele geleid door de financiële perspectieven. Het vak dat men het interessantst vindt schenkt de meeste bevrediging en men zal er ook het meeste in presteren. Niet ieder heeft die vrije keuze, maar als het mogelijk is, kan men het beste zich laten leiden door zijn eigen voorkeur. Het is natuurlijk onverstandig de financiële mogelijkheden die een vak biedt geheel buiten be-

schouwing te laten. Maar daarbij moet men toch niet op te korte termijn kijken. Bij vele opleidingen verloopt er een lange tijd – meestal wel vijf jaar – tussen het tijdstip waarop men moet kiezen en het ogenblik dat men met de verworven kennis een plaats in de maatschappij kan gaan zoeken. In die tijd kan de situatie drastisch veranderen. Daarvan is wel een aantal voorbeelden uit het recente verleden te noemen.

De regering is van plan het aantal beschikbare plaatsen voor studenten aan te passen aan de verwachte toekomstige behoefte. Er zijn vakken waar die behoefte mede afhangt van door de overheid te nemen beslissingen. Daar is die behoefte nog enigszins te schatten. De techniek heeft echter zijn eigen dynamiek. Zou men die beperking van het aantal studenten ook gaan toepassen op de technische studierichtingen, dan zou het vijf jaar later wel eens kunnen blijken dat men de behoefte aan ingenieurs volkomen verkeerd had ingeschat, zeer ten nadele van de Nederlandse economie. Zolang men die behoefte niet beter kan voorspellen dan nu het geval is, kan men een dergelijke ingreep beter achterwege laten.

Velen kiezen de techniek als loopbaan. Waarom doen zij dat? Er is wel opgemerkt dat de aandacht die de pers geeft aan bepaalde technische ontwikkelingen een grote invloed heeft op de studiekeuze. Maar de pers besteedt juist aandacht aan die gebieden die in de publieke belangstelling staan. Dan blijft toch weer de vraag: waarom trekt die techniek zoveel belangstelling; waarom wil de mens techniek ontwikkelen?

Hiermee is deze vraag al veel algemener gesteld en heeft niet alleen betrekking op het vakgebied waarvan ik U de ontwikkeling geschetst heb. Als we hem zo algemeen stellen is het eigenlijk een heel oude vraag, want de techniek ontwikkelt zich sinds de prehistorie.

Eigenlijk is het een vraag naar het wezen van de mens. De mens is bij uitstek een maker en gebruiker van gereedschappen. Vroeger werd dit wel als het kenmerkende verschil tussen mens en dier aangewezen. De laatste tijd zijn we in dit opzicht voorzichtiger geworden. Door waarnemingen van het gedrag van dieren, vooral in de vrije natuur, is gebleken dat ook dieren wel werktuigen gebruiken. Maar toch hebben zelfs

de primitiefste mensen veel meer werktuigen dan welke diersoort ook.

De bekende filosoof Teilhard de Chardin heeft hier een andere kijk op. Hij zegt: werktuigen zijn ook in de dierenwereld in overvloedige mate aanwezig. Alleen zijn ze daar samengesmolten met het organisme dat het gebruikt. Vele veranderingen opgetreden tijdens de evolutie zijn omvormingen van een lichaamsdeel of van het gehele lichaam tot een werktuig. Bij de zoogdieren zijn zo dieren ontstaan die graven, maar het zijn zelf graafmachines, zoals de mol. Er zijn er die kunnen vliegen, zoals de vleermuis, maar deze draagt zijn eigen vliegvermogen mee. Er zijn ook zoogdieren die in het water hun voedsel zoeken, als de zeehond en de walvis: hun lichaam is geëvolueerd tot een zwemapparaat.

Bij de mens ziet Teilhard de Chardin een nieuwe fase in de evolutie optreden. De mens kan over zichzelf en zijn situatie nadenken. Als hij moet graven, ontwerpt hij een schop. Zoekt hij op zee zijn voedsel, dan maakt hij een schip, enz. Daarmee is een aanzienlijke versnelling van de evolutie opgetreden. De mens kan zich veel sneller aan veranderde omstandigheden aanpassen dan de dieren, die het moeten doen langs de veel tragere weg van de lichamelijke aanpassing. De mens maakt zijn werktuigen buiten zichzelf en kan telkens dat werktuig ter hand nemen dat in de zich voordoende omstandigheden hem het beste past. Daardoor kon de mensheid zich in een relatief korte tijd over de gehele aarde verspreiden. Wij hebben geen vacht meer nodig om ons tegen de kou te beschermen, daarvoor hebben wij vuur en kleding. Bovendien, gedragspatronen behoeven bij de mens niet meer vastgelegd te worden in de genen. Wij kunnen immers onze ervaringen aan het nageslacht overdragen door middel van spraak en schrift.

Teilhard de Chardin ziet dus met de komst van de mens wel een geheel nieuwe situatie optreden bij het vervaardigen en gebruik van werktuigen, maar toch beschouwt hij dit als één doorlopende trend in de evolutie.

Niet ieder zal dit zonder meer accepteren als waar. Maar hebben wij middelen om te onderzoeken of het waar is, met andere woorden is deze bewering verifieerbaar?

Dit is naar mijn mening een onjuiste vraagstelling. De beschouwingen van Teilhard de Chardin behoren ongetwijfeld tot de filosofie. Nu is elke tak van wetenschap begonnen met een voor-wetenschappelijk stadium. Het kenmerk van dit stadium is dat er nog geen gerichte vragen gesteld worden. Er is alleen een verwondering over de verschijnselen om ons of in ons. De eerste beschouwingen in dit stadium zijn zeer algemeen. Men wil direct alles verklaren. We zouden kunnen zeggen: een wetenschap begint niet met vragen, maar met antwoorden. Die antwoorden geven dan het kader waarbinnen specifieke vragen geformuleerd kunnen worden.

De natuurwetenschappen zijn begonnen met een vage verwondering over de natuur: vanwaar al deze wisselende verschijnselen om ons heen? De Grieken hadden hierop twee verschillende antwoorden: Het ene antwoord was dat van Democritus van Abdera: er is geen verandering. Er zijn alleen de onveranderlijke atomen die slechts door verschillende combinaties ons die wisselende verschijnselen voortoveren. Het andere antwoord werd gegeven door Heraclitus van Ephese: er is niets anders dan verandering; verandering is het wezen der dingen; *panta rhei*, alles stroomt.

De eerste opvatting heeft richting gegeven aan ons wetenschappelijk denken, zij het uiteindelijk in een geheel andere vorm dan eerst door Democritus naar voren werd gebracht. Maar dit voor-wetenschappelijk stadium was nodig om vervolgens meer gerichte vragen te kunnen stellen.

Zo is het ook met de vraag naar de mens. Die vraag heeft de mensheid reeds lang beziggehouden. Er is ook een voor-wetenschappelijk, filosofisch antwoord op gegeven: de mens bestaat uit lichaam en geest. Deze notie is al heel oud. Bij de Grieken vindt men hem, maar ook in de Bijbel zijn er reeds sporen van te vinden, en verder in al die culturen waarin men geloofde in een bestaan na de dood. Sinds Descartes is hierop onze huidige splitsing van de wetenschap in natuurwetenschappen en geesteswetenschappen gegrond. Daar ziet men ook duidelijk de functie van zo'n filosofisch antwoord. Het geeft richting aan ons denken en stelt ons in staat de verschijnselen te ordenen, al is het

dan ook alleen maar tijdelijk, totdat een beter inzicht is verkregen.

Eigenlijk weten wij wel dat deze splitsing van de mens in lichaam en geest niet opgaat. Er zijn teveel verschijnselen die met beide te maken hebben. Omdat wij nog geen betere theorie hebben, zeggen wij dat er een sterke wisselwerking tussen beide is. Geestelijke moeilijkheden kunnen lichamelijke ziekten ten gevolge hebben. Omgekeerd kan men bij een goede lichamelijke gezondheid ook tegenslagen in het leven beter aan.

Nu weten we uit de exacte wetenschappen dat als de onderlinge wisselwerking heel sterk wordt, men het probleem beter opnieuw kan bekijken. Atomen in een gas kan men elk op zichzelf beschouwen als vrij en vervolgens gaat men de effecten van onderlinge botsingen apart bekijken. Maar bij atomen in een vaste stof is die wisselwerking zo groot dat men niet meer uitkomt met vrije atomen en daarbij de onderlinge wisselwerking als een storing te bekijken. Er treden dan geheel nieuwe verschijnselen op. Men doet beter zo'n brok vaste stof als één geheel te bekijken. In feite lukt dat alleen maar als de atomen regelmatig gerangschikt zijn zoals in een kristal.

Zo zal men uiteindelijk voor een beter begrip niet van lichaam en geest kunnen blijven uitgaan. Er zal daarbij een nieuw gezichtspunt gevonden moeten worden. In die zin kunnen filosofische beschouwingen als die van Teilhard de Chardin misschien een nieuwe weg wijzen. Hij heeft trouwens over dit probleem nog wel veel meer gezegd dan ik hierboven naar voren bracht.

Als het inderdaad zo is dat de drang om nieuwe werktuigen te vinden en te gebruiken zo'n essentieel aspect van de mens is, ja zelfs van de hele dierenwereld, dan zal dit steeds doorgaan, ook al brengt die ontwikkeling zelf weer nieuwe problemen met zich mee.

De omgeving die steeds nieuwe eisen stelt waaraan de mens zich moet aanpassen is in de huidige situatie niet in de eerste plaats meer de natuur. De verbreiding van de mensheid over de gehele aarde was mogelijk doordat wij geleerd hebben die omstandigheden de baas te worden. Nu blijft alleen de zeebodem over en, wie weet, de ruimte buiten de aarde. Maar het zijn vooral de veranderingen in de maatschappij

die steeds nieuwe aanpassingen nodig maken. Die veranderingen genereren we zelf, door de snelle toename van de bevolking overal op de aarde, maar ook door de techniek.

De daarmee samenhangende problemen zijn ten dele van niet-technische aard en zullen ook buiten de techniek opgelost moeten worden. Voor zover ze echter met de techniek te maken hebben stimuleren ze een verdergaande technische ontwikkeling.

Kijken we nu weer naar ons technische probleem van het maken van steeds complexere schakelingen, dan vinden wij, zoals ik al eerder zei, in de literatuur reeds ideeën voor een nog veel verdergaande verkleining van de elementen daarvan, en wel door moleculen te gebruiken als schakelaars. Men kent reeds moleculen – het zijn vrij ingewikkelde lange organische moleculen – die in principe een stroom zouden kunnen geleiden, welke stroom gestuurd kan worden door een spanning aan één van de zijtakken van het molecuul aan te leggen. Ook zijn er organische stoffen gemaakt die net zo'n gedrag vertonen als silicium. Monomoleculaire lagen van deze stoffen kunnen in de toekomst de bouwstoffen voor geïntegreerde schakelingen worden. Ik verwacht dat over een jaar of tien toepassingen van deze techniek zullen verschijnen. Het aanbrengen van die stoffen zal dan nog wel geschieden met technieken die afgeleid zijn uit de huidige, maar er zijn reeds ideeën voor een essentieel nieuwe ontwikkeling.

Een belangrijke ontdekking op een geheel ander gebied dan waar wij het vandaag over hebben, is hoe de erfelijke eigenschappen van levende wezens zijn opgeslagen in lange organische moleculen, de genen, in de chromosomen van elke celkern en de wijze waarop deze genen een keten van reacties op gang houden waarmee in de cel de voor het functioneren van het organisme nodige stoffen gemaakt worden. Door die kennis is men tegenwoordig in staat de erfelijke eigenschappen van bacteriën zodanig te veranderen dat ze bepaalde gewenste chemische stoffen produceren. Ook hier verliep weer een tijd van ongeveer tien jaar tussen de basisontdekking en de eerste toepassingen ervan.

Men speculeert nu erover dat het wellicht mogelijk is bacteriën ook

de moleculen te laten vervaardigen die de functie van een transistor in een geïntegreerde schakeling kunnen vervullen. Deze moleculen moeten dan tevens de eigenschap hebben dat ze zich op een voorgeschreven wijze aan elkaar gaan hechten, eventueel via weer andere moleculen, en aldus de juiste verbindingen tussen de elementen van de schakeling tot stand brengen. De reacties in een levende cel zijn zeer specifiek. Lukt het om een bacterie de eigenschap te geven de benodigde moleculen te leveren, dan worden door die bacterie en al zijn nakomelingen ook precies die moleculen gemaakt, allemaal exact gelijk. En er zullen dan ook precies de goede verbindingen ontstaan omdat die moleculen alleen op die manier aan elkaar passen. We kunnen daarom een zeer hoog opbrengstpercentage van dit proces verwachten. Aldus zou het mogelijk worden een computer te vervaardigen met de complexiteit van de menselijke hersenen, waarbij men bacteriën het werk laat doen.

Dit lijkt een science-fictionverhaal. Misschien zal het ook nooit gerealiseerd worden. Niet elk plan dat voldoende belooft om er veel geld aan te besteden en veel mensen aan te laten werken, leidt tot een bruikbaar resultaat. De beheerste kernfusie voor energieopwekking lijkt ondanks de vooruitgang die er ongetwijfeld geboekt is, na 30 jaar nog ver van zijn praktische uitvoering en het is nog steeds niet zeker dat het daar ooit toe komt. Dit kan ook het geval zijn met de moleculaire computer. Maar als ik denk aan andere ontwikkelingen in deze eeuw, dan ben ik daar toch niet zeker van. We behoeven alleen maar te denken aan de ruimtevaart en de computer. De raket werd in 1930 nog alleen maar toegepast bij vuurwerk en in 1970 maakte hij een reis naar de maan mogelijk. De eerste elektronische rekenmachine vulde in 1940 nog een heel vertrek en nu kan een computer met een veel grotere capaciteit ondergebracht worden op een schijf ter grootte van een gulden.

Een door bacteriën geproduceerde computer is echter nu nog slechts een speculatie. De basisuitvindingen zullen nog gedaan moeten worden. Als het al lukt, dan komt de realisatie toch zeker pas na het jaar 2000.

Daarmee zou dan de kring weer gesloten zijn. Dezelfde technieken waarmee de natuur werkt en heeft gewerkt in de evolutie bij een steeds verfijnder bewerktuiging van de levende wezens, wordt dan door de mens gebruikt om zijn eigen werktuigen te maken.

Ook dan doen we het nog slechter dan de natuur. Want het menselijk brein heeft capaciteiten die zelfs in rudimentaire vorm niet aanwezig zijn in de huidige computers. Ik denk hier in het bijzonder aan ons vermogen nieuwe dingen te bedenken, op een geheel andere manier tegen een probleem aan te kijken. Wij hebben nog geen enkel idee hoe dat bij ons in zijn werk gaat. Velen zijn van mening dat het onmogelijk is deze eigenschappen te implementeren in een elektronische schakeling. In ieder geval, zolang wij dat niet kunnen zal ook de meest complexe schakeling nog ver achterliggen bij het menselijk brein.

Ik dank U voor Uw aandacht.

Literatuur

- W. Shockley, The Theory of p-n Junctions in Semiconductors and p-n Junction Transistors, Bell System Tech. J., vol. 28, pp. 435-489, July 1949.
- R.N. Noyce, Microelectronics, Scientific American, vol. 237, pp. 70-81, September 1977.
- P. Teilhard de Chardin, De mens in de evolutie, Spectrum, Utrecht 1964.
- F.M. Cleve, Giants of Greek Philosophy, Nijhoff, Den Haag 1969.
- Proceedings of the Molecular Electronic Devices Workshop, NRL Report 4662, October 1981.
- K.M. Ulmer, Biological Assembly of Molecular Ultracircuits, NRL Report 4662, pp. 167-177.