

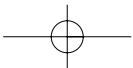
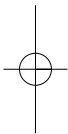
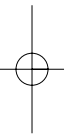


**Universiteit Twente**  
*de ondernemende universiteit*



## **Architectuur van de overvloed**

door Prof. dr .ir. Th. Krol



# Architectuur van de overvloed

Afscheidcollege  
16 februari 2007  
vanwege  
het emeritaat aan de  
Universiteit Twente

door  
Prof.dr.ir. Th.Krol

## **Mijnheer de Rector, collega's, familie en vrienden, ik ben zeer vereerd met uw aanwezigheid.**

### **Inleiding**

Met dit college sluit ik een periode van 14 jaar onderzoek en onderwijs aan deze universiteit af.

Na mijn ingenieursexamen elektrotechniek in 1971 aan de Technische Universiteit Eindhoven, toen nog Technische Hogeschool genaamd, ben ik in dienst gekomen van het Natuurkundig Laboratorium van Philips in Eindhoven.

Daar heb ik geleerd wat toegepast wetenschappelijk onderzoek is en hoeveel plezier het geeft wanneer je ergens een nieuwe oplossing voor hebt gevonden. Het plezier van het creëren.

Ook in die tijd speelde de architectuur van digitale systemen en in het bijzonder computers een belangrijke rol in mijn onderzoek. Mijn onderzoek was onder andere gericht op de besturingscomputers van telefooncentrales. Onderzoek dat geleid heeft tot het (4,2)-concept, een computerarchitectuur gebaseerd op foutencorrigerende codes. Een computer gebouwd volgens deze architectuur heeft de eigenschap dat wanneer de machine defect raakt deze toch correct blijft functioneren.

Verder heb ik gewerkt aan de architectuur voor een telefooncentrale die in een satelliet geplaatst moest worden. Door mijn kennis op het gebied van foutencorrigerende codes was ik betrokken bij de ontwikkeling van de codering van de Compact Disk.

Dit alles heeft geleid tot een groot aantal octrooien.

Door de opkomst van het vakgebied informatica en mijn interesse daarin, ben ik mij later gaan bezig houden met specificatietalen en ontwerpmethodologie, de leer van het ontwerpen, met als toepassing grote geïntegreerde circuits.

Met deze achtergrond ben ik in 1992 aan deze universiteit benoemd als hoogleraar op het gebied van architectuur en uitrusting van digitale systemen.

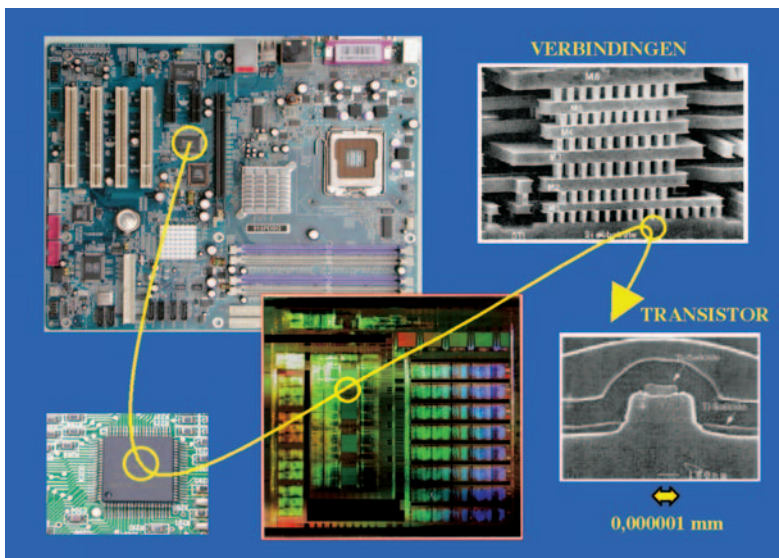
In de 14 jaar dat ik hoogleraar was, zijn de bouwstenen waarmee de architect van digitale systemen werkt enorm veranderd.

In dit afscheidscollege zal ik de volgende onderwerpen aan de orde laten komen

- Een korte wandeling door het inwendige van uw PC.
- De ontwikkeling van de IC technologie van 1992 tot heden.
- Networked embedded systemen.
- Nieuwe architecturen.
- Onderwijs en onderzoek.
- Dankwoord.

### Een korte wandeling door het inwendige van uw PC

Voor degenen voor wie dit vakgebied helemaal onbekend is het volgende: wanneer u een willekeurig elektronisch apparaat, bijvoorbeeld uw PC of uw GSM open maakt ziet u één of meerdere plastic platen met daarop honderden onderdelen. Dat lijkt al heel complex. Te midden van die onderdelen vindt u kleine zwarte plaatjes. Dat zijn de zogenaamde geïntegreerde circuits, IC's. Een dergelijk IC bevat op zich weer miljoenen zeer kleine onderdelen. Dus de feitelijke complexiteit wordt niet bepaald door al die onderdelen op die plastic plaat, de zogenaamde printplaat, maar door de complexiteit van de IC's.



Die IC's bevatten maar twee verschillende dingen, transistoren en verbindingen, gemaakt op een plaatje silicium. Een dergelijk plaatje silicium noemt men een chip. Op dit moment is men in staat een half miljard transistoren en hun onderlinge verbindingen op een plaatje silicium van 1 cm<sup>2</sup> te plaatsen. De elektrische signalen over die verbindingen representeren een 0 of 1, (waar of niet waar). Met een aantal transistoren kunnen we een logische schakeling maken. Die logische schakeling is de kleinste bouwsteen die de architect gebruikt en zo'n bouwsteen neemt beslissingen in de vorm van "als dit waar en dat niet waar is dan is het niet waar". De muziek in uw MP3 speler, de beelden van uw DVD speler, alles wordt weergegeven in de vorm van getallen en ieder getal wordt op zijn beurt weergegeven door een rijtje nullen en enen. Het zelfde geldt voor de letters die u intypt op uw PC. Die getallen en letters, dus rijtjes 0-en en 1-en, noemen we data en die data worden bewerkt door logische schakelingen. Daarnaast moeten we de data ook kunnen bewaren. Daarvoor maken we met een aantal transistoren een geheugen. Ook dit zijn weer bouwblokken voor de architect.

Met al die bouwblokken die ik hiervoor noemde zijn we in staat een zogenaamde processor te maken. Een processor kan een rij opdrachten uitvoeren op de data. Een degelijke rij opdrachten noemen we een programma.

Een processor onderscheidt zich van allerlei andere digitale schakelingen door de eigenschap dat een processor een programma kan uitvoeren waarbij de data de loop van het programma kunnen beïnvloeden.

Uw PC bevat een grote processor. Processoren vindt u echter overal terug. De meeste zijn verborgen, het programma kunt u niet veranderen. Ze zijn ingebed. Vandaar de huidige naam van de leerstoel: "Computer Architectuur voor Embedded Systemen". U bent waarschijnlijk in het bezit van meer dan honderd processoren. De meeste zijn klein. Uw PC bevat één grote en meerdere kleinere processoren. Deze kleine embedded processoren zijn er voor het beeldscherm, het geluid en de internetaansluiting. Een gemiddelde middenklasse auto bevat zo'n vijftig processoren, met taken variërend van motormanagement tot het in- en uitschakelen van de verlichting. Verder zitten er processoren in uw radio, TV, DVD speler, magnetron, en zo voort. Tot zover iets over IC's en processoren.

## De ontwikkeling van de IC technologie in de afgelopen 14 jaar

Sinds het begin van de IC technologie in de jaren zestig verdubbelde het aantal transistoren dat men op een IC kan plaatsen ongeveer iedere 18 maanden. In het volgende overzicht zal ik u laten zien wat dit betekent voor de computer architect.

Als voorbeelden neem ik de INTEL processoren uit 1992 en 2004

In 1992 bevatte de toen gangbare Intel 386 processor 0,25 miljoen transistoren. In 2004 bevatte de INTEL Pentium processor 167 miljoen transistoren. Dit betekent dat het aantal transistoren per mm<sup>2</sup> in 12 jaar toenam met een factor 200. Dat is een verdubbeling elke 18 maanden.

De snelheid van die transistoren nam in die tijd toe met een factor 10 en de rekencapaciteit, dus het aantal opdrachten dat per seconde kan worden uitgevoerd, met een factor 1000.

We kunnen nu dus 1000 maal meer dingen laten doen door zo'n stukje silicium als 14 jaar geleden. Het is te verwachten dat we over 12 tot 14 jaar weer 1000 maal meer kunnen laten doen door eenzelfde klein stukje silicium ter grootte van de nagel van uw duim.

U kunt zich voorstellen dat deze toename enorme nieuwe mogelijkheden biedt op allerlei gebieden. Enerzijds kunnen we steeds intelligenter toestellen maken en anderzijds kunnen we die toestellen steeds kleiner maken.

<b>1992</b> INTEL 386	Chip oppervlak	42 mm <sup>2</sup>	
	Aantal transistoren	0,25 M	
	Aantal transistoren per mm <sup>2</sup>	0,6 M	
	Klok frequentie	33 MHz	
	Reken capaciteit	10 MIPS	
<b>2004</b> INTEL Pentium 4	Chip oppervlak	135 mm <sup>2</sup>	
	Aantal transistoren	167 M	
	Aantal transistoren per mm <sup>2</sup>	120 M	
	Klok frequentie	3.000 MHz	
	Reken capaciteit	10.000 MIPS	

Dankzij deze nieuwe mogelijkheden rijden we straks in auto's die betrouwbaarder, veiliger en zuiniger zijn. We zullen in de toekomst thuis zuiniger met energie kunnen omgaan. We zullen veel betere medische diagnoses stellen, ziektes eerder ontdekken en de patiënt beter kunnen bewaken. Het internet en andere communicatie mogelijkheden geven ons nu al toegang tot een bijna oneindige hoeveelheid informatie. Dat zal in de toekomst alleen maar meer worden, maar dan wel beter geordend en overzichtelijker. Misschien zal in de toekomst dankzij deze nieuwe communicatiemiddelen, een groot gedeelte van het woon-werkverkeer overbodig worden.

The sky is the limit.

Door stukjes elektronica verstopt in de productverpakkingen is een supermarkt zonder kassa's nu al mogelijk. Maar ook die elektronica in de verpakking zal steeds slimmer en kleiner worden.

Nu kan die elektronica in de verpakking alleen nog maar communiceren met de kassa. In de toekomst kunnen ze ook met elkaar communiceren.

Dit levert een compleet nieuw onderzoeksgebied op: 'Networked Embedded Systems'

## Networked Embedded Systems

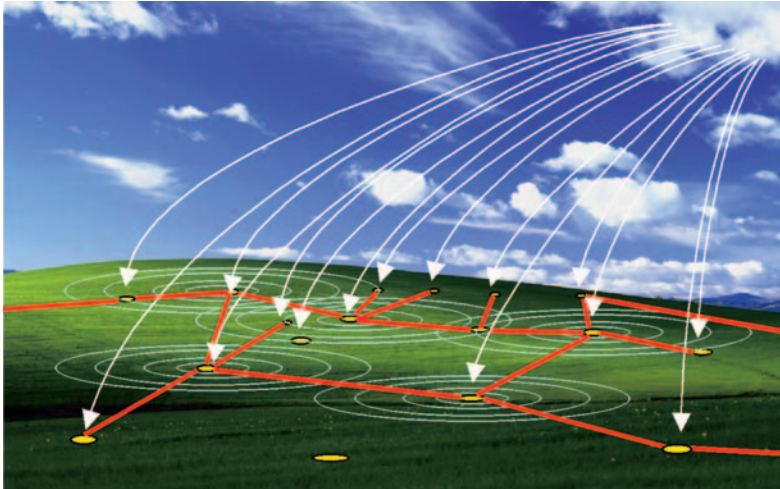
Dit is een geheel nieuw onderzoeksgebied.

De basis ligt in de mogelijkheid heel kleine apparaatjes te maken, ter grootte van een vingerhoed of zelfs een speldenknop. Een dergelijk apparaatje bevat een zendertje, een ontvangertje, een of meerdere sensoren en een klein computertje. Dat alles wordt gevoed door een klein batterijtje, een fotocel, of andere nog onvoorziene mogelijkheden. Die apparaatjes kunnen door middel van hun zender en ontvanger met elkaar praten. Maar omdat alles zo klein is kan dat niet over een grote afstand. Tien meter is al ver. Die apparaatjes kunnen heel goedkoop worden. We zullen die apparaatjes voortaan de naam 'node' geven. Heel veel van die nodes samen kunnen een netwerk vormen en alle beetjes intelligentie van die nodes samen kunnen een zeer intelligent netwerk vormen.

De toepassingen zijn bijna onbeperkt. Eén toepassing, onderzocht in de Verenigde Staten, betreft het uitstrooien van deze nodes over vijandelijk gebied. Trillings- en temperatuursensoren detecteren vijandelijke activiteit en geven die informatie via het netwerk door. Het netwerk bouwt zichzelf op



en er zijn zoveel nodes dat defecte of vernietigde sensoren geen invloed hebben op de goede werking van het totaal.



Er zijn echter gelukkig ook nuttiger en mensvriendelijker toepassingen, zoals nodes die worden vastgeplakt op artikelen die vervoerd moeten worden. Het netwerk van nodes dat spontaan is opgebouwd, bepaalt automatisch of artikelen die bij elkaar in de buurt staan gevaar voor elkaar opleveren, of het bepaalt of het artikel met de juiste vrachtwagen vervoerd wordt. Ook veel simpeler toepassingen zijn mogelijk, zoals de besturing van de zonneschermen van grote gebouwen. De automatisering hiervan vraagt nu nog veel dure bekabeling. Een simpele node per zonnescherm, sommige met een lichtsensor andere met een windsensor en allemaal met een beetje intelligentie, lost het probleem op een goedkope wijze op. Er is geen dure bekabeling meer nodig, alleen een aansluiting op 230 volt.

Op dit gebied is veel onderzoek te doen, zoals

- Netwerkprotocollen:  
Hoe communiceren de nodes met elkaar
- Lidmaatschapsprotocollen:  
Op welke wijze en onder welke voorwaarden kan een node opgenomen worden in het netwerk.

- **Betrouwbaarheid:**  
Als één of meer nodes rare dingen gaan doen mag hij niet in staat zijn het volledige netwerk te blokkeren.
- **Eenvoudige besturingssystemen:**  
Een dergelijk node kan immers niet een volledige Pentium processor bevatten.

Enzovoort.

Dit onderzoek heeft al veel interessante resultaten opgeleverd. Dit heeft geleid tot veel belangstelling vanuit de industrie. De groep is internationaal leidinggevend en betrokken in vele nationale en internationale projecten. Het heeft geleid tot de oprichting van een nieuw bedrijf, genaamd 'Ambient Systems'. Dit is één van de twee bedrijven die de leerstoel heeft voortgebracht.

## Nieuwe architecturen

U kunt zich voorstellen dat 200 maal meer transistoren op een chip en 1000 maal meer rekencapaciteit in 14 jaar, naast alle nieuwe mogelijkheden ook nog een flink aantal nieuwe onderzoeksuitdagingen oplevert. Onderzoek naar ontwerpmethoden, het testen van IC's met 100 miljard transistoren die allemaal goed moeten werken en het energieverbruik van een dergelijk groot IC.

Meer transistoren op een chip betekent hogere ontwerpkosten en die kosten moeten uiteindelijk weer worden terugverdiend. Alleen wanneer er miljoenen van dezelfde chip verkocht kunnen worden, is het rendabel een geheel nieuw ontwerp te maken. We moeten dus werken in de richting van chips die voor meerdere toepassingen gebruikt kunnen worden. Dus IC's die programmeerbaar zijn.

Geïntegreerde circuits kunnen verdeeld worden in een aantal categorieën:

- ASIC's, Application Specific Integrated Circuits
- FPGA's, Field Programmable Gate Arrays
- DSP's, Digital Signal Processors
- General Purpose Processoren

We hebben ook gezien dat het ontwikkelen van een IC voor slechts één toepassing, een ASIC (Application Specific Integrated Circuit), zelden nog rendabel is.

Een processor zoals een Pentium is een general purpose processor. Hij kan voor iedere toepassing worden gebruikt. Maar dat gaat ten koste van een hoog energieverbruik en een beperkte efficiëntie.

Om die redenen zijn er een aantal andere types processoren ontwikkeld voor een beperkt toepassingsgebied, zoals DSP's, Digitale Signaal Processoren, die o.a. gebruikt worden voor het bewerken van video- en geluidssignalen, en FPGA's, Field Programmable Gate Arrays.

Deze laatste IC's bestaan uit een heel groot aantal logische functies en registers voor dataopslag. Voor gebruik wordt een FPGA geconfigureerd. De logische functies en registers worden daarbij statisch met elkaar verbonden. Het configureren vraagt relatief veel tijd. Men noemt de architectuur van deze FPGA's wel fijnkorrelig omdat logische functies en registers met elkaar verbonden worden.

De efficiëntie van deze FPGA's is laag, maar ze vormen een goede en goedkope oplossing voor functies waarvan er relatief weinig geproduceerd worden. Tienduizend is hier ook nog relatief weinig.

De leerstoel heeft zich in de laatste 10 jaar onder andere toegelegd op onderzoek naar energie efficiënte grofkorrelige herconfigureerbare architecturen (Coarse-Grained Reconfigurable architectures). In plaats van het verbinden van grote aantallen registers en logische functies worden hier eenvoudige processoren met elkaar verbonden en iedere processor wordt zodanig ingesteld dat hij gedurende enige tijd op een effectieve en energiearme wijze een specifieke taak kan vervullen. Moet de processor een andere taak gaan vervullen dan wordt hij opnieuw ingesteld (geherconfigureerd).

Aan de hand van een metafoor zal ik u proberen duidelijk te maken wat het verschil is tussen een normale computer (general purpose processor), een fijnkorrelige herconfigureerbare architectuur (FPGA) en een grofkorrelige ook herconfigureerbare architectuur. De architectuur die we de afgelopen jaren met succes onderzocht hebben.

### *General purpose processor*

Zoals ik u in het begin van mijn betoog vertelde bestaat een IC uit een groot aantal transistoren en een groot aantal verbindingen. Een groepje van transistoren vormt een logische schakeling. U kunt dit vergelijken met een enorm groot kantoor, met zo'n 10 miljoen kleine kamertjes waarin door een mannetje of vrouwtje een beslissing wordt genomen of een eenvoudige berekening wordt uitgevoerd. Ieder kamertje komt overeen met een of andere logische schakeling.

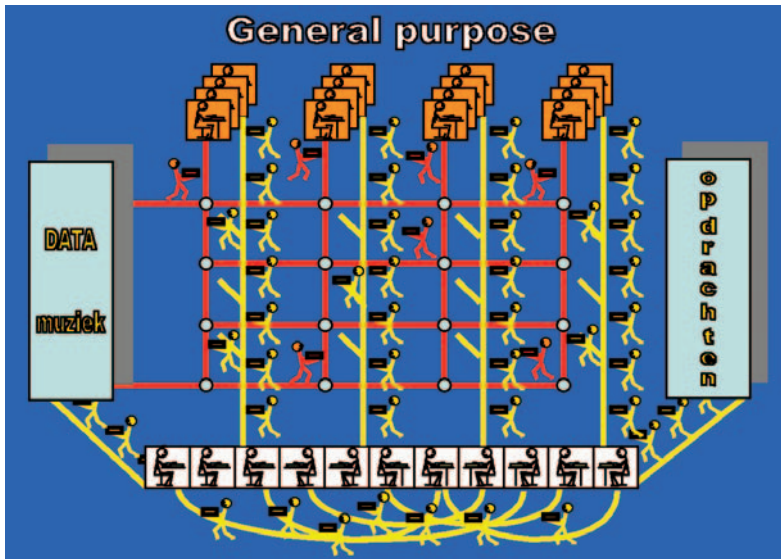
Verder is er een magazijn, het geheugen, voor de opslag van de data, bijvoorbeeld muziek en een magazijn voor de opslag van de opdrachten die achtereenvolgens door de processor moet worden uitgevoerd.

Die kamertjes zijn verbonden door een enorm aantal gangen waardoor opdrachten en data, rijtjes 0-en en 1-en, heen en weer worden gedragen door postbodes. Al die mannetjes en vrouwtjes gebruiken ieder een beetje energie. Te vergelijken met het energieverbruik van een processorchip. Hoe groter de afstand die er gelopen wordt door de postbodes, hoe groter het aantal postbodes en hoe groter het aantal kamertjes waarin gewerkt wordt, hoe groter het energieverbruik is.

De mannetjes in de werkkamers zijn nogal dom. Iedere handeling die ze verrichten moet hen verteld worden. Ook daarvoor zijn gangen en postbodes nodig die de opdrachten naar de werkkamers brengen. Voor iedere werkkamer is er een gang. Die opdrachten komen uit een groot commandocentrum waar de opdrachten uit het opdrachtenmagazijn vertaald worden in opdrachten voor de werkkamers

De postbodes die de data vervoeren kunnen niet lezen en daarom wordt naar ieder kruispunt voor iedere postbode met data een postbode met een opdracht gestuurd die hem vertelt hoe hij verder moet lopen.

Het commandocentrum krijgt zijn opdrachten uit het opdrachtenmagazijn. Ook hier is weer een gang nodig en een stroom van postbodes. Naar het magazijn met gegevens (data) loopt ook een rij postbodes met opdrachten om aan te geven welke gegevens opgehaald moeten worden.



De werkkamertjes van het commandocentrum zijn onderling verbonden met gangen waardoor opdrachten met behulp van postbodes heen en weer gestuurd worden.

Het vullen van het opdrachtenmagazijn is al tientallen jaren geleden opgelost. De taak die moet worden uitgevoerd, wordt beschreven in een programmeertaal en door een computer vertaald in de opdrachten die moeten worden opgeslagen in het opdrachtenmagazijn.

U ziet, een uiterst inefficiënt kantoor, dat veel energie verbruikt.

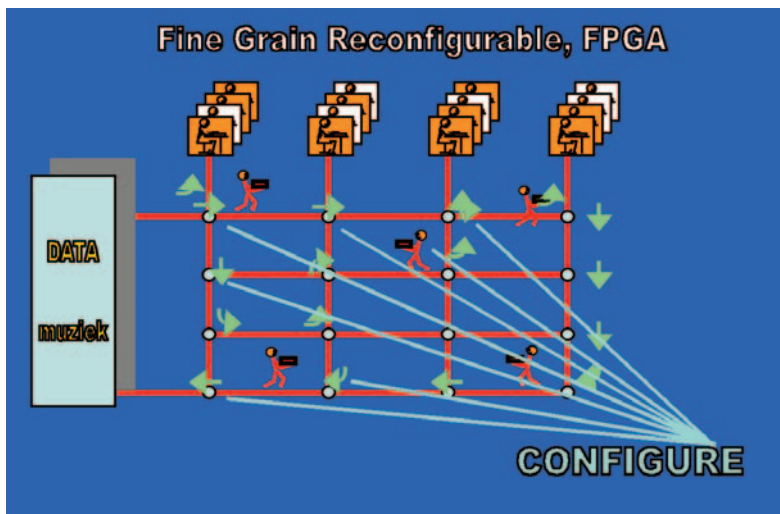
Het transport van de opdrachten en het commandocentrum, de gele mannetjes, gebruiken veel meer energie dan de postbodes en de werkkamertjes voor de data, de rode mannetjes. Dit verschil kan wel een factor 100 bedragen. Echter, een general purpose processor heeft het grote voordeel dat iedere mogelijke taak uitgevoerd kan worden en dat we weten hoe we een dergelijke processor moeten programmeren.

Voor DSP's, digitale signaal processoren, kunnen we hetzelfde plaatje gebruiken. De werkkamertjes zijn daar aangepast aan de toepassing en de managementlaag is wat kleiner. Helaas is het programmeren ervan een stuk moeilijker dan het programmeren van een general purpose processor.

*Fine-grained reconfigurable*

We gaan nu dezelfde metafoor toepassen op een fine-grained reconfigurable architectuur, een FPGA.

Het kantoor bestaat wederom uit een groot aantal werkkamertjes, verbonden door gangen waardoor de postbodes met gegevens heen en weer kunnen lopen. De taak die uitgevoerd moet worden is vooraf bekend en die taak moet steeds weer opnieuw worden uitgevoerd. Er zijn allerlei soorten werkkamertjes die verschillende taken kunnen uitvoeren. Alle kamertjes zijn verbonden door gangen.



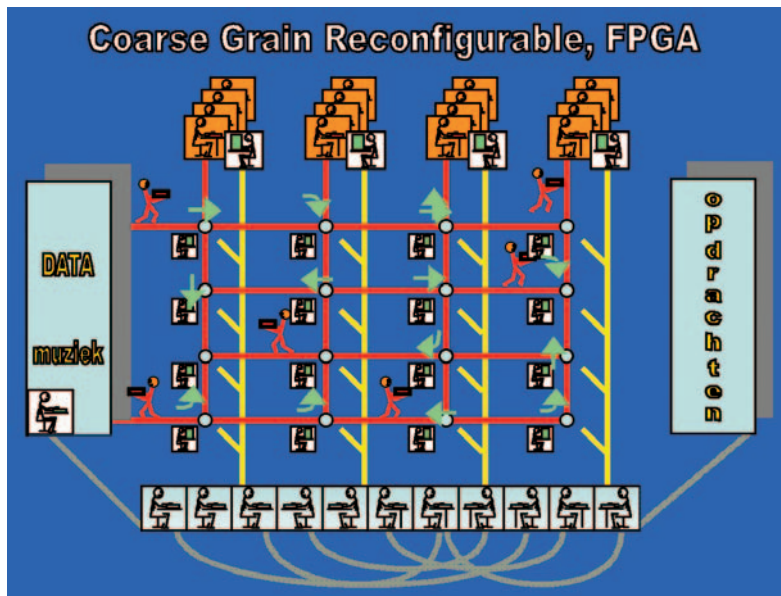
Omdat de taak die uitgevoerd moet worden al bekend is en niet vaak zal veranderen, kunnen de kruispunten op de gangen gedeeltelijk worden dicht getimmerd om er voor te zorgen dat de postbodes met data maar één kant op kunnen. We hebben dan geen postbodes meer nodig die opdrachten naar de kruispunten brengen.

Vooraf is bepaald hoe de postbodes moeten lopen van het magazijn naar de kamertjes, welke en wat voor soort kamertjes achtereenvolgens gebruikt moeten worden en hoe de postbodes de data van het ene kamertje naar het andere kamertje moeten transporteren. Het kantoor is geconfigureerd. U ziet het management is verdwenen en we hebben een zeer energie efficiënte

oplossing. Helaas is het gebruik van het kantooroppervlak niet zo efficiënt. Vele werkkamers en veel gangen worden nooit gebruikt. Maar die gebruiken gelukkig ook geen energie. Het ontwerp is echter nogal star. Moet het kantoor een andere functie gaan vervullen dan is dat alleen mogelijk na een uitgebreide verbouwing die relatief veel tijd vraagt. Kenmerkend voor dit kantoor is dat de logische functies, de kamertjes, erg eenvoudig zijn. Vandaar de naam "fine-grained reconfigurable architecture".

#### *Coarse-Grained Reconfigurable*

De achterliggende gedachte van een "coarse-grained reconfigurable architecture" is dat een dergelijk kantoor gedurende enige tijd een bepaalde functie uitvoert en daarna weer een andere maar soortgelijke functie. Het kantoor moet energiearm zijn. De omschakeling van de ene naar de andere taak moet vlot kunnen gebeuren.



Het kantoor bestaat uit werkkamers en een datamagazijn die onderling zijn verbonden door een gangenstelsel. Daarnaast is er een opdrachtenmagazijn.

De werkkamers zijn nu in groepjes samengevoegd. Aan ieder groepje werkkamers is een opdrachtenkamertje toegevoegd. Van hieruit worden de opdrachten voor een groepje uitgegeven.

Verder wordt ieder kruispunt van het gangenstelsel voorzien van een klein werkkamertje dat de datapostbodes in de goede richting stuurt. Ook de opdrachten voor het datamagazijn komen uit een eigen werkkamertje.

Die extra werkkamertjes moeten natuurlijk ook gevoed worden met opdrachten. Om dat mogelijk te maken is er een gangenstelsel waardoor postbodes opdrachten vanuit een commandocentrum naar al die lokale opdrachtenwerkkamertjes brengen.

Deze postbodes en het commandocentrum zijn alleen actief indien de processor geconfigureerd wordt. Gedurende het bewerken van de data zijn alleen de daarvoor bestemde werkkamertjes, het gangenstelsel voor de data en de lokale werkkamertjes actief. Er hoeven geen grote afstanden meer te worden afgelegd.

Deze architectuur is flexibel en energiearm. U kunt zich voorstellen dat het niet eenvoudig is om de functie van de lokale werkkamers te bepalen.

Door de manier van uitleggen lijkt het allemaal erg eenvoudig. Het tegendeel is waar. Een bijkomend probleem is dat de processor geprogrammeerd moet kunnen worden en dat dit programmeren moet leiden tot een efficiënt functioneren van de processor. Deze problemen zijn verre van triviaal en vragen nog wel enig onderzoek.

Mijnheer de rector, geachte aanwezigen, ik kon het helaas niet nalaten nog enige techniek te doceren.

Deze coarse-grained reconfigurable architectuur is ontwikkeld in onze groep en wordt nu als ontwerp op de markt gebracht door Recore Systems, de tweede spin-off van onze leerstoel. Ik hoop dat de leerstoel CADTES het bedrijf Recore Systems nog lange tijd met onderzoek mag en kan ondersteunen.



### *De toekomst*

Hoe de architectuur van een processor voor algemene toepassingen zich in de toekomst zal ontwikkelen is moeilijk te voorspellen. We zien dat de nanotechnologie het mogelijk zal maken binnen 10 jaar meer dan 10 miljard transistoren op een chip te plaatsen. Nog meer transistoren gebruiken voor één processor is zinloos. Het levert geen extra rekencapaciteit. Daarom plaatst INTEL nu al meerdere processoren op een chip. Over 10 jaar zullen dat er meer dan 100 zijn. Besturingssystemen die in staat zijn de taken op een efficiënte manier over honderden processoren te verdelen bestaan nog niet. Moet het onderzoek op het gebied van besturingssystemen weer een nieuwe impuls krijgen?

Wat betreft de toekomst van processoren voor speciale toepassingen voorzie ik een aantal nieuwe mogelijkheden op het gebied van dataflow machines. Deze machines zullen als kleinste rekeneenheid een volledige processor hebben in plaats van een stukje logica dat slechts een eenvoudige rekenkundige operatie kan uitvoeren. Onderzoek in de leerstoel heeft aangetoond dat dit een levensvatbare benadering is. Echter ook hier geldt dat deze architecturen alleen gebruikt kunnen worden wanneer het ontwerp van deze machines ondersteund wordt door goede ontwerpsoftware.

### **Onderwijs en onderzoek**

De taken van een universiteit zijn onderwijs en onderzoek. Beide taken zijn volgens mij even belangrijk. Met het onderzoek gaat het uitstekend, maar ik maak me echter wel enige zorgen over het onderwijs.

Voor een kwalitatief hoogwaardige opleiding is een evenwichtig en zorgvuldig opgebouwd curriculum nodig. Mijn ervaring is dat de opleidingsdirecteuren daar alle aandacht aan besteden. Dat onderwijs moet gegeven worden door enthousiaste universitair docenten en hoogleraren die het vak dat ze geven volledig beheersen en op de hoogte zijn van de laatste ontwikkelingen op dat vakgebied. Dit is in de praktijk alleen mogelijk indien de docenten ook onderzoek doen op het gebied dat ze doceren.

Leerstoelen dienen hun onderzoek tegenwoordig in te passen in het onderzoeksprogramma van een instituut. Ik ben bang dat hierdoor in de toekomst een steeds grotere mismatch zal ontstaan tussen de onderzoek- en onderwijsprogramma's.

Volgens mijn observaties zijn er nu al te veel vakken diegegeven worden door docenten die op een ander onderzoeksgebied werkzaam zijn. Ik zie dat als een bedreiging voor de kwaliteit van het onderwijs.

Helaas is het niet mogelijk onderzoeksprojecten op te starten zonder externe financiering. Deze subsidieverstrekkingen zijn sterk gericht op utilisatie. Dat leidt tot ontwikkelwerk in plaats van onderzoek. Dat is niet de taak van de universiteiten. De taak van een universiteit is onderzoek te doen naar de fundamentele en alternatieve wegen te bewandelen met als doel de kennis op een vakgebied te verhogen en deze uit te dragen. Voor dit soort fundamenteel onderzoek is veel meer geld nodig.

Mijnheer de rector, geachte aanwezigen, het was een voorrecht de afgelopen 14 jaar te mogen werken aan deze universiteit op het onderzoeksgebied "computer architectuur voor embedded systemen".

Het aanvaarden van deze leerstoel 14 jaar geleden betekende ook het aanvaarden van een bestaande groep onderzoekers en docenten. Op een collegiale wijze heeft de groep de onderzoeksdoelstelling van de leerstoel gestalte weten te geven op een zodanige wijze dat de groep zich uiteindelijk kon ontwikkelen tot een leerstoel van meer dan 30 personen met veel industriële contacten en een uitstekende reputatie in binnen- en buitenland.

Ik beschouw het als een bekroning van de leerstoel dat hij als resultaat van het onderzoek 2 spin-offs heeft weten voort te brengen, Ambient Systems en Recore Systems.

## Tenslotte

Rest mij de aangename taak een groot aantal personen, bedrijven en instanties te bedanken.

In eerste plaats wil ik het cluster Embedded Systemen en in het bijzonder mijn eigen leerstoel bedanken. Jullie hebben mij indertijd aanvaard als primus inter pares. Samen hebben we de leerstoel uitgebouwd tot wat hij nu is. Ik heb de solidariteit binnen de groep en de solidariteit jegens mij als zeer bijzonder ervaren. Er zijn perioden geweest dat ik door persoonlijke omstandigheden wel eens een steek liet vallen. Voordat ik het mij realiseerde, was die steek ongevraagd alweer opgenomen. Daar ben ik jullie allen zeer dankbaar voor.

Mijn dank gaat ook uit naar de EWI leerstoelen waarmee wij hebben mogen samenwerken en nog steeds samenwerken. Het vakgebied Embedded Systemen strekt zich uit over een groot aantal disciplines. In veel projecten is zowel kennis nodig op het gebied van de wiskunde, de elektrotechniek als de informatica. We hebben gezamenlijk laten zien dat samenwerking tussen leerstoelen van verschillende afdelingen mogelijk is en dat dit tot zeer vruchtbare resultaten leidt. Dank voor het vertrouwen dat jullie in mij stelden.

Ook de medewerkers van de technologiestichting STW wil ik bedanken voor de plezierige wijze waarop zij onze STW- en PROGRESS-projecten hebben begeleid.

Toegepast onderzoek is onmogelijk zonder een nauwe samenwerking met de industrie. De leerstoel heeft vele industriële contacten, zowel in binnen- als buitenland. Een aantal bedrijven ondersteunt ons onderzoek financieel. Zonder al die ondersteuning en contacten was de leerstoel niet geworden wat hij nu is. Ik heb mij voorgenomen in deze afscheidsrede geen namen van personen en bedrijven te noemen. Daarop maak ik echter een uitzondering. Philips heeft mij in de 21 jaar dat ik daar heb gewerkt, gevormd als onderzoeker. Daarna ben ik van 1992 tot 2004 nog als adviseur verbonden geweest aan Philips Research. Ik wil de directie en de medewerkers van Philips Research bijzonder danken voor het in mij gestelde vertrouwen, de vaak kritische en interessante wetenschappelijke discussies die we voerden en alle projectondersteuning, zowel in menskracht als financieel.

Lieve Anneke, bij ons vertrek naar Twente heb ik beloofd wat meer aandacht te besteden aan jou, onze kinderen, hun partners en later onze kleinkinderen. Dat is niet altijd even goed gelukt. Maar sinds ik een jaar geleden gedeeltelijk gestopt ben met werken en nu helemaal gestopt ben, gaat het al veel beter en dat bevalt mij prima. Als je werk je hobby is, is het soms moeilijk om de juiste prioriteiten te stellen. Deze laatste 10 jaren zijn voor jou, door een aantal zeer bedreigende ziektes bepaald niet de gemakkelijkste geweest. Ondanks alles heb je me altijd volledig gesteund in mijn werk. Daar kan ik je niet dankbaar genoeg voor zijn.

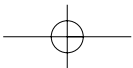
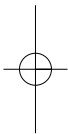
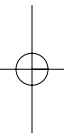
En de toekomst? Er zijn een heleboel heel leuke dingen te doen waar ik vroeger nooit aan toe kwam en daarnaast blijft ontwerpmethodologie nog altijd een leuke hobby.

Ik heb gezegd.











**Universiteit Twente**  
*de ondernemende universiteit*