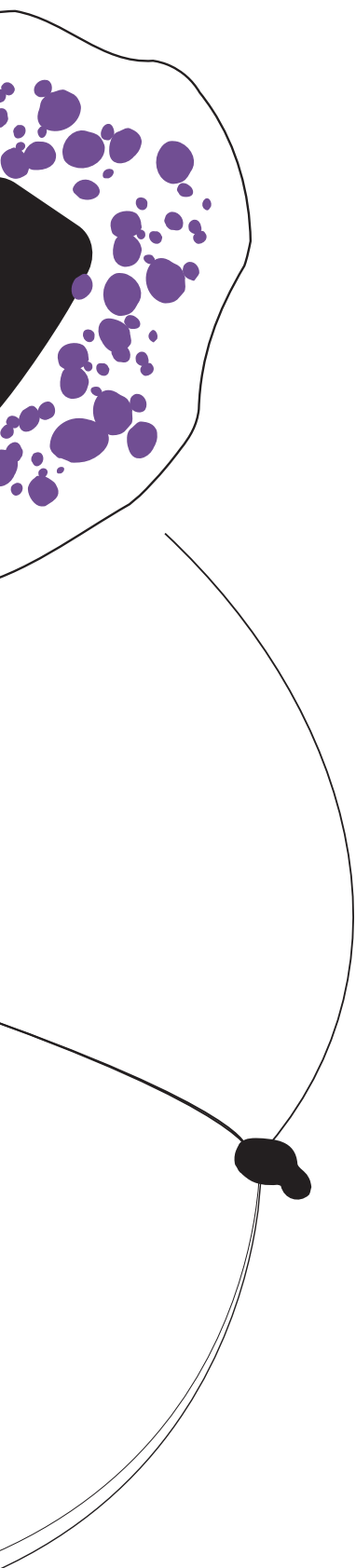


52^{STE} DIES NATALIS
VRIJDAG 29 NOVEMBER 2013

HET ONZICHTBARE CIRCUIT

PROF.DR.IR. BRAM NAUTA



UNIVERSITEIT TWENTE.

HET ONZICHTBARE CIRCUIT

De chip, of geïntegreerde schakeling, heeft in een razend tempo ons leven ingrijpend veranderd. Het lijkt zo vanzelfsprekend dat er weer een nieuwe generatie smartphones, tablets of computers is. Maar dat is het niet. Prof.dr.ir. Bram Nauta, hoogleraar Integrated Circuit Design, laat in zijn rede bij de 52ste Dies Natalis van de Universiteit Twente zien dat er veel wetenschappelijk onderzoek en industriële inspanning achter verborgen gaat. En vooral: creativiteit.

Nu ik, ter gelegenheid van de 52ste verjaardag van de Universiteit Twente, de gelegenheid krijg iets over mijn vak te vertellen, wil ik eens op een andere manier beginnen dan u gewend bent. Mijn vak, voor alle duidelijkheid, is het ontwerpen van chips, geïntegreerde schakelingen voor bijvoorbeeld uw smartphone die u, als het goed is, net heeft uitgeschakeld. Ik heb een groep hooggekwalificeerde architecten om mij heen. Wij staan, als Twentse groep, op hetzelfde podium als top onderzoeksgroepen van MIT en Berkeley!

Ik zou kunnen teruggaan in de tijd, naar hoe het allemaal begon, en dan zo tegen het eind van mijn rede bij het hier en nu kunnen uitkomen. In de hoop dat u dan nog wakker bent. Maar laat ik het eens anders doen. Stelt u zich eens, samen met mij, voor dat we alle dingen die we vandaag heel normaal vinden, gewoon blijven doen, maar dan zonder dat mijn vak bestaat. Er zijn geen chips. Denk ze maar even weg. Ze bestaan niet.

vullende informatie, maar een antwoord op de vraag krijgen we wél. Dat is bij Google nog wel eens anders, maar dit terzijde.

En Facebook, hoe pakken we dat aan zonder chips? Is er ergens een gigantisch prikbord waarop je je eigen hoekje kunt claimen om er foto's of leuke tekstjes op te prikken? Lopen er steeds mensen langs die daar een plakkertje met een opgestoken duim onder hangen: 'Like!' Maar, hoe weten we waar dat bord hangt, hoe kun je je eigen ruimte claimen, hoe weten al je vrienden dat je weer iets nieuws hebt opgeprikt? Een brief schrijven, dat lijkt dan het handigst. Maar een instant reactie krijg je niet.



Speakers Corner

Twitter dan. Twitter zonder chips. Daarbij krijg ik opeens beelden van de beroemde Speaker's Corner in Hyde Park in London. Iemand gaat spontaan op een zeepkist of keukentrapje staan en begint iets te roepen, in maximaal 140 tekens dit keer. Er komen omstanders, sommigen hebben er hun hobby van gemaakt om van spreker naar spreker te lopen en overal tegenin te gaan, (de zogenaamde hecklers). Op Twitter gebeurt dit ook, het escaleert dan snel (tot een 'fittie') In Twitterjargon ontstaat dan een fittie en die kunnen hoog oplopen. De Speakers Corner lijkt dus wel een beetje op Twitter. Maar hoe weet je waar de spreker staat in het park, wanneer hij gaat oren? Hoe breed je je kring van volgers



[nationalgeographic.nl]

Laten we eerst maar eens iets proberen te Googlen. Helaas. Geen internet, geen computer. Dat wordt bladeren in een stoffige 25-delige Winkler Prins of een tochtje op de fiets naar de bibliotheek. Daar zullen we heus de gewenste informatie ook wel vinden. Misschien niet voorzien van allerlei afbeeldingen of extra links naar aan-

uit? Iets 'retweeten', betekent dat dat je zelf ook op een trapje gaat staan en hetzelfde roept? En waar moet je dan gaan staan, om het gewenste effect te bereiken?

BACK TO THE FIFTIES?

Ach, dat zijn allemaal maar vluchtige voorbeelden van internet en social media, zal de cultuurpessimist misschien denken. Daar kun je best zonder. Dat laatste betwijfel ik ten stelligste, het zal nog steeds veelkleuriger en wijdverbreider worden. Maar goed, mobiel telefoneren dan? Met een navigatiesysteem uw weg vinden in een onbekende stad? Chips, zo wil ik maar duidelijk maken, zitten op dit moment overal in. Daarvoor hoeft u niet eens een geavanceerde auto te hebben die zichzelf inparkeert en zelf de garage belt bij een defect. Ook uw huishoudelijke apparatuur zou wel eens vreemde kuren kunnen gaan vertonen zonder chips. U schiet al in de stress als de email het een dag niet doet. Hoe kan ik nu mijn werk doen? Om het nog maar niet te hebben over apparaatjes die uw gezondheid waarborgen. Een pacemaker, een hoorapparaat.

Denken wij, kortom, de chip even helemaal weg uit onze huidige levenspatroon, dan gaan we echt terug naar de jaren vijftig. Of misschien terug naar 52 jaar geleden, om in de sfeer van vandaag te blijven. "Een rustige, overzichtelijke tijd", zullen sommigen van u misschien denken. "Zo gek was dat nog niet." Maar ik verzeker u, u schrikt al van technologie van 20 jaar oud. Of zelfs van 10 jaar oud. Met een laptop van die leeftijd wilt u vandaag echt niet meer werken.



1947: Bardeen, Brattain & Shockley, uitvinders van de transistor bij hun opstelling (en.wikipedia.org)

TECHNOLOGY IS LEADING

Een eerste conclusie die we kunnen trekken, is dan ook dat sinds de uitvinding van de transistor in 1947 een technologie-ontwikkeling op gang is gekomen die in hoge mate bepalend is geweest voor ons dagelijks leven van nu. Sterker nog: de technologie is ons steeds een stap vóór geweest! Toen de heren Bardeen, Brattain en Shockley die eerste onmogelijke transistor maakten en daar jaren later de Nobelprijs voor kregen – Bardeen kreeg later zelfs nog een tweede, ditmaal voor supergeleiding – hadden ze geen idee wat ze aanrichtten, wat het vervolg zou zijn.

Zoals Shockley zelf zei:

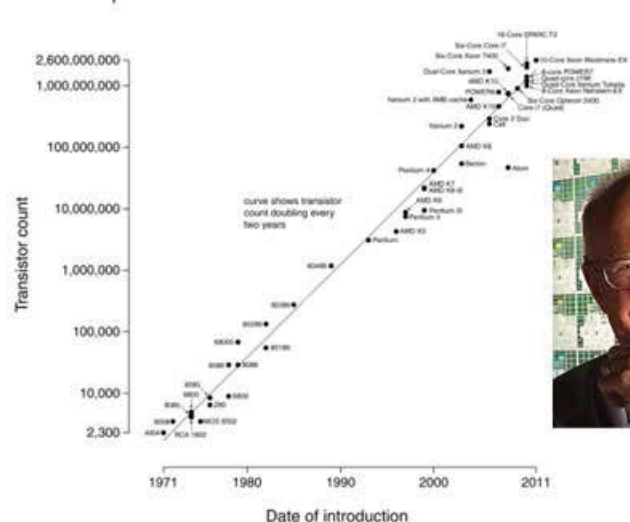
I am overwhelmed by an irresistible temptation to do my climb by moonlight and unroped.

Hij voegde daar nog aan toe:

This is contrary to all my rock climbing teaching & does not mean poor training, but only a strong-headedness.

Het geeft een mentaliteit aan van een techneut die zich niet laat leiden door vaste aannames en vastgeroeste patronen, die koppig doorgaat. En, belangrijk: die ook niet vooraf weet wat de uitkomst zal zijn. En dat is de mentaliteit die geleid heeft tot een van de grootste industrieën in de wereld, die geleid heeft tot een beslissende rol voor de techniek. De techniek, en de techneuten hebben steeds het voortouw genomen. Technology is leading! De toepassingen, en mét de toepassingen wijzelf, hobbelen er steeds achteraan.

Microprocessor Transistor Counts 1971-2011 & Moore's Law



Dames en heren, deze voortrekkersrol van de technologie is mogelijk dankzij een enorme inspanning van wetenschap en industrie. Financieel, in menskracht en creatief vermogen. Die ontwikkelingen hebben zich in een duizelingwekkende vaart voltrokken sinds die eerste transistor. Als je een transistor kan maken, dan kun je in hetzelfde materiaal ook best twee transistoren tegelijk maken en die alvast op elkaar aansluiten. En zo kwamen er steeds meer transistoren op een plakje materiaal en die zijn we chips gaan noemen. Chips zijn dus miniaturschakelingen met transistoren. Wat erg belangrijk is: het is veel goedkoper om een chip te produceren dan de losse transistoren en die later op elkaar aan te sluiten.

De Wet van Moore is hierin leidend geweest. Ik vertel u geen geheim als ik zeg dat dit eigenlijk helemaal geen wet is. Maar elke twee jaar verdubbelde het aantal transistoren dat je op een vierkante millimeter van een chip kunt maken.



Hard Disk van 5MB

Anders gezegd, elke twee jaar kon je méér met een chip, of haalde je er meer rekenkracht per vierkante centimeter uit. Dát is de reden dat u nu een iPhone5 heeft met vele GigaBytes geheugen aan boord. Dát is de reden dat u uw hele muziekcollectie mee kunt nemen in uw jaszak. Uw smartphone heeft dezelfde rekenkracht als die van uw drie jaar oude desktop computer of van een supercomputer van nog maar 15 jaar geleden.

Ter vergelijking, ongeveer uit de begintijd van deze universiteit. Hier wordt een computer hard drive, die een ton weegt, uit een vliegtuig geladen. De capaciteit is 5 Megabyte. Daarop kun je, in huidige termen, 1 foto opslaan. Eén foto!

VANZELFSPREKEND TOCH?

Voor de consument die zich verdringt voor de MediaMarkt voor de nieuwste tablet of smartphone, lijkt het haast vanzelfsprekend. Er is weer een nieuwe versie. Met een betere camera, meer geheugen, beter beeld, een accu die langer meegaat. Voor bijna dezelfde prijs als de vorige. Wijlen Steve Jobs was een meester in het lanceren van nieuwe producten. Met veel aandacht voor het uitwendig design. Afgeronde hoekjes, smaakvol vormgegeven stekertjes, mooie plaatjes op het scherm. Maar de echte revolutie vond en vindt, keer op keer, in het onzichtbare plaats, binnenin dat smaakvol vormgegeven kastje. Hij heeft dat zelf overigens ook wel gezegd:

'Design is not just what it looks like and what it feels like. Design is how it works.'



Want vanzelfsprekend, dat kan ik u verzekeren, gaat dit niet. Die eerste transistor in 1947 was een wat rommelig knutselwerkje, goed met het blote oog te zien. In uw iPhone5 zitten ook transistoren, met miljarden tegelijk op chips. Het zijn de belangrijkste bouwstenen van de informatiesamenleving geworden. Ze kunnen schakelen en versterken. U kunt een transistor zien al een soort waterkraan op nanoschaal: met een klein beetje druk op de hendel kunt je een heleboel water laten stromen. De elektrische spanning op de transistor is dan de waterdruk op de kraan en de elektrisch stroom door de transistor is de waterstroom door de kraan. Transistoren zijn op dit moment maar 20 nanometer groot. Zeker NIET met het blote oog te zien, we hebben het over 40 atomen lang.

Denkt u zich eens in dat ál die miljarden transistoren, ingenius met elkaar verbonden, het allemaal doen, geen één uitgezonderd. Niet vanzelfsprekend, nee. Zouden we een iPhone opbouwen uit losse transistoren die we wel zouden kunnen zien, als dat al mogelijk zou zijn, dan zouden we een toestel krijgen zo groot als de Eiffeltoren.





Eiffeltoren, iPhone, kerncentrale, geanimeerd

En met de stromen die elke losse transistor nodig heeft, heb je snel een kerncentrale nodig om de iPhone, laten we 'm zo noemen, te laten werken. En, Oh ja! Onze iPhone zou een miljoen keer langzamer zijn! Het is maar goed dat er chips zijn dus! En om een gevoel te krijgen voor de pakkingsdichtheid en complexiteit van een chip vandaag de dag: zou elke transistor een mens zijn zijn, met een vierkante meter ruimte voor zichzelf, dan kunnen we vandaag de dag de hele wereldbevolking op een stukje van 70 bij 70 kilometer passen om de dichtheid van een chip te krijgen. Al die mensen zouden dag en nacht doorwerken, nooit ziek zijn en dit tientallen jaren lang. En dat is nog maar een enkele chip. In een smartphone zitten al heel wat chips en er worden al een miljard smartphones per jaar gemaakt. Dus nog veel meer chips met nog meer transistoren. We produceren al decennia veel meer transistoren dan rijstkorrels op deze aarde.

GRENZEN IN ZICHT?

Toch, dames en heren, is over de Wet van Moore ook al decennia gezegd: over tien jaar loopt die echt op zijn eind, dan moeten we het radicaal anders gaan doen. De fysieke grenzen komen dan in zicht. Steeds weer bleek de voorspelling onjuist. Hoe dat mogelijk is? Aan de ene kant door die fysieke grenzen gewoon te verleggen. Klimmen in het duister, zonder touw, zoals Shockley deed. Mijn collega Jurriaan Schmitz, een paar deuren verderop in ons gebouw, doet dat met zijn groep. Zo toonde zijn groep onlangs aan dat je de levensduur van de accu van je smartphone flink kunt verlengen door iets te doen aan weglekkende stroompjes. Daarvoor moet je met slimme hulpmiddelen de chips flink hard knijpen. Heel spannend onderzoek, letterlijk en figuurlijk. Hoe dit werkt, gaat binnen dit betoog iets te ver, maar het is typisch zo'n oplossing waarbij je als onderzoeker niets voor vanzelfsprekend aanneemt. En risico's niet uit de weg gaat. Het kan een doodlopende weg zijn. Maar in dit geval is de techniek zeer veelbelovend.

Aan de andere kant zijn de grenzen verlegd met gigantische investeringen in onderzoek en ontwikkeling. Dit is een van de grootste industrieën van de wereld en er zijn elke dag heel veel slimme mensen hard aan het werk over de hele wereld. Telkens komt wel weer iemand met een creatief idee om verder te miniaturiseren. Zo speelt het Nederlandse bedrijf ASML een sleutelrol met haar meest geavanceerde machines voor de productie van chips. Een nieuwe chipfabriek kost nu meer dan 10 miljard dollar, en er zijn maar enkele partijen in de wereld die elke paar jaar zo'n investering kunnen doen. En met elke fabriek wordt – als het goed is – weer geld verdiend voor de volgende, nog indrukwekkender fabriek.

Wat vooral de grenzen verlegt van de Wet van Moore, is creativiteit. Hetzelfde geldt voor ons werk, als chiparchitecten: zelfs als je vanaf vandaag niet verder kunt miniaturiseren, de Wet van Moore zou echt stagneren, dan nog kun je als architect nog steeds mooie oplossingen bedenken. We bouwen ook nog steeds vernieuwende gebouwen met bakstenen!

NANOTECHNOLOGIE

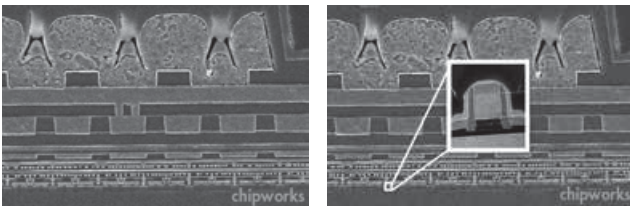
En toch hoor ik wel eens, dat is toch een aflopende zaak waar jullie mee bezig zijn. Microelektronica, dat is toch allemaal veel te groot. De toekomst is nano. Jullie zijn nog steeds top-down bezig, de toekomst is aan bottom-up. Om die termen toe te lichten: wij maken een ontwerp, dankzij die razend knappe machines van ASML worden daar chips van gemaakt. Met elke generatie maken we het iets kleiner, als beeldhouwers. Van groot naar klein, of van heel klein naar nog veel kleiner. Maar straks wordt het bottom-up, hoor ik dan. Je neemt de kleinste bouwsteen, een molecuul, en maakt daar een soort transistor van. Dus je begint klein en bouwt naar steeds groter. Dat is prachtig, en er worden al mooie resultaten geboekt.

Maar laten we die resultaten toch eens onder de loep nemen. Of beter gezegd, onder de Scanning Tunneling Microscopie. We kunnen in ons uitstekend geoutilleerde NanoLab prachtige nanostructuren maken. Vaak met één tegelijk, of met een aantal moleculen dat zichzelf organiseert op een oppervlak. Met genoemde STM-microscopie kunnen we die nanostructuren individueel aftasten, bekijken, oppakken, besturen. We kunnen materialen maken met eigenschappen die nog niet bestonden.

Dat enkele van die vindingen in de chips van de toekomst een plek gaan krijgen, staat voor mij buiten kijf. Maar op dit moment gaapt er nog een groot gat tussen veel vindingen uit de nano-wetenschap en de enorm complexe chips die nu in de winkel liggen.

Want stel, ik ben in staat één molecuul te maken dat ongeveer dezelfde werking heeft als een siliciumtransistor, dus het kan schakelen en versterken. Ik toon aan dat het molecuul werkt. Prachtig. Maar zet dat eens af tegen de enorme complexiteit van de iPhone die ik u net noemde.

Daarin worden de miljarden transistoren met elkaar verbonden door snelwegen, soms acht of negen lagen boven elkaar. Hoe ga je dat met die moleculen doen? Hoe garandeer je dat het allemaal werkt? Het is een beetje de situatie waarin Shockley, Bardeen en Brattain verkeerden. Ze hadden iets heel moois gemaakt, maar nu? Persoonlijk denk ik dat we niet een heel nieuwe elektronica gaan uitvinden. Ik denk dat top-down en bottom-up elkaar gaan ontmoeten. Maar tot het zover is, gaat die top-down sneltrein in de chipontwikkeling nog wel even door, dat kan ik u verzekeren. Dat is geen gelopen race, dat IS al nanotechnologie, dames en heren, al jaren. Het is ook geen productontwikkeling, zoals ik wel eens hoor, het is het vinden van uiterst creatieve oplossingen die soms de fundamenteën doen schudden. Wat nu te koop is in de winkel zijn transistoren van 40 a 50 atomen lang en een paar atomen dik. Goed verborgen weliswaar. Maar een beetje zichzelf respecterend molecuul is al groter dan dat. En om een idee te krijgen van de complexiteit: een microprocessor chip van een duimnagel groot bevat in totaal 20 kilometer aan bedrading; alle nanostukjes goed aangesloten natuurlijk!

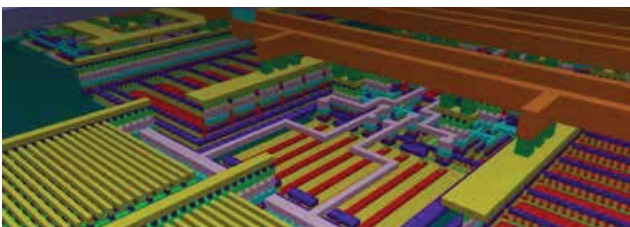


28 nm transistor waar je de vingerdruk van de losse atomen kunt zien

ONS VAK

Daarmee is het de hoogste tijd om eens iets te vertellen over hoe wij te werk gaan in ons vak, wat we eigenlijk dóen, met wie we daarvoor samenwerken.

Om te beginnen: wat zijn chips eigenlijk? Chips zijn eigenlijk gewoon elektronische schakelingen die vroeger op een printplaat zaten in bijvoorbeeld radio's en televisies. De onderdelen werden erop gesoldeerd en je kon ze met het blote oog zien en beetpakken. Nu pasten er op een printplaat helemaal niet zoveel onderdelen. Zelfs op de eerste chips kon je de onderdelen nog met het blote oog zien. Maar vandaag zijn we in staat ontzaglijk veel onderdelen op een klein plaatje silicium te proppen. Chips worden geproduceerd in een soort drukproces waar heel veel laagjes over elkaar worden gemaakt, met elk laagje een eigen patroon. Door zo laagje voor laagje de chip op te bouwen kunnen we een heel complexe 3D structuur maken.



Op deze manier kunnen we via zogenaamde maskers basisonderdelen tekenen zoals transistoren, weerstanden, condensatoren en zelfs spoelen! Wat wij als ontwerpers uiteindelijk doen is het ontwerp maken van deze 3D wirwar. Het lijkt haast het ontwerp van een land, compleet met de infrastructuur. Fouten maken is geen optie, want reparatie achteraf is bijna niet mogelijk.

Chips worden gefabriceerd in grote, uiterst kostbare fabrieken. Van de meest geavanceerde 'fabs' vinden we er maar een paar op de wereld, zoals die van Intel, Samsung, TSMC en in Europa STMicroelectronics. U kunt zo'n chipfabriek zien als een soort drukkerij waar een ontwerp van een chip wordt gedrukt op nanoschaal. Het drukproces zelf wordt, misschien wat verwarrend, "technologie" genoemd en wat wij doen is een ontwerp maken dat in die ene technologie wordt gedrukt. Zoals je in een drukkerij hele verschillende boeken kunt drukken, kun je in een chipfabriek dus ook een heleboel verschillende soorten chips fabriceren. Ons ontwerpproces lijkt op dat van de schrijver van het boek, in deze analogie. En ja, het is minstens zo creatief!

Voor een chipontwerper zijn onze belangrijkste randvoorwaarden het oppervlak van een schakeling en het stroomverbruik. Beiden moeten zo klein mogelijk zijn. Een goed ontwerp doet zijn werk onder deze randvoorwaarden. En natuurlijk moet de schakeling ook zijn werk goed doen, of liever beter!

KRACHT VAN TWENTS ONDERZOEK

Er zijn verschillende soorten chips: zo zijn er chips om informatie op te slaan, de geheugens. Een andere categorie zijn de processoren, om mee te rekenen en te regelen. Tenslotte zijn er chips waarmee een apparaat met de buitenwereld kan communiceren. Wij in Twente doen onderzoek naar met name deze laatste categorie. Deze categorie kenmerkt zich door enorme uitdagingen omdat onze schakelingen met de buitenwereld communiceren het zogenaamde analoge domein van de elektronica. Analog klinkt ouderwets, maar het tegendeel is waar.

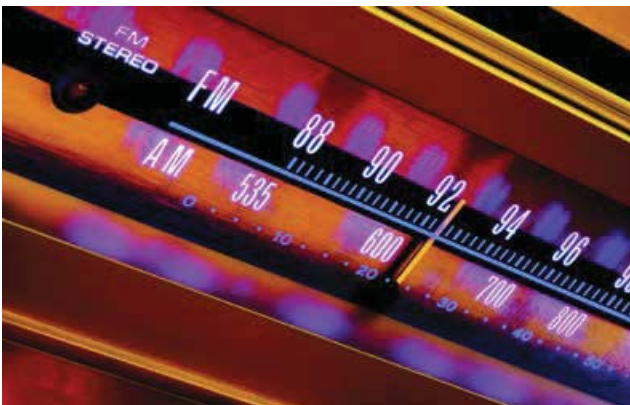
Binnenin een chip is zo veel mogelijk informatie digitaal. De signalen bestaan uit enen of nullen. Het voordeel van digitale schakelingen is dat ze robuust zijn voor fouten. Er zijn immers alleen enen en nullen toegestaan, dus als er een 0.1 is dan wordt dat gewoon geïnterpreteerd als een 0. Bovendien worden bij digitale schakelingen alleen maar op bepaalde tijdstippen, met de regelmaat van de klok, naar de waarden gekeken, dus als er tussen twee overgangen iets raars gebeurt, dan maakt dat niets uit. Het ontwerpen van digitale schakelingen is nu bijna volledig geautomatiseerd. Vanuit een soort programmeertaal worden in stapjes je maskers voor de "drukkerij" automatisch ontworpen. De uitdaging bij digitale schakelingen is overzicht houden over de enorme complexiteit.

Maar de signalen die om ons heen, in de buitenwereld van de chip, aanwezig zijn, zijn nu eenmaal analoog. Een sensor pikt een analoog signaal op, zoals geluid. Voor verwerking op de chip wordt het eerst omgezet naar digitaal. Aan de uitgang moet het signaal toch weer terugvertaald worden naar analoog. Zo zijn microfoons en luidspreker duidelijke voorbeelden van analoge interfaces. Maar ook een kabel voor digitale communicatie of een glasvezel moeten analoog worden aangestuurd en uitgelezen. Je zou best enen en nullen op een kabel kunnen zetten, maar dan kan er helemaal niet zo snel data door heen omdat een kabel zich nu eenmaal helemaal niet zo ideaal gedraagt bij hoge snelheden. Je zou een dure kabel kunnen gebruiken met dure stekkers, maar het is veel slimmer om aan beide kanten van een low-budget kabel wat elektronica te zetten zodat het geheel beter en goedkoper werkt. Een voorbeeld hiervan is de USB-bus die in iedere computer zit tegenwoordig.

Maar de meest uitdagende analoge schakelingen vinden we in draadloze communicatie. En daar zijn we in Twente goed in.

ALLES RADIO

Bij draadloze communicatie wordt de informatie op een zogenaamde draaggolf gezet -gemoduleerd- zodat de informatie door de "ether" kan reizen. Deze draaggolf is een zogenaamde elektromagnetische golf. Net als zichtbaar licht, of infra rood, maar dan met een veel lagere frequentie. Een bekend voorbeeld is de FM radio. In een FM radio worden frequenties ontvangen tussen de 88 en 108 MHz.



Zenderschaal

Door op een bepaalde frequentie af te stemmen, kun je de zender ontvangen die op die frequentie wordt uitgezonden. Als je naar een lege draaggolf luistert, dan hoor je niks, behalve een beetje ruis misschien. Maar als er muziek of spraak wordt uitgezonden kun je dat horen. Dat is mogelijk omdat de muziek op de draaggolf is gemoduleerd en uitgezonden. In de FM radio wordt die radiogolf weer gedemoduleerd en krijg je geluid. Een mobiele telefoon werkt ongeveer hetzelfde. Een GSM telefoon bijvoorbeeld ontvangt signalen rond de

900 MHz. Deze signalen noemen we in ons jargon ook radiosignalen, hoewel ze niks te maken hebben met een klassieke radiozender. Sterker nog, het elektronicegedeelte in een telefoon dat voor het zenden en ontvangen zorgt noemen wij zelfs "radio".

Het grote probleem bij radio is dat de draaggolven op vaak erg hoge frequenties zit, zodat de elektronica er moeite mee heeft om de signalen te bewerken. Bovendien zitten de zenders dicht op elkaar in wat we het spectrum noemen, zodat het lastig is om een zwak signaal te ontvangen dat op een frequentie zit die vlak naast een duizend keer sterkere verstoorder. Bijvoorbeeld: als mijn telefoon nu hier op het podium het zwakke signaal van het basisstation op het dak van het Horstgebouw op de campus wil ontvangen, en u zit hier op de voorste rij lekker te twitteren dat het zo interessant is hier. Dan is het signaal dat u uitzendt veel sterker dan het signaal dat ik van het basisstation een eind verderop kan ontvangen. En dat is moeilijk voor de elektronica.

We moeten dus zwakke signalen die we op de antenne ontvangen versterken, zonder dat de sterke signalen die er vlak naast zitten, de radio doen vastlopen. We luisteren eigenlijk naar -om in twitter termen te blijven- een vogeltje langs een drukke landingsbaan. Met dopjes in je oren heb je minder last van de vliegtuigen, maar hoor je het vogeltje niet, en zonder doppen wordt het vogeltje nogal overstemd door de straalmotoren.

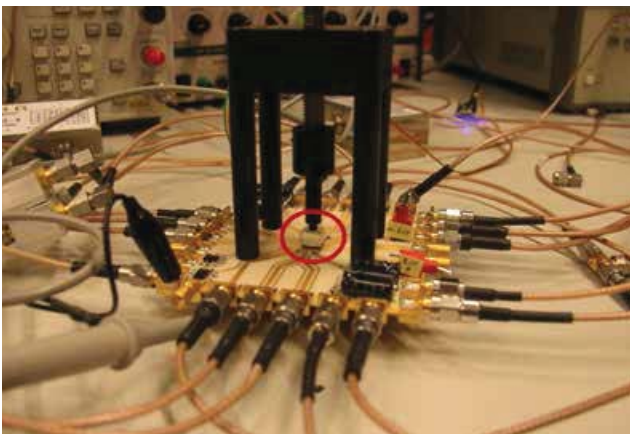
SLIMME FILTERS

Nu ga ik hier niet uitleggen hoe radio's, technisch gezien, werken. Dat voert te ver, maar u kunt zich wel voorstellen de filters, die bepaalde frequenties wél doorlaten en anderen niet, erg handig kunnen zijn in radio's. Je kunt dan de lage tonen van die straaljager wegfilteren en de hoge van het vogeltje doorlaten. Dit soort filters zitten inderdaad in alle draadloze communicatie apparatuur, zoals uw smartphone, maar het probleem is dat voor elke frequentie weer een ander filter nodig is.

Dus als we in een smartphone meer willen dan ouderwets GSM dan moeten er meer van die filters in. Een moderne smartphone heeft heel veel radiostandaarden aan boord GSM, UMTS, Wifi, Bluetooth, GPS, en ga zo maar door. Al deze radiostandaarden hebben weer een andere frequentie waarop ze zenden en ontvangen en dat betekent dat er een hele serie filters nodig is. Nu is het technisch lastig om een filter van voldoende kwaliteit op de chip te zetten. Het klassieke filterontwerp heeft een spoel en een condensator, en vooral die spoel is lastig te integreren. Verbind ze dan met draadjes buiten de chip, denkt u misschien. Wat je dan krijgt is een hele bos spoelen. Dat wordt echt veel te groot.

HERONTDEKKING

In onze IC Design groep hebben we een paar jaar geleden de trend gezet om deze filters tóch op een chip te zetten. We hebben daarvoor een concept herontdekt, of heruitgevonden, dat al dateerde uit de jaren 60 en in vergetelheid was geraakt. Vertaald naar de huidige tijd, blijkt de techniek juiste uitermate geschikt voor de zeer geavanceerde nanometer technologieën. De ontdekking kwam eigenlijk toen we bezig waren om een bestaande ontvangerschakeling heel goed te begrijpen, om hem nóg beter te kunnen maken. Dat begrijpen vereist veel doorzettingsvermogen, moeilijke wiskunde en rekenwerk. Maar het mooie van dit werk is dat je vervolgens moet proberen het zo simpel mogelijk te maken. Dan ben je in staat ermee te gaan spelen op een intuïtieve manier. Dat kenmerkt de goede ontwerper. Hij of zij laat even het noeste rekenwerk los en bekijkt het hele schema eens, bijna als een kunstwerk. Als je zo kunt gaan spelen met schakelingen, dán kun je uitvindingen doen. Je rekent hem niet meer door, maar je ziet het gewoon vóór je. Zó zagen we ineens dat door een ander signaal als uitgang te nemen in plaats van de normale uitgang we plotseling een filter kregen dat we elektronisch konden variëren in frequentie. Dat was een heel helder moment. Dan wil je meteen meer weten. Al brainstormend, konden we op het whiteboard snel beredeneren dat het met de ruis ook wel goed zat. We hebben er een paar goede AIO's opgezet om dit verder te onderzoeken. Intussen hebben we een paar mooie papers kunnen publiceren op de topconferentie van ons vak, en nu springt de rest van de wereld erop, inclusief de industrie. Hét voordeel van deze filters is dat ze op een chip kunnen worden gemaakt, zonder de technologie aan te passen en ook nog eens afstembaar zijn. Dus je hoeft niet meer voor elke frequentie een ander filter te gebruiken, maar je neemt er gewoon één, en die stel je in op de frequentie die je wilt ontvangen.



Meetopstelling

Dat is met recht een doorbraak, met alle nieuwe toepassingen van smartphones die nog in het verschiet liggen. Er moet nog wel het nodige uitgezocht worden aan deze filters, maar ik denk dat ze over een jaar of vijf wel in de winkel liggen in toepassingen. In zekere zin is het op-

nieuw jammer dat die prachtige vinding niet meer zichtbaar is. Maar wel merkbaar!

RUIS UITDOVEN

Een ander idee uit mijn groep, dat al wat ouder is, heeft ondertussen de status van een standaardtechniek die studenten in hun leerboek aantreffen. Dit is de zogenaamde noise cancelling techniek. Die ontdekking verliep tamelijk onconventioneel. Eric Klumperink was technicus in onze groep en deed al een aantal jaren goed onderzoek en op een goede dag besloot Eric een proefschrift te gaan schrijven. Eric had een onconventioneel idee: stel je hebt twee transistoren met elk 3 aansluitpunten. Hoeveel schakelingen kun je daarmee maken? Na wat abstraheringen en aannames kwam hij tot het aantal van 145. Eric had een database gemaakt van 145 schakelingen, maar hij had geen idee wat al die schakelingen nu precies deden. Er was toen een AIO in de groep, Federico Bruccoleri, en die kreeg de opdracht om in die database van Eric te gaan zoeken naar bruikbare versterker schakelingen die nog niet bekend waren. Bij het doorrekenen van één zo'n schakeling bleek dat als je de ruis uitrekende er een minteken te voorschijn kwam. En dat was raar, want normaal is ruis altijd 'plus', het telt altijd op. Twee vliegtuigen maken meer geluid dan één. Dus twee transistoren moeten meer ruis produceren dan één. Dat minteken heeft ons aan het denken gezet, en al vrij snel hadden we een schakeling gevonden waar de ruis van een transistor volledig kon worden uitgedoofd. Vreemd, leuk, maar wat moet je ermee?

Welnu, er is in een radio ontvanger altijd een eerste versterker na de antenne die het zwakke signaal moet versterken. Deze versterker heeft weer een eerste transistor en die produceert normaal ruis. Als we nu eens die antenneversterker gingen uitrusten met onze noise cancelling, dan zouden we wel eens ontvangers kunnen maken die weinig ruis hebben en dus erg gevoelig kunnen zijn! De ruis meteen na de antenne de kop indrukken: zo kreeg de wilde exercitie van Eric ineens enorm praktisch nut!



De ouderwetse techniek voor antenne versterkers is dat ze werken volgens een resonantie principe. Op één frequentie versterken ze heel goed en hebben ze ook weinig ruis, maar op een andere frequentie zijn ze niet bruikbaar. Net als een schommel die met een bepaald ritme zwaait, als je hem op het juiste moment steeds een duwtje geeft. Maar oh wee, als je het net iets sneller of iets langzamer doet. Dan gaat dat niet. Dus de ouderwetse antenneversterkers werkten maar op één frequentie en als je meerdere draadloze standaarden wilt ontvangen in je smartphone, heb je dus een heleboel van die versterkers nodig, die ook nog eens veel ruimte innemen op de chip. Het leuke van de noise cancelling techniek is dat je een antenneversterker kunt gebruiken voor alle frequenties. Dat scheelt kosten en volume, maar opent ook de weg naar nog meer radio standaarden in een smartphone. Zojuist maakte ik al duidelijk dat we ook een filter gaan maken dat meer standaarden aan kan. Eén en één is twee! We zijn er dus klaar voor om het aantal mogelijkheden van mobiele communicatie nog drastisch te doen toenemen. En dat ook nog bij een lager energieverbruik.

U denkt misschien: 'Who cares, dat heb ik niet nodig' maar ik verzeker u nu al: dat heeft u wel! we spreken elkaar over 5 jaar wel even hierover. Onze oorspronkelijke noise cancelling techniek werd als eerste toegepast in TV ontvangers, maar nu ook in smartphones. Het is een standaardtechniek geworden en iedereen in dit vakgebied weet dat het idee uit Twente komt.

COGNITIEVE RADIO

We zijn nu intussen bezig met andere radio technieken. Zoals u wellicht weet is vrije ruimte in de ether erg schaars en telecombedrijven betalen in veilingen miljarden om een stukje frequentie te mogen gebruiken. De behoefte aan draadloze bandbreedte stijgt echter zo hard dat we zeer binnenkort een grote verkeersopstopping krijgen in de ether. Op een gegeven moment gaan al die draadloze apparaten elkaar verstoren en stort de capaciteit van het netwerk in. U kent het wel: als u tijdens oud en nieuw even wilt bellen, lukt dat niet. En met het groeiend aantal draadloze toepassingen moeten we oppassen dat we deze problemen niet dag-in-dag-uit krijgen!

Een manier is op zoek te gaan naar vrij spectrum. Officieel zijn bijna alle frequenties in gebruik.

Maar als je écht gaat meten, dan zie je dat de ether behoorlijk leeg is. De ruimte is wel gereserveerd, maar wordt nauwelijks gebruikt. Een nieuwe ontwikkeling is dan ook cognitieve radio. Dat is een radio die op zoek gaat naar vrij spectrum en die gaat gebruiken zolang niemand anders er last van heeft. Zodra de eigenaar van het spectrum er aankomt, moet je wegwezen en ergens anders gaan zenden. Op deze manier kunnen we met z'n allen veel meer draadloos communiceren. Het lijkt een beetje als rijden over de vluchtstrook. Zolang er niemand met pech staat, kun je er eigenlijk best overheen rijden. En op radio gebied zijn er zelfs veel meer vluchtstroken dan normale rijbanen, dus tel uit je winst!

We moeten dan wel slimme radio's maken die op zoek kunnen gaan naar vrije ruimte in het frequentie spectrum en die ook nog op al die frequenties kunnen zenden en ontvangen, zonder last te hebben van dat schommel-effect.

Om op zoek te gaan naar vrij spectrum, gebruiken we normaal een spectrum analyzer. Dat is een apparaat van 20 kg en een prijs van 100.000 Euro. Hoe krijg je dat nou in je telefoon, of liever : op een klein hoekje van een chip in je telefoon?



Spectrum analyzer

ELSE KOOI PRIJS

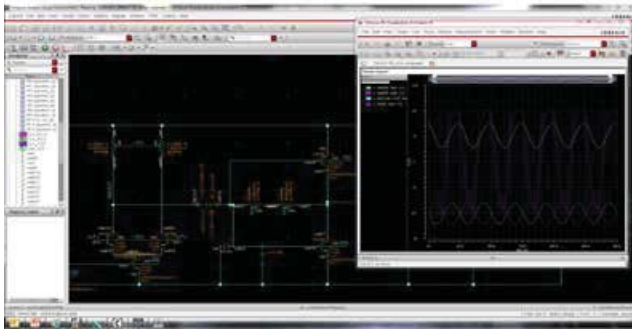
Samen met de EWI groep Computer Architecture for Embedded Systems (CAES) hebben we hier onderzoek aan gedaan en dankzij een combinatie van analoge en digitale technieken konden we een spectrum analyzer op een klein chipoppervlak maken. Ik geef toe, hij is wel iets langzamer dan dat apparaat van 100.000 Euro, maar dat mag ook wel in deze toepassing. In feite maken we twee ontvangers die identiek zijn, en door op zoek te gaan naar de samenhang, oftewel correlatie, van uitgangssignalen met digitale technieken kunnen we de ruis van de ontvanger weg rekenen. Deze wiskundige technieken komen uit de radio astronomie, maar kunnen nu indalen in consumentenelektronica. De betreffende promovendus – Mark Oude Alink – heeft hier gisteren de Else Kooi prijs van 5.000 euro voor gekregen. De prijs is genoemd naar de Nederlander die voor Philips ooit een zeer belangrijke vinding deed die nog altijd belangrijk is in het ontwerp van chips. Al in 1966!

Tot zover een paar concrete voorbeelden van ons onderzoek. We doen veel meer. Ik noem maar even: we waren 5 jaar lang wereldrecordhouder van de zuinigste analoog naar digitaal omzetter. We hebben een wereldrecord op tijdprecisie maken op een chip. Het snelste elektronische filter op een chip komt ook uit onze Twentse groep.

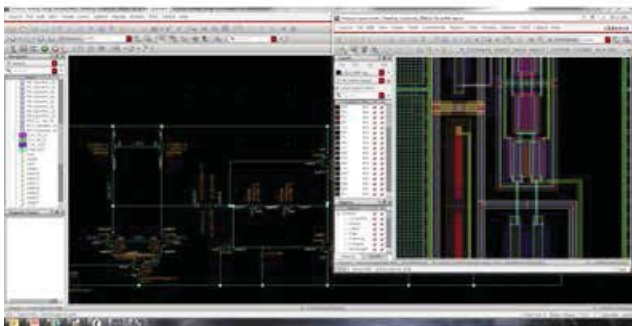
Let wel, wij ontwerpen geen producten. Dat moet de industrie doen. Wij doen onderzoek naar nieuwe ontwerp-technieken, waarmee de industrie -overigens niet zo heel veel later - producten kan ontwerpen. Wij maken bij ons

onderzoek gebruik van bestaande technologie uit de industrie om aan te tonen dat onze nieuwe ontwerpprincipes daadwerkelijk werken. Het zou te makkelijk zijn om alleen op de tekentafel chips te ontwerpen zonder ze echt te laten maken en doormeten. Op papier en met computersimulaties kun je veel doen, maar in de praktijk zijn er allerlei problemen, en die moeten we natuurlijk ook oplossen wil ons werk praktisch nut hebben.

Simuleren



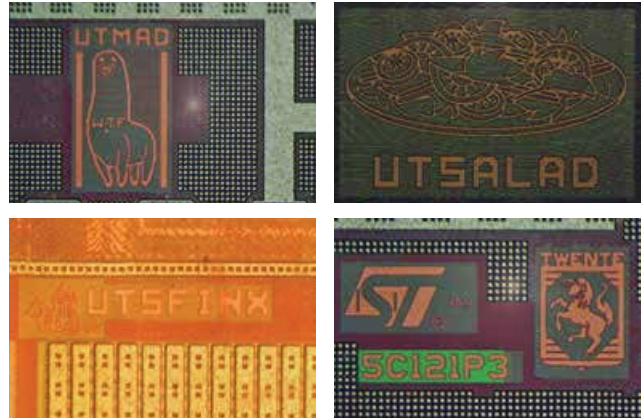
Lay-Outen



Om ons werk te doen moeten we dus een aantal praktische zaken goed geregeld hebben. Zo hebben we speciale chipontwerp-software waarmee we onze ideeën kunnen simuleren: doet de schakeling wat je ervan verwachtte? Het eerste idee ontstaat misschien op papier, of op een whiteboard maar vaak ook gewoon met ons hoofd onder de douche of zelfs hier in het zwembad op de campus. Een idee is leuk, maar we willen ook weten wat de schakeling gaat doen, zonder hem eerst fysiek te laten maken. Simulaties zijn hiervoor onontbeerlijk. We voeren een schema in op de computer in een speciaal programma.

Op basis van de simulaties gaan we ons idee nog finetunen en verbeteren. De uiteindelijke schakeling moeten we vertalen naar een 3D plattegrond van de chip, naar de layout.

Ik kan u zeggen, aan de layout kan een goede ontwerper zien of het ontwerp goed is. We willen natuurlijk ook gewoon dat een layout van een chip gewoon móóí is, en zo tekenen we ook af en toe ook artistieke logo's in onze chips. Niemand kan het zien, maar wij hebben wel lol!



Die chip layout wordt vervolgens vertaald naar een masker voor de chipfabriek. De chips maken wij niet in eigen huis. De reden hiervoor is simpel. Wij maken ontwerpen volgens de laatste stand der techniek. Er zijn maar enkele partijen in de wereld die zich zo'n fabriek kunnen permitteren. Om normaal vanuit een universiteit een testchip te laten maken moet je erg veel geld neerleggen. Een moderne testchip kost snel 30.000 Euro voor een vierkante millimeter, en we laten heel wat vierkante millimeters per jaar maken! Maar vaak zijn de modernste technologieën niet eens beschikbaar voor universiteiten.

Hoe kom je dan binnen bij zo'n fabriek, als kleine Twentse groep. Wel, chips worden gemaakt op grote "wafers"

Daar passen duizenden chips op, die ieder weer miljarden componenten hebben. Als wij een hoekje van zo'n wafer mogen gebruiken, dan kunnen onze chips daarop. Hoe krijg je zo'n fabrikant zo gek dat hij ons dat hoekje geeft, bij voorkeur gratis? Dat doen wij met onze kennis. Dat is een mooie ruil. Die fabrikant heeft belang bij die nieuwste inzichten, wij willen wat silicium gebruiken. Na een tijdje komen dan de kant-en-klare chips bij ons terug in het lab en krijgen we opnieuw een spannende fase: doet de chip wat-ie moet doen? Daarvoor hebben we een geavanceerde meetruimte tot onze beschikking.



Maar waarom geef je je kennis gratis weg, zult u zich afvragen? Dat doen wij niet, wij krijgen in ruil toegang tot de nieuwste technologie. De kennis blijft bij ons, tenzij de fabrikant de kennis exclusief wil hebben, dan verkopen we het patent. Maar vergeet u niet, wij doen veel van ons werk met publiek geld, wij willen erover publiceren en uitleggen wat wij doen. Natuurlijk doen we ook derde-geldstroom onderzoek, waarbij een bedrijf cash betaalt voor een bepaald onderzoek, dan is die openheid minder groot. Maar we publiceren altijd, nadat het patent is aangevraagd. Zo is uit mijn groep ook een succesvolle onderneming ontstaan, Axiom IC, dat dit jaar is overgenomen door Teledyne DALSA. Commerciële vraagstukken vinden soms direct hun weg naar deze ontwerpers, soms werken we nauw samen.

Dames en heren, er is jaren gesproken over de digitale revolutie. Analooft stond voor alles wat ouderwets was. Welnu ik kan u verzekeren:

ANALOOFT HEEFT DE TOEKOMST

Ik zal u vertellen dat Intel bij de ontwikkeling van een nieuwe processor duizend ontwerpers aan het werk zet, voor een belangrijk deel analoge ontwerpers omdat je die razendsnelle signalen met louter digitale technieken gewoon niet meer begrijpt of kunt doorrekenen. En tegelijkertijd zitten er miljarden transistoren op een moderne processor. En weet u de exercitie van Eric Klumperink nog, die ik eerder beschreef? Twee transistoren en 145 mogelijkheden om ze op elkaar aan te sluiten. Ga dit eens voor een paar miljard transistoren doen. Een fout ligt al snel op de loer. Het is de kunst om dat te vermijden.

DE TOEKOMST

De Wet van Moore dicteert dat er steeds meer transistoren op een chip zitten. Dat kon maar doorgaan dankzij steeds verdergaande miniaturisatie. Maar op een gegeven moment houdt dat natuurlijk op. Op dit moment kunnen we in het lab prima transistoren maken van 10 nanometer lang, 20 atomen! Nog kleiner, en we krijgen toch echt lastige atomaire effecten. Maar op zich betekent dat niet het einde van de vooruitgang van de elektronica industrie. Kijk eens naar passagiersvliegtuigen. Die gingen ook steeds sneller vliegen, ook dat was een exponentiële groei. Maar op een gegeven moment was het niet meer rendabel om nog sneller te vliegen. Het snelste passagierstoestel was de Concorde, u kent hem vast nog wel, nu een leuk museumstuk. Intussen is er nog steeds innovatie in passagiersvliegtuigen. Ze worden stiller en zuiniger, dankzij nieuwe technieken en materialen.

Met chips gebeuren dit soort ontwikkelingen ook al. Wist u dat de snelheid van een microprocessor al 10 jaar niet meer toeneemt? En toch zijn computers kleiner, sneller en zuiniger met energie geworden. Dit komt omdat er op een chip nu meer processoren liggen waarover het werk verdeeld wordt. Het is dus teamwerk geworden binnenin die chip.

Maar wat als de transistoren niet meer kleiner kunnen worden? Dan passen er niet zulke grote teams van processoren op een chip toch? Welnu, dan zijn er nog nieuwe materialen die de transistoren beter kunnen maken. Ik denk dat hier het nano-onderzoek goed van pas kan komen. Maar het gaat helemaal niet alleen om "kleiner", het gaat om: meer rekenkracht, lager stroomverbruik en goedkoper. En als we ruimte te kort zouden komen, kunnen we nog in de hoogte gaan stapelen, want een chip is nu nog maar een plat 2 dimensionaal ding.

Kortom, het is allesbehalve een gelopen race, we kunnen nog wel even vooruit. Ik denk dat de enige echte rem op de groei die van de economie is; het zal uiteindelijk moeilijk worden om hele grote investeringen te doen.

Maar dan is er altijd ook nog de ontwerper. We kunnen nog vreselijk veel winnen als we beter gaan nadenken over het ontwerp van de toekomstige processoren. Nu is er nauwelijks tijd om daarover na te denken omdat de processor steeds weer in een kleinere technologie kan worden gezet. Maar als we dat nu even niet doen? Als we nu eens een betere processor ontwerpen? Zoals een betere stad? De architectuur van een processor is best oud, zoals een middeleeuwse stad. Met grachten en smalle wegen. Maar als we nu met het zelfde materiaal eens vanaf scratch een betere stad ontwerpen, met betere ontsluitingswegen, dan kunnen we toch een beter processorontwerp maken? Hier zie ik een grote toekomst voor de chipontwerper opdoemen. Zodra de technologie tegen haar grenzen aanloopt, zowel technisch als economisch, kan de ontwerper eindelijk eens goed gaan nadenken over een veel beter ontwerp. Kijk maar naar vliegtuigen.

Zoals de uitvinders van de transistor geen idee hadden van internet, Facebook of Twitter, zo is het ook lastig om tien of twintig jaar vooruit te kijken zonder er al te veel een Chriet Titulaer verhaal van te maken: kent u hem nog, trouwens? De technieken die wij vandaag uitvinden zitten over vijf jaar in producten die in de winkel liggen. Wat wel duidelijk is, is dat we nog steeds meer connected raken. Mijn inschatting is dat dit op een steeds natuurlijker manier gaat gebeuren. Die smartphone van nu heeft nog steeds heel veel trekjes van een klassiek telefoontoestel. Waarom eigenlijk, dat hoeft toch niet? Als straks al die communicatie- en rekenkracht in een klein korreltje is op te slaan, dan hebben we toch zo'n groot apparaat niet meer nodig? Of andersom: als we toch hechten aan zo'n groot apparaat, wat willen we dat het straks allemaal nog méér kan dan nu? Een echte innovatie als Google Glass begint nu op de markt te komen, maar zo'n bril ziet er toch echt nog uit als een prototype, laten we eerlijk zijn, daarmee wil je nog niet gezien worden. We lezen al over insecten die worden uitgerust met een zendertje, als een soort levende minidrones. Ik denk dat we ook voor het welzijn van de mens het nodige kunnen betekenen. Implanteerbare elektronica komt dichter-

bij als het nog kleiner kan en we biocompatibele materialen kunnen gebruiken. Ook in de NanoPil die bij MESA+ wordt ontwikkeld, komt waarschijnlijk een zendertje dat de meetresultaten doorgeeft aan de arts. Sensoren die we op onze huid dragen en waarvan wij niets merken, ze zijn ook al in ontwikkeling.

Maar laten we niet vergeten, er is ook nog veel winst te boeken in het terugdringen van het energieverbruik. Onze mondiale internetverslaving zorgt voor een gigantische energierekening. Door oplossingen te bedenken die én de accu sparen én voor betere prestaties zorgen, dragen wij daar op onze manier aan bij.

Tot slot, een van mijn goede leermeesters, wijlen prof. Jan Middelhoek, schreef in een column in het blad Elektronica, eind jaren 80, eens dat de Wet van Moore nog tien jaar te gaan had. Dan zouden de afmetingen in de buurt van de golflengte van het licht komen en hield alles op. En meer was ook niet nodig, zo vervolgde hij, want wie had er nu chips nodig met meer dan 1 MB opslagcapaciteit? Middelhoek, en velen met hem, zijn steeds weer ingehaald dankzij creatief talent dat de grenzen tóch weer verlegde. Zoals ook ikzelf zal worden ingehaald, over een tijdje.

Ik heb gezegd.

Universiteit Twente
Drienerloaan 5
7522 NB Enschede

Postbus 217
7500 AE Enschede

info@utwente.nl

