



"Microwaves. When waves matter."

door Prof.dr.ir. F.E. van Vliet

“Microwaves. When waves matter.”

– Over kleine zaken met grote gevolgen –

Rede uitgesproken bij
het aanvaarden van het ambt
van hoogleraar

Microwave integration

aan de Faculteit Elektrotechniek,
Wiskunde en Informatica
van de Universiteit Twente
op donderdag 29 januari 2009
door

Prof.dr.ir. F.E. van Vliet

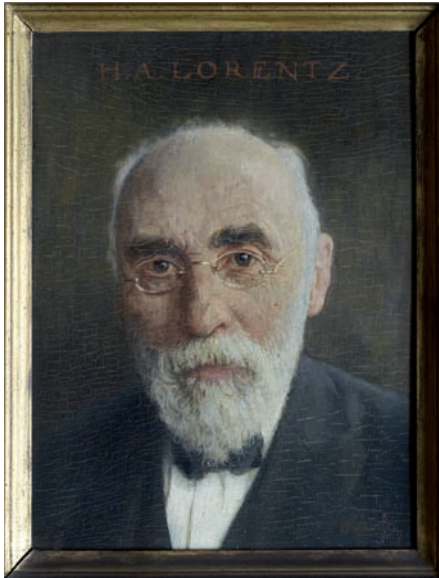
Aanhef

Mijnheer de rector magnificus, bestuur en vertegenwoordigers van de Stichting LIFT, collega's, vakgenoten, familie, vrienden, dames en heren,

Over microgolven

In de winter van 1928 trok een opvallende rouwstoet door Haarlem. Het was tien februari en tienduizenden waren uitgelopen. Vijftien rijtuigen getrokken door zwarte paarden vormden de rouwstoet voor een van de grootste wetenschappers die Nederland gekend heeft. Het Koninklijk Huis was present, alle wagens in de verre omtrek waren geboekt. Het telegraafverkeer werd stilgelegd en kerken van zowel protestantse als van katholieke signatuur luidden de klokken. De openbare verlichting was stemmig uitgevoerd en vlaggen hingen halfstok van openbare gebouwen. Extra treinen reden tussen Leiden en Haarlem om de belangstellenden te vervoeren. Op de begraafplaats aan het Kleverpark te Haarlem werd een grafrede uitgesproken namens Nederland, Engeland, Frankrijk en Duitsland in de persoon van respectievelijk Ehrenfest, Rutherford, Langevin en Einstein. Vijfentwintig jaar later werd de dood van deze Nobelprijswinnaar nog steeds in brede kring herdacht: met hem stierf ook een stuk van de statuur van de wetenschap.

Lorentz, want om hem ging het, Hendrik Antoon Lorentz stelde de lichtsnelheid als de hoogst mogelijke snelheid en bedacht de contractie van de ruimte. Lorentz bedacht het elektron en formuleerde het reciprociteitstheorema voor elektromagnetische velden. Lorentz diende de Nederlandse overheid van advies en rekende aan de Afsluitdijk. Lorentz verklaarde het Zeemaneffect, vernoemd naar een van zijn leerlingen, en kreeg daar in 1902 de Nobelprijs voor, de tweede ooit uitgereikt in de natuurkunde. Einstein schreef aan het eind van zijn leven dat Lorentz meer voor hem betekend had dan enig ander. Dat reciprociteitstheorema alleen al: Het is zo krachtig dat je er de wetten van Maxwell (die het elektromagnetisch veld beschrijven) uit af kunt leiden. Lorentz deed het andersom, en leidde het reciprociteitstheorema af uit de vergelijkingen van Maxwell. Dat is reciprociteit ten top. Lorentz was voorzitter van de afdeling Natuurkunde van de Koninklijke Nederlandse Academie der Wetenschappen. En Lorentz was gedurende lange tijd conservator van het Teylers Museum in Haarlem, het oudste en één van de mooiste musea die Nederland rijk is.



Figuur 1: H.A. Lorentz

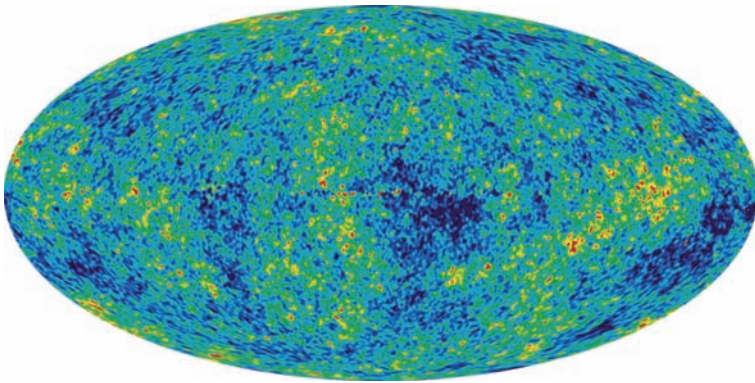
Microwaves. When waves matter. Een Engelse titel voor een Nederlandse oratie. Diep van binnen vind ik dat dat niet hoort, maar de letterlijke vertaling dekt de lading niet. Die vertaling luidt: “Microgolven. Wanneer golven ertoe doen”, maar hierin mist het dualisme van deeltje en golf. En als de microgolfteknik ergens over gaat, dan is dat over het meenemen van het golfkarakter in het ontwerpen van hardware, van materie. De gelijktijdige betekenis van het Engelse “matter” als *materie* en als *ertoe doen* brengt een elegantie met zich mee die ik zwaarder heb laten wegen dan die van de Nederlandse taalpurist. Ik heb

er wel een Nederlandse ondertitel aan gegeven: “Over kleine zaken met grote gevolgen”. Na het voorgaande begrijpt u, dat u dit met evenveel recht kunt verstaan als “Over kleine golven met grote gevolgen”. Over microgolven met grote gevolgen.

Microgolfteknik heeft een hoge wetenschappelijke relevantie. Het helpt het wetenschappelijk bouwwerk op allerlei gebieden vooruit. Ik wil dat illustreren aan de hand van drie voorbeelden, op heel verschillende schaalgroottes.

Kosmologie

Het eerste voorbeeld dat ik aan wil halen speelt op interstellaire schaal. De theorie van het ontstaan van het universum steunt in hoge mate op drie waarnemingen: de beweging van andere sterrenstelsels, de kosmische achtergrondstraling en de chemische samenstelling van kosmisch gas. De kosmische achtergrondstraling is aanwezig op ieder punt van de hemel,



Figuur 2: Kosmische achtergrondstraling, bepaald door de WMAP missie

en wordt niet veroorzaakt door sterren. Ze werd voor het eerst aangetoond in 1964 door Penzias en Wilson. Dezen kregen er de Nobelprijs voor omdat het een overtuigend indirect bewijs voor de oerknal, de Big Bang, vormt. Op de ruimtevaartmissies COBE (1989) en WMAP (2001) is deze achtergrondstraling met verbluffende precisie in kaart gebracht, en de Planck missie (2009) zal deze kennis nog verder uitbreiden. De achtergrondstraling is maar zwak, in termen van het black-body stralingsmodel bedraagt ze ongeveer 2,7 Kelvin. De straling heeft hierdoor een maximum in het microgolfdomein. Microgolfteknik heeft zo direct aan het begrip van het ontstaan van het universum bijgedragen. *Microwaves. When waves matter.* Ik wil nog opmerken dat deze achtergrondstraling slechts tijdelijk op aarde meetbaar is. Over 100 miljard jaar, als het maximum van de kosmische achtergrondstraling in de Megaherzen valt, is de toch al zwakke straling nog een miljard keer zwakker, en waarschijnlijk niet meer waarneembaar. Nog later, over ongeveer 350 miljard jaar, als het maximum op minder dan een kilohertz ligt, is ze voorgoed aan onze waar-neming onttrokken, omdat het ijle interstellaire gas voor deze golven ondoordringbaar is.

Platentektoniek

Het tweede voorbeeld wil ik op wat aardse schaal houden, en gaat over de platentektoniek. Toen Alfred Wegener in 1915 op basis van gelijkende fossielen op verschillende continenten opperde dat er sprake moest zijn

6
 "Microwaves. When waves matter."
 Over kleine zaken met grote gevolgen –

geweest van continentale drift, was hoon zijn deel. Zijn theorieën vonden geen aanhang totdat in de jaren vijftig en zestig uit allerlei hoek ondersteunend bewijs opkwam. Met het in de jaren zeventig in gebruik nemen van het Navigation System for Timing and Ranging (NAVSTAR), nu beter bekend als het Global Positioning System (GPS) ontstond de mogelijkheid om de drift van de continenten ook direct te bepalen. Er zijn nu meer dan 5000 geodetische grondstations die snelheid en richting van de continenten onomstotelijk vast hebben gesteld. Het gebruik van microgolven is hierin cruciaal; GPS gebruikt frequenties tussen de 1 en de 2 GHz. Op lagere frequenties is door afscherming van de ionosfeer en de grootte van multipadeffecten veel minder nauwkeurige tijdsbepaling en daarmee positiebepaling mogelijk. Op hogere frequenties is sprake van een hogere paddemping en zijn volgende richtantennes nodig om nog een nauwkeurige plaatsbepaling mogelijk te maken. Het zou daardoor niet mogelijk zijn met een enkele antenne de vier benodigde satellieten te volgen. Het is niet voor niets dat GPS en haar Europese tegenhanger Galileo op microgolffrequenties werken.

Deeltjesfysica

Het derde voorbeeld dat ik aan wil halen gaat over het onderzoeken van het karakter van de kleinste deeltjes die we kennen. Om dat karakter voor steeds kleinere deeltjes te bepalen, is het nodig zwaardere deeltjes met steeds hogere energieën te laten botsen, en de daarbij vrijkomende deeltjes te analyseren. Door deze experimenten is het standaard deeltjesmodel ontstaan, wat nu al ongeveer dertig jaar dienst doet. Het verder verfijnen van dit model is het doel van de Large Hadron Collider, onlangs in gebruik genomen door het CERN in Zwitserland. Om de deeltjes van steeds meer energie te voorzien worden over het algemeen lineaire versnellers gebruikt. Wanneer de deeltjes de snelheid van het licht benaderen moeten de platen steeds sneller wisselen van aantrekkende naar afstotende werking. Trilholtes met microgolfbronnen die voor het wisselende veld zorgen zijn hier onveranderlijk de oplossing. Golven voor het onderzoek naar deeltjes. “When waves matter” kun je hier wel heel letterlijk opvatten. Dezelfde lineaire versnellers met microgolfbronnen vinden ook hun plaats in de gezondheidszorg bij de bestraling van tumoren. De microgolfbronnen die voor de versnelling, en dus de hoge energie, zorgen hebben exotische namen als cyclotrons en synchrotrons. Mocht u opmerken dat die woorden wat weg hebben van een magnetron: dat klopt. Het zijn verwante apparaten. Deze woordspeling had

ik overigens in het Engels niet kunnen maken, omdat een magnetron in het Engels een microgolfoven heet.

Tot zover deze voorbeelden. Ik zou ze samen willen vatten met '**Microwaves matter to science**'; Microgolftechniek is vanuit wetenschappelijk oogpunt waardevol.

De leerstoel

Het is goed eerst een paar woorden te wijden aan het onderwerp van de leerstoel, de microgolftechniek. Zoals het onderwerp aangeeft, gaat het om systemen met een frequentie van grofweg hoger dan 1 GHz, met inbegrip van de zogeheten sub-mmwaves. Zoals een zwemmer zich, in tegenstelling tot een olietanker of een garnaal, rekenschap moet geven van de lengte van de golven waarin hij zwemt om vooruit te komen, moet een microgolfontwerper rekening houden met de fysieke dimensies van zijn ontwerp, in termen van golflengte, om optimale functionaliteit te bereiken.

Dat onderwerp is preciezer omschreven als 'microwave integration', microgolfintegratie. Die integratie is in lijn met ontwikkelingen in de consumentensector, waarbij alleen integratie tot kleine, draagbare applicaties zoals mobiele telefoons en navigatiesystemen kon leiden. Microgolftechnieken zijn uiteraard veel breder te gebruiken, maar omdat door integratie het onderwerp van onderzoek kleiner wordt, is de beheersbaarheid groter. Integratie staat hier voor het accent op moderne microgolftechniek, niet op het veronachtzamen van de niet-geïntegreerde onderdelen.

In de uitwerking van de onderwerpomschrijving wordt verder een accent gelegd op technologie voor phased-array antennas. Dat zijn samengestelde antennestelsels waarbij de antennebundel niet door mechanische draaiing maar door elektrische fase- of tijdverstelling verplaatst wordt. Op phased-arrays zal ik in het tweede deel van deze rede wat uitgebreider ingaan.

Maar die inperking is niet het hele verhaal. De leerstoel gaat ook over de relatie tussen technologie en systeem. Op onverwachte wijze blijken systeemspecificatie en technologische details soms veel dichterbij elkaar te liggen dan een oppervlakkige beschouwing uit zou wijzen. De leerstoel gaat in bredere zin ook over de rol van technologie in innovatie. Deze rol, zowel het

belang alsook de moeilijkheden, wordt door mensen met een achtergrond buiten de techniek over het algemeen verkeerd ingeschat of onvoldoende gewaardeerd. Nog steeds wordt innovatie in toepassingen en in systemen voor een belangrijk deel gedreven door mogelijkheden die ontstaan door technologische vooruitgang. Het inschatten van innovatiepotentieel vereist daarom diepgaande kennis en innovatie is slecht beheersbaar wanneer je referentiekader strikt financieel-economisch is. Ook Nederland kent voorbeelden waarin dit tot desastreuze bedrijfsmatige keuzes heeft geleid.

Tot slot is de leerstoel ook een voorbeeld van het belang van kleine beroepsgroepen voor een grotere samenleving. De relatie van de microgolfontwerper tot de high-end systeemgemeenschap staat model voor de rol van de ingenieur in de samenleving. Beide beroepsgroepen zijn niet zo zichtbaar, maar hebben een grote invloed. De aantallen van beide groepen staan onder druk, en de gevolgen daarvan voor de grotere gemeenschap zullen ingrijpend zijn.

Over Arrays



Figuur 3: G. Marconi

Guglielmo Marconi was een tijdgenoot van Lorentz en was in veel opzichten zijn tegenpool. Marconi was autodidact, niet verbonden aan een universiteit, zeer praktisch en is een leven lang verbonden geweest met het pionieren van het onderzoek naar radio, radiogolven en propagatie. Hij was grondlegger van het concern Marconi, waarvan vele delen nog steeds voortleven onder andere namen, maar ook degene die met een coherer ontvangers bouwde en de eerste die trans-Atlantische radioverbindingen op wist te zetten met grootse zend-ontvang-inrichtingen. De vonkbrug in Cornwall waarmee de eerste trans-Atlantische radiosignalen wer-

den overgebracht was zo krachtig, dat hij met het blote oor kilometers ver te horen was. Uit die tijd stamt de bijnaam vonkenboeren en het Duitse fun-



Figuur 4: Vuurtoren in Hoek van Holland

ken, voor het experimenteren met radio. Door inspanningen van Marconi en vele anderen is uiteindelijk de volledige radio- en televisie industrie mogelijk geworden. Bij zijn begrafenis hielden, zeer passend, alle radiostations twee minuten radiostilte. Zijn invloed wordt treffend geïllustreerd met bijgaande vuurtoren: antennes steken boven de lichten uit.

Samengevat was de stand der techniek aan het einde van de dertiger jaren van de vorige eeuw zo ver gevorderd dat heel grote antennecomplexen in gebruik waren voor omroep- en andere doeleinden, op frequenties die grosso modo lager dan 1 GHz waren. Van array antennes was in die jaren nog geen sprake. Het gebruik van microgolven werd in die jaren beperkt door de beschikbaarheid van krachtige zenders. Daar kwam verandering in door de uitvinding van de klystron in 1939 en de trilholt magnetron in 1940, dezelfde die nu uw eten opwarmt.



Figuur 5: C.A. Muller Radio Astronomie Station (CAMRAS), onder minister Plasterk aangewezen als Technisch Topmonument uit de Wederopbouwperiode

Ferriet

Tussen 1935 en 1950 nam de microgolftchniek een grote vlucht, ze staan bekend als de 'golden years'. Het was ook in die tijd, zo rond 1942, dat het woord microgolven in zwang kwam. Hiervoor werd wel vaak over heel hoge frequenties gesproken, maar was er vrijwel niemand die in de gaten had hoe hoog die frequenties wel niet konden zijn. De Smith-kaart, nu nog steeds symbool voor het vakgebied, wordt in januari 1939 beschreven in 'Electronics' door Philip H. Smith van Bell Telephone Laboratories als Transmission Line Calculator. Het waren de jaren waarin golfpijp constructies de boventoon voerden, en waarin de Tweede Wereldoorlog door de ontwikkeling van radar voor een grote versnelling van de ontwikkelingen heeft gezorgd. De constructies waren in die tijd nogal grofstoffelijk van aard; microgolfingenieurs hebben er de geuzennaam 'Loodgieters' aan overgehouden.

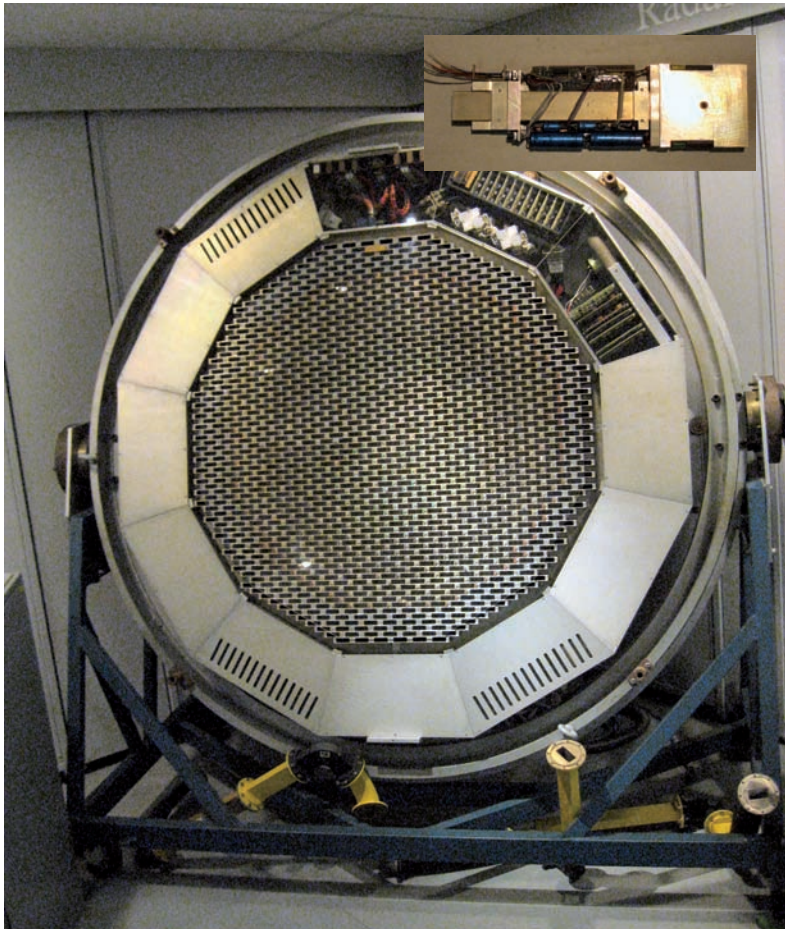
De grofstoffelijke golfpijpen werden gecomplementeerd met allerlei vlakke golfgeleiders, zoals microstrip en striplijn, en door vaste-stof componenten, met name in ferriet- en piëzo-elektrische materialen. Het onderzoek naar de materiaaleigenschappen van ferrieten concentreerde zich op microgolffrequenties omdat bij lagere frequenties de verliezen in het ferriet te hoog zijn, en er bij hogere frequenties een onpraktisch sterk magneetveld nodig was. Ferrieten zijn echte microgolfmaterialen.

Bij dat onderzoek naar ferrieten zijn onverwacht veel Nederlanders betrokken, vooral vanuit het in 1914 opgerichte Philips Natuurkundig Laboratorium. De groep van Snoek was de eerste ter wereld die microgolf ferrietmaterialen synthetiseerde en bestudeerde. In 1948 formuleerde Polder er de tensorbeschrijving van ferromagnetische materialen op microgolffrequenties. Die laat zich het best begrijpen door de analogie met de theorie van Faraday over de rotatie van polarisatie in een magnetisch plasma. Ook in 1948 postuleerde Tellegen er de gyrator, een niet-reciproke tweepoort.

Het onderzoek naar ferrietmaterialen boekte in de vijftiger jaren spectaculaire resultaten, en leidde rond 1960 tot allerlei fundamentele en praktische inzichten, waaronder verschillende soorten fasedraaiers en circulatoren. In 1952 demonstreerde Hogan bij de Bell Telephone Laboratories een op ferrieten gebaseerde gyrator, in 1954 bewees Carlin dat een aangepaste, passieve, verliesvrije driepoort junctie met een niet-reciprook element zich altijd

gedraagt als een perfecte circulator en in 1957 werden de eerste praktische ferriet fasedraaiers gemaakt door Reggia en Spencer.

In de jaren zestig vatte het idee post dat met deze fasedraaiers de realisatie van phased-arrays mogelijk zou moeten zijn. In zo'n array wordt de antennebundel elektronisch gestuurd, en kan de antenne zelf stil blijven staan. De antennebundel kan daardoor veel sneller verplaatst worden, en de antenne heeft geen bewegende delen meer. Het duurde wel even voor deze tech-



Figuur 6: CAISSA passieve phased-array met ferriet fasedraaiers (inzet)

nologie het tot een complete systeemrealisatie geschopt had. Nederland liep voorop, en hier was in 1979 de eerste volledig operationele passieve phased-array een feit, waarbij passief in deze context betekent dat het uitgezonden vermogen centraal opgewekt wordt.

Microgolf fasedraaiers uitgevoerd in ferriet zijn de doorslaggevende factor geweest voor de haalbaarheid van passieve phased-arrays. De ironie wil dus dat “loodgieters het einde van de mechanische bundelsturing ingeluid hebben”. Zonder loodgieters geen elektronische bundelsturing.

MMIC's

De jaren zestig en zeventig stonden in het teken van de halfgeleidertechnologie, en het gebruik van halfgeleiders op planaire substraten. De eerste microgolf chips, zogeheten MMIC's, werden gedemonstreerd in het begin van de jaren zeventig. Het werd duidelijk dat deze voornamelijk op Gallium Arsenide gebaseerde chips voor een revolutie in de wereld van phased-arrays zouden kunnen zorgen. Daar waren twee hoofdredenen voor.

In de eerste plaats kon door toepassing van MMIC vermogensversterkers de stap gemaakt worden naar actieve phased-arrays. In actieve phased-arrays heeft ieder antenne-element zijn eigen vermogensversterker. De toepassing van een groot aantal solid-state versterkers maakte het gebruik van hoogvermogen buizenversterkers overbodig. Het zenderregime gaat van 'single-point-of-failure' over naar graceful degradation, en er is niet langer hoogspanning nodig.

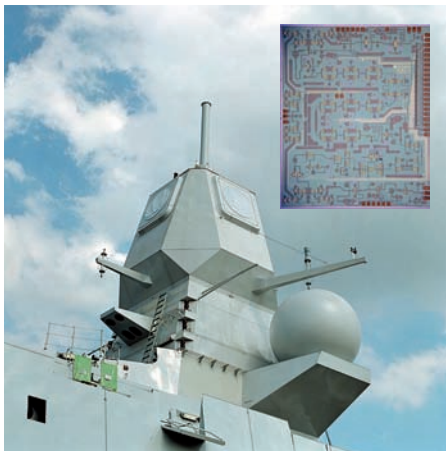
In de tweede plaats kon door de toepassing van een vermogensversterker per antenne-element de fasedraaier als het ware door de versterker heen geschoven worden en hoefde de fasedraaier niet langer tegen hoge vermogens te kunnen. Dat maakte dat MMIC fasedraaiers de ferriet fasedraaiers konden vervangen. De voordelen daarvan waren duidelijk: ze zijn kleiner en goedkoper, hebben geen magneetveld nodig, zijn planair, zijn reciproom, schakelen snel en zijn minder problematisch in productie.

De eerste actieve phased-array in Nederland was rond 1990 een feit. Hierin werd nog per microgolffunctie een apart IC gebruikt. Dat was een reflectie van de stand der techniek, die tot gevolg had dat de onnauwkeurigheden die

door koppeling tussen de MMIC's geïntroduceerd worden alleen opgelost kunnen worden door aanpassingen van het moduleontwerp. Met de door Nederland gepioneerde core chips, waarbij alle microgolffuncties in één MMIC geïntegreerd zijn, heb je meer problemen tijdens het ontwerp van het MMIC, maar minder tijdens het gebruik. En hoe vroeger je in een ontwerp problemen oplost, hoe goedkoper dat is. Core chips vormen tegenwoordig de standaard.

Met de tewaterlating van het eerste luchtverdedigings- en commando-fregat, de Zeven Provinciën, door de Koninklijke Marine in 2000 heeft Nederland een wereldpositie ingenomen op het gebied van actieve phased-array sensorsystemen. Het was een voorrecht om daaraan bij te mogen dragen. Deze voor-sprong wordt met het in ontwikkeling zijnde patrouillevaartuig, het OPV, waarop een geïntegreerde mast staat met alweer de volgende generatie phased-array sensorsystemen, alleen maar groter.

De microgolftechniek is van doorslaggevende betekenis geweest voor de haalbaarheid van actieve phased-arrays. MMIC's zijn high-tech pareltjes, voortgebracht door een vakgebied met een Nederlandse onderzoekstraditie die tot voor de Tweede Wereldoorlog terug gaat. Maar de lijnen lopen veel verder terug, want het waren zeehelden als Michiel de Ruyter en Cornelis Tromp wier namen gegeven zijn aan deze fregatten. Ze hebben in de Gouden Eeuw de basis gelegd voor het trotse en ambitieuze korps dat de ontwikke-



Figuur 7: APAR actieve phased-array met core chip (inzet)

ling van deze sensoren mogelijk maakte, en dat er nu volop de vruchten van plukt.

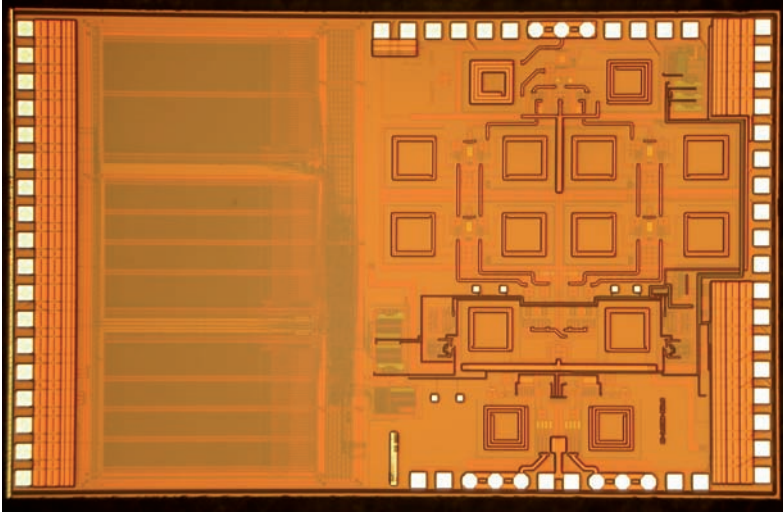
Mixed-signal

Alles wordt digitaal. In een tijd waarin rekenkracht uitgedrukt wordt in biljoenen operaties per seconde (Tera-FLOPS), is een beperking door de beschikbare rekenkracht steeds minder aan de orde. Dat opent mogelijkheden voor grotere hoeveelheden werkelijk gelijktijdig gevormde antennebundels. Als vroeger een heel nieuwe bundelvormer toegevoegd moest worden voor een nieuwe bundel, is nu slechts sprake van het toevoegen van meer rekenkracht.

Maar de beperkingen blijken dan op een andere plaats om de hoek te komen. Het omzetten van zoveel data kost veel energie, en de hoeveelheid communicatie tussen alle elementen stijgt snel bij een toenemend aantal elementen. Alleen door het realiseren van lokale rekenkracht kan dit probleem in de hand gehouden worden. Maar omdat het moet opereren in een phased-array omgeving is de beschikbare ruimte weer beperkt en is integratie noodzakelijk. Tot slot is schaalbaarheid een belangrijk onderwerp omdat het niet aantrekkelijk is voor ieder systeem de bundelvormer opnieuw te moeten ontwikkelen.

Het komt er dus op aan om microgolfttechniek en digitale technologie te combineren, en bij een inventarisatie van de specificaties blijkt de microgolfttechniek de bottleneck te vormen. Het is niet de realisatie van een digitale bundelvormer die de uitdaging vormt, nee, het is het realiseren van een gevoelig analoog front-end met een hoog dynamisch bereik in een geïntegreerde technologie die digitale bundelvorming in ontvangst toestaat waar op dit moment de uitdaging ligt. Doorredenerend kunnen we ook een doorzichtige krijgen naar systemen waarin door integratie van de golfvormgeneratie in de toekomst ook in de zendketen nog meer functionaliteit gedistribueerd kan worden.

Op basis van allang bestaande, soms zelfs wat ouderwetse, digitale technologie vernieuwt de microgolfttechniek opnieuw zichzelf en staat ze aan de basis van de volgende innovatiegolf in de wereld van de phased-arrays, nu met uitdagingen die het analoge en het digitale domein overspannen.



Figuur 8: SiGe phased-array vector modulator met on-chip calibratie geheugen

Analoog digitaal

Op nog langere termijn zullen tenminste twee essentiële problemen voor array onderzoek overblijven. De eerste is het zo efficiënt mogelijk opwekken van microgolffermogen. De tweede is het behalen van een hoogwaardige controle over het ontvangen en uitgezonden signaal.

Het eerste probleem, het gedistribueerd opwekken van microgolffermogen, zal blijven bestaan omdat er zonder hoogfrequent vermogen geen bereik is. Het probleem is taai: het combineert een niet-lineair elektronisch probleem met thermische randvoorwaarden. Waar laagfrequent rendementen van bijna 100 % behaald kunnen worden, is dat bepaald geen sinecure op frequenties waar de maximale power gain intrinsiek beperkt is. Het samenvloeien van digitale concepten met analoge functionaliteit, op systeem- en circuitniveau, zou een uitweg kunnen bieden. Misschien is het verstandiger om te praten over geavanceerde geschakelde architecturen, die direct aan de antenne gekoppeld worden. Hoe dat voor breedbandige antennesystemen moet, als de transistoren een zeer beperkte versterking kennen, is nog een onbeantwoorde vraag.

Het tweede probleem, het behalen van een nauwkeurige controle over het uitgezonden en ontvangen signaal zonder in excessieve kosten te vervallen, zal blijven bestaan omdat de gewenste nauwkeurigheid van het antennesysteem zich naar een hoge nauwkeurigheid op elementniveau vertaalt. De microgolf fasesturing zoals die nu toegepast wordt, kan misschien op termijn in een timingprobleem omgezet worden, maar de te behalen specificaties in het verdeelnetwerk zullen niet wezenlijk verschillen. Op deze manier sluit ook die nauwkeurige controle weer aan bij het digitale ontwerp, en misschien vormen de twee problemen wel twee aanzichten van dezelfde oplossing.

Los hiervan is er dan nog de uitdaging van reconfiguratie. Vanwege de kosten en doorlooptijd van het ontwikkelen van zendontvangers is er een toenemende druk om zendontvangers reconfigureerbaar te maken, zodat verschillende frequentiebanden, modulatievormen en processing op dezelfde hardware uitgevoerd kunnen worden. In het digitale domein worden daar grote vorderingen gemaakt, en spelen op dit moment vragen rondom bijvoorbeeld het beheersbaar houden van softwareontwikkeling. In het analoge domein zijn de problemen veel groter. Reconfiguratie komt daar nog niet veel verder dan het kiezen uit een van de gerealiseerde kanalen. Maar omdat het totale systeem nooit meer kan reconfigureren dan de analoge hardware in het front-end toestaat, ligt hier een grote uitdaging.

Van de systemen zoals Marconi ze aan het begin van de twintigste eeuw bouwde is niet zoveel meer over. De coherer is vervangen door halfgeleider detectoren. De incoherente vonkbruggen zijn vervangen door coherente en uiterst nauwkeurige zenders, met hoge eisen aan het uitgezonden spectrum. De antennes zijn niet langer draden die met een vlieger omhoog gehouden worden, maar tweedimensionale arrays die zeer hoge zijlusoederdrukking kunnen realiseren. De luisteraar krijgt niet langer het luistertoestel aange-reikt met de woorden "Can you hear anything, Mr. Kemp", maar zet zijn set-top box aan om met digitale processoren complex gemoduleerde signalen ver beneden het ruisniveau op te pikken. Tegelijkertijd is er sinds Marconi aan het principe radio eigenlijk niets meer veranderd en verdient het grote bewondering hoe destijds met zulke elementaire middelen zulke grote resultaten zijn bereikt.

Toekomstige proliferatie

Nu we de technologische ontwikkelingen geschetst hebben is het ook goed om wat woorden te wijden aan het gebruik van arrays. Het volume en gewicht van de front-end elektronica van een array zijn de afgelopen twintig jaar sneller gedaald dan gelijke parameters voor mobiele telefoons. Omdat je voor een front-end module ongeveer kunt zeggen dat hij zijn gewicht in goud kost, is het duidelijk dat ook de kosten heel sterk gereduceerd zijn. Door deze kostenreductie, maar ook door de toegenomen mogelijkheden van digitale processing en door de vraag naar verfijndere toepassingen zal de proliferatie van arrays in de samenleving sterk groeien. De toekomst voorstellen is een hachelijke onderneming, maar ik wil toch proberen op basis van huidige trends een aantal toekomstige toepassingsgebieden te benoemen op het gebied van wat kleinere systemen, die naast de voortdurende vraag naar grote high-performance sensortoepassingen op zullen komen.

Een eerste toepassing is in basisstations voor mobiele communicatie. Het energiegebruik van deze basisstations is niet erg efficiënt. Ongeveer een twintigste van de opgenomen energie wordt ook echt uitgezonden, en die energie wordt ook nog eens over een groot gebied uitgesmeerd. Ontwikkelingen van dit moment gaan naar het gebruik van efficiëntere vermogensversterkers, waarmee bijvoorbeeld een factor twee in efficiëntie gewonnen kan worden. Het gebruik van arrays in deze omgeving pakt het probleem meer bij de bron aan. Door het beschikbare vermogen dynamisch op een gebruiker te richten, is een veel kleiner vermogen nodig. De energiebehoefte kan dan met de antenneversterking naar beneden, waarbij voor de antennewinst eerder aan een factor tien dan aan een factor twee gedacht moet worden.

In de queeste naar meer bandbreedte worden de frequenties almaar hoger. De hoogste bandbreedtes worden momenteel voorzien voor de overdracht van ruwe hoge-definitie videosignalen en voor point-to-point verbindingen waarbij in bijvoorbeeld een kiosk een DVD gedownload moet worden in de tijd die het duurt om te PIN-nen of om een kop koffie te halen. Voor zulke toepassingen is zoveel bandbreedte nodig dat draadloos eigenlijk alleen communicatie op 60 GHz een optie vormt. Als je vervolgens de link budget berekeningen maakt, ontikom je niet aan het toepassen van een antenne array. De uitdagingen die zulke hoge frequenties voor consumententoepas-

singen combineren met de complexiteit van een antenne array met calibratie en bundelvorming zullen de komende jaren opgelost gaan worden.

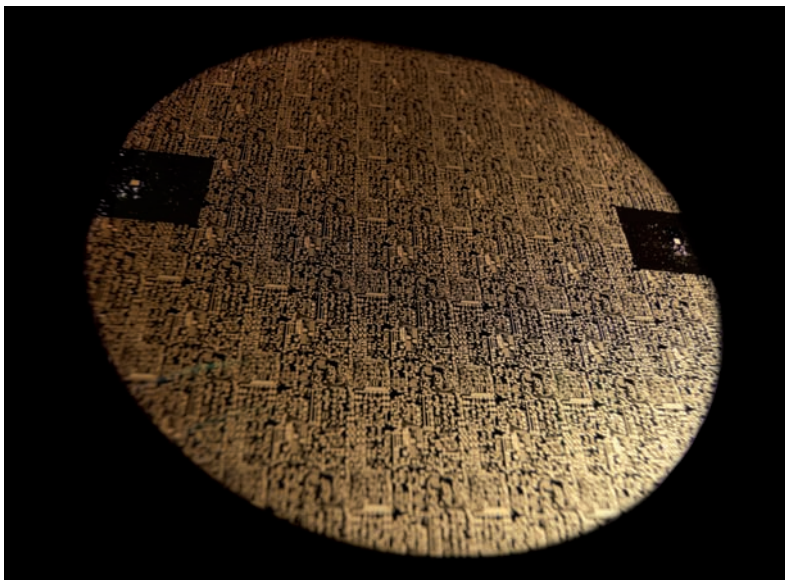
Beeldvormende arrays zullen ook aan betekenis winnen. Op Schiphol en Heathrow staan al poortjes die met behulp van millimetergolven een beeld kunnen maken van passagiers, inclusief eventuele verborgen gedragen wapens. De systemen zijn gebaseerd op mechanisch scannen van een enkele antennebundel. Het versnellen van de meettechniek kan eenvoudig door van een enkele naar een array van sensoren te gaan. Verder kan de resolutie verhoogd worden door gebruik te maken van meerdere frequenties. Al deze mogelijkheden zijn binnenkort werkelijkheid. De mogelijkheden in de medische wereld zijn nog nauwelijks ontgonnen. De verwachting bestaat dat op zeer hoge frequenties, de sub-millimetergolven, details onder bijvoorbeeld de menselijke huid gezien kunnen worden die met andere sensoren verborgen blijven.

Op al deze gebieden is Nederland uitstekend gepositioneerd, zowel door de nationale industrie als door de kwaliteit van het onderzoek. Terwijl we de mogelijkheden voor sensoren ter bescherming van auto's en ten behoeve van maatschappelijke veiligheid nog onbesproken laten, is het toch al duidelijk dat we pas aan het begin staan van de grootschalige toepassing van microgolf arrays. Ik wil dan ook concluderen dat **Microwaves matter to industry**; Microgolftechniek is relevant voor de industrie, en zeker voor de Nederlandse.

Intermezzo

Microgolffchips dus. Na deze verhandeling over de geschiedenis, de trends en de toepassingen wil ik nu vooral voor de leek een impressie geven van de grootteordes die bij microgolffchips een rol spelen. Om te beginnen de maatvoering. Chips worden gemaakt op wafers, platte ronde schijfjes waarvan de grootte varieert van die van een stroopwafel tot een langspeelplaat. Zelfs de grotere chips nemen per stuk niet meer ruimte in dan één twintigste van het topje van je pink. Van een meer gemiddelde maat, een lageruisversterker bijvoorbeeld, passen er ongeveer 25.000 op een wafer met een straal van zeven en een halve centimeter. De kleinste chips zijn zo klein dat je een enkele chip gemakkelijk voor wat stof aan kunt zien.

De dikte van normale microgolffchips is gelijk aan de gemiddelde dikte van de menselijke opperhuid, honderd micrometer, de dunste zijn minder dan half zo dik. Wanneer ze op een wafer zitten, kan die zijn eigen gewicht niet dragen. Als je hem niet ondersteunt, breekt hij bij het oppakken. Een gemiddelde chip weegt minder dan één honderdste gram, een paar milligram. Met het minste of geringste zuchtje wind waait hij dus weg. Als ze in een doosje



Figuur 9: GaAs wafer

aangeleverd worden, zitten ze om die reden meestal vastgeplakt. Natuurlijk mag de adhesie ook weer niet te groot zijn, want anders breken de chips als je ze op probeert te pakken. Om die reden wordt soms UV-gevoelige lijm gebruikt, die onder belichting zijn plakkracht kwijtraakt.

In de minuscule oppervlakte van zo'n wat grotere chip moet in voorkomende gevallen evenveel warmte afgevoerd worden als een volwassen mens tijdens het sporten produceert. Maar een chip kan niet transpireren, dus de koelproblemen zijn aanzienlijk. Het wordt nog erger wanneer je je realiseert dat dit vermogen opgewekt wordt in ongeveer een duizendste van de oppervlakte, en ook nog aan de bovenkant, waar je niet met het koellichaam bij kunt komen. Als de chip gesoldeerd is, controleer je met een röntgenapparaat of er geen minuscule luchtbelletjes ontstaan zijn in het soldeer. Die kun je zelf niet zien omdat ze onder de chip zitten. Door die luchtbelletjes heeft de warmte een langere weg naar het koellichaam, en zou de chip dus kapot gaan zodra je hem aanzet.

De verbindingen op een chip worden gemaakt met gouden spoortjes van ongeveer een micrometer dik. Veel dikker heeft ook niet zoveel zin. Door stroomverdringing loopt het grootste deel van de stroom in een laagje ter dikte van de skindiepte, en die is bij hoogwaardig goud op 10 GHz gelijk aan 0,8 micrometer. In een microstrip transmissielijn zoals je die bij microgolf-

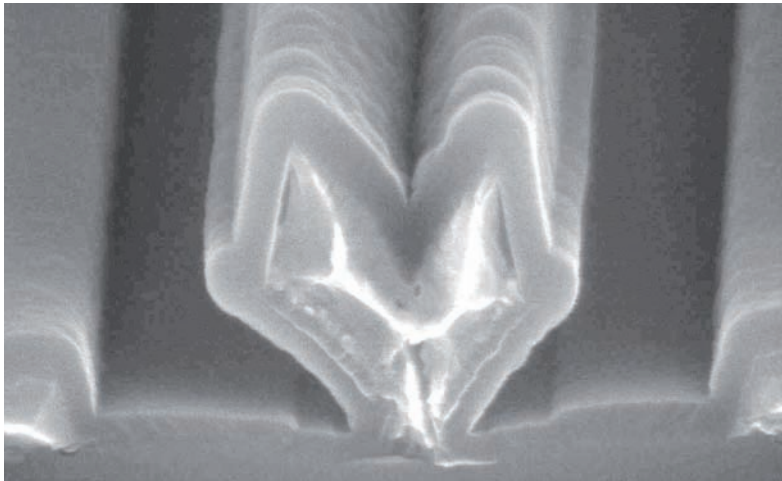


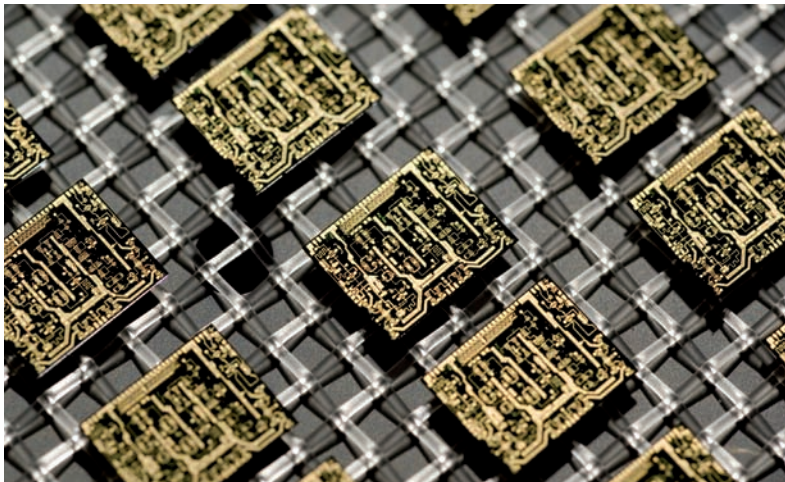
Foto 10: SEM foto van gate structuur

chips vaak tegenkomt loopt de stroom dan ook nog alleen maar aan de zij-kanten.

De aansluitflapjes, bondpads in jargon, zijn even groot als de diameter van een menselijk haar: als er dus een haar over je flapjes valt zijn ze onder de microscoop allemaal weg. En dat zijn de grootste structuren op de chip, de kleinste structuren zijn zo klein dat je ze ook door een microscoop heen nooit kunt zien. Ze zijn vele malen kleiner dan de golflengte van het licht. Het licht spoelt er dus omheen, en je hebt een elektronenmicroscoop nodig om ze te kunnen afbeelden.

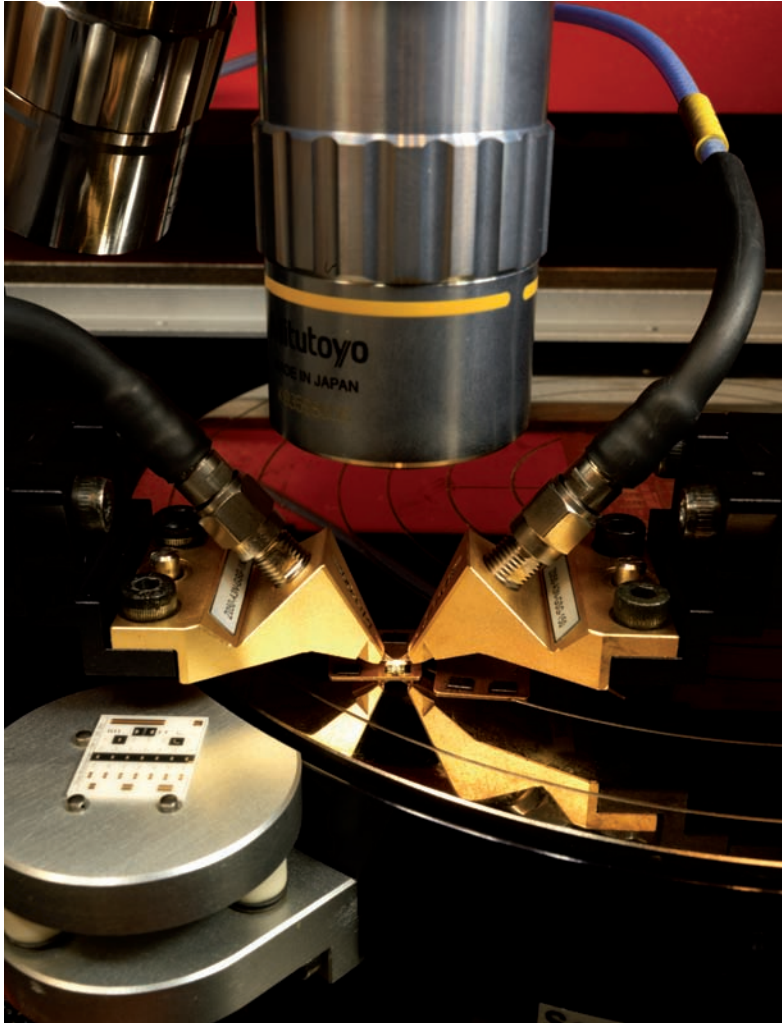
In de opbouw van de snelste chips met de hoogste stroomdichtheid worden laagjes gebruikt van 10-100 atomen dik. Als zo'n chip vervolgens tijdens het gebruik stuk gaat, is dat vaak terug te voeren op individuele kristalroosterfouten tijdens het groeien van de lagenstructuur. Populair gezegd: Er zat een atoom verkeerd.

De atomen die verkeerd zitten kunnen via de epitaxiale groei, het gebruik in vermogensversterkers, de opbouw van actieve antennes, het gebruiksprofiel en het onderhoudsmodel leiden tot het vervangen van een actieve antenne door een passieve. De complexiteit zit dan niet alleen in de signalen, maar ook in de hoeveelheid domeinen die overspannen wordt: het fysische, het



Figuur 11: Core chips

elektrotechnische, het operationele en het financiële domein, met een terugkoppeling over al deze domeinen heen. En dat allemaal voor één microgolf-component. In dit vakgebied zijn het soms de kleinste details die het grootste systeem beïnvloeden. Ik kom daar dadelijk in de epilooop op terug.



Figuur 12: MMIC meetopstelling

Over onderwijs, onderzoek en industrie

In de tijd dat de natuurwetenschappen nog tot de faculteit filosofie behoorde, richtte Wilhelm von Humboldt de Universiteit van Berlijn op. Deze Duitse volkenkundige, taalkundige, diplomaat en bestuurder werkte tussen 1808 en 1810 voor het Pruisische ministerie van Wetenschap en Onderwijs, en hervormde in die korte periode de structuur van het hoger onderwijs ingrijpend.



Figuur 13:
W. von Humboldt

De wijzigingen werden tot ver over de Duitse taalgrenzen heen opgevolgd, zodat van een ‘Humboldtiaanse universitaire school’ gesproken kan worden. Ook op de Nederlandse universiteiten heeft dit blijvend invloed gehad.

De twee leidende principes zijn daarbij de academische vrijheid en de eenheid van onderwijs en onderzoek, waarbij de Universiteit van Berlijn gebaseerd werd op het Bildungsideaal: De algemene ontplooiing van alle menselijke vermogens, waaronder dus niet alleen het verwerven van kennis, maar ook het vermogen tot moreel en esthetisch oordelen en tot rechtvaardig handelen.

Onderwijs

Zoals onderwijs en onderzoek onlosmakelijk samen moeten optrekken, zo geldt dat ook voor technologische kennis en systeemkennis. Het zijn twee kanten van dezelfde medaille. Na een korte onderbreking is het afgelopen semester het onderwijs op microgolfg gebied aan de Universiteit Twente weer gestart. Dat onderwijs richt zich op de fundamentele, en probeert studenten ten eerste een goed ontwikkeld gevoel te geven voor wanneer en hoe de elektromagnetische golfvergelijkingen overgaan in de transmissielijngvergelijkingen en later in geconcentreerde elementen en probeert studenten ten tweede de theorie en technieken aan te leren die nodig zijn bij ontwerp en karakterisatie.

Bij een vakgebied waar ontwerp en karakterisatie zo'n dominante rol speelt, mogen practica niet ontbreken. Iedereen die wel eens zelf elektronica heeft ontworpen en gemaakt weet hoeveel inspanning en leermomenten daar in gaan zitten, maar ook hoe sterk de beloningsprikkel is wanneer de inspan-

ningen resulteren in een werkend systeem. Hardware spreekt. Hardware spreekt voor zichzelf. Hardware kan een vonk over laten springen. Ik ben bang dat ik de kracht van deze prikkel aan wie nog nooit een technisch ontwerp en realisatie ter hand genomen heeft niet overgebracht krijg, en vind daarmee dat ik schatplichtig ben om ook middels practica de studenten zoveel als ik kan bij te brengen.

Als microgolftchniek de ene kant van de medaille is, dan vormen antennesystemen de andere kant. Het koppelen van systeemkennis aan technologische kennis is van groot belang in de beroepspraktijk. Als het onderwijs op microgolfg gebied goed loopt, moet het inrichten van onderwijs over antennesystemen dan ook de volgende prioriteit zijn. In een wereld waarin zoveel zaken draadloos communiceren, moet een elektrotechnisch ingenieur ook in Twente toch de mogelijkheid gehad hebben zich in zijn studie met antennes bezig te houden. Ik verwacht hiervoor binnen de faculteit, maar ook bij de regionale industrie, steun te kunnen vinden.

Onderwijs en onderzoek

Terug aan de universiteit is het een genoegen weer zoveel met studenten te maken te hebben. De studentenpopulatie is veel kleiner dan in mijn eigen studietijd, maar het is een voorrecht je hiertussen te bewegen. De slimsten doen me steeds weer versteld staan. De Nederlandse technische universiteiten staan in de traditie van Humboldt. Naar het Duitse model wordt onderzoek en onderwijs gekoppeld en staat een brede maatschappelijke oriëntatie hoog op de agenda.

Met het Verdrag van Bologna en de harmonisering van de internationale wetenschappelijke opleidingen is dit streven naar onderscheiding, de koppeling van onderzoek en onderwijs en de brede oriëntatie bezig verloren te gaan. De Humboldtiaanse academische gedachte is daardoor nog in hoofdzaak in de individuen verankert, en steeds minder in het academische systeem. De zorg bestaat dat harmonisatie leidt tot eenheidsworst, alle goede bedoelingen ten spijt.

Extra zorgwekkend voor de technische universiteiten is dat de kwaliteit door de bestuurslagen gemeten wordt in universitaire ranglijstjes, in een poging om wederom volgens Bologna de internationale competitiviteit te garande-

ren. Nobelprijzen, Science and Nature tellen flink aan, de relevantie voor de nationale industrie of het innoverend vermogen doen het veel minder goed.



Figuur 14: Von Humboldt voor de naar hem vernoemde universiteit in Berlijn

Het resultaat is een beweging van afnemende overheidsfondsen die richting minder toegepast onderzoek gestuurd wordt. Met een door Bologna schoolser wordend onderwijssysteem is dan de ont koppeling tussen onderzoek en onderwijs feitelijk gerealiseerd, en Von Humboldt ten grave gedragen.

De effecten zullen op termijn onherroepelijk zijn, en vrij naar Hosea 8, vers 7, zou ik willen zeggen: “Wie cijfers zaait, zal boekhouders oogsten,” of, met de kredietcrisis in gedachten: “Wie bonussen zaait, zal geldwolven oogsten.”

De verdergaande internationalisatie biedt ook kansen, in het bijzonder voor uitmuntend onderwijs. Wanneer meer studenten internationaal bewegen

om ook stukken van hun opleiding in het buitenland te volgen, is er de kans om gespecialiseerder onderwijs aan te bieden op gebieden waar de universiteit een toppositie inneemt. De financieringsmechanismen bestaan hiervoor nog onvoldoende, maar ik ben er van overtuigd dat er behoefte bestaat aan ‘doctoral schools’, die op individuele onderwerpen aan de allerhoogste standaarden voldoen. Met een coherent en zeer hoogwaardig programma, met een in de tijd geconcentreerd en educatief doordachte opzet en met de beste docenten die Europa te bieden heeft kunnen we echt iets aan het universitaire onderwijs toevoegen. De meerwaarde voor de opleiding van jonge onderzoekers is evident. Met meer soortgenoten is het sneller rendabel om toegesneden onderwijs voor onderzoekers op te zetten. De eerste stappen op weg naar een ‘Doctoral School of Microwaves’ zijn in het kader van de

European Radio and Microwave Interest Group (EuRaMIG) inmiddels gezet. Zij kan de Universiteit Twente op een mooie manier profileren. U gaat hier meer van horen, daar ben ik van overtuigd.

Onderzoek

Over de richting van het onderzoek heb ik in het begin van deze rede, in het perspectief van de geschiedenis van phased-arrays, reeds gesproken. In hoofdlijnen gaat het erom de microgolfelektronica kleiner, goedkoper, flexibeler en robuuster te krijgen.

Bij het opbouwen van de onderzoeksportefeuille van een nieuwe leerstoel speelt altijd de afweging tussen de breedte en de diepte van het onderzoek. Beide aspecten zijn onmisbaar. Verdieping is noodzakelijk om de onderzoekspositie te rechtvaardigen in een internationaal krachtenveld, verbreding is noodzakelijk om kruisbestuiving en vernieuwing optimaal tot haar recht te laten komen. Diepte zonder breedte vormt een risico, maar breedte zonder diepte is niet levensvatbaar. Daarom heb ik er voor gekozen om eerst het onderzoek naar technologie voor arrays vorm te geven en pas bij voldoende onderzoeksmassa de breedte te ontwikkelen.

Hoewel de tendens in heel veel richtingen van de elektronica naar CMOS met steeds kleinere structuren gaat, is dat niet noodzakelijk het geval voor de analoge en hoogfrequente elektronica. Het schalen naar steeds kleinere featuregrootte leidt tot een sterke reductie van de kosten in de digitale delen van het ontwerp. Voor de analoge elektronica, of misschien moet ik zeggen voor de restjes analoge elektronica, is dat niet altijd het geval. Lageruisversterkers schalen bijna niet en wanneer het volume ook nog onder de miljoenen per jaar blijft valt de winst tegen, zeker als ook de reductie in performance en de kosten van het omzetten naar een nog nieuwere technologie in acht wordt genomen. Voorlopig zal in de microgolfwereld nog een grote diversiteit aan technologieën overleven.

Voor arrays geldt dat alleen door een verdere distributie van functionaliteit een volgende generatie actieve arrays kan ontstaan. De distributie betreft dan onder andere de selectiviteit, de bescherming, de vermogensopwekking en de processing. De uitdagingen strekken zich over vele domeinen uit. Omdat onderzoek en ontwikkeling een kostbare aangelegenheid is, en de eisen sneller veranderen dan in het verleden, is reconfiguratie een belangrijk

onderwerp. Hoe kunnen we de microgolfoplossingen zo ontwikkelen dat ze mee kunnen bewegen met toekomstige eisen?

Naar de jonge onderzoekers geldt een vergelijkbare uitdaging. Het onderzoek is verregaand gespecialiseerd. Na een module- en projectgeorganiseerde opleiding is de uitdaging om onderzoekers op te leveren die methodologisch gevormd zijn, opdat ze na hun promotie andere problemen soepel op kunnen pikken. Het kader van de toekomst ontstaat niet door een opdracht uit te voeren, maar misschien wel door te prikkelen en uit te dagen; door voor een brede persoonlijke vorming te zorgen en door een kritische en zelfstandige houding aan te leren.

Onderzoek en industrie

Het onderzoek naar hoogwaardige systemen, high-end equipment, vindt voor een belangrijk deel in de industrie zelf plaats. Dat heeft te maken met de complexiteit van het probleem, met de omvang van de investeringen en met de bedrijfseconomische belangen. Het geldt voor sectoren als de halfgeleiderwereld, voor satellietbouwers, voor fabrikanten van wafersteppers en voor conglomeraten die sensoren en platformen voor defensietoepassingen bouwen. Maar ook voor deze sectoren is universitair onderzoek nodig om het industriële onderzoek te complementeren.

Vanwege de complexiteit en de belangen is dan de 'bonding' tussen onderzoek en industrie essentieel. De belangrijkste elementen van deze bonding zijn het langdurig aangaan van een onderzoeksrelatie tussen industrie en kennisinstelling en het beperken van de spelers tot een klein aantal partners, bij voorkeur een eindgebruiker en een onderzoekspartner die samen de keten van onderzoek tot product af kunnen dekken, waarmee automatisch in vraagsturing is voorzien. Aan de Universiteit Twente beginnen de contouren van een kenniscentrum te ontstaan, met als werktitel het centrum voor array technologie, geheel in lijn met de hiervoor genoemde verdieping. De tijd zal leren hoe vruchtbaar de bodem voor dit initiatief is.

Door de schaarste aan onderzoeksmiddelen en de noodzaak tot het handhaven van kwaliteit wordt onderzoek in toenemende mate geconcentreerd en geïnternationaliseerd. Er bestaan letterlijk teams van specialisten die de wereld afgrazen op zoek naar de beste technologieën. Alleen het beste is goed

genoeg. Het opbouwen van nieuwe expertisegebieden is steeds lastiger geworden door de hoge instapkosten; het gevaar voor het afbreken van expertisegebieden zal blijven bestaan. Het ineenslaan van de handen om ervoor te zorgen dat deze pijler overeind blijft staan en van verdere wapening voorzien wordt is nu aan de orde. Ik zal daar mijn steentje aan bijdragen.

Epiloog: Over kleine zaken met grote gevolgen.

Kleine zaken met grote gevolgen. Aan de Nederlandse universiteiten wordt het kader van de samenleving voor de komende generatie opgeleid. Het gedrag van de leiding zal, in verzwakte of juist in versterkte vorm, navolging vinden in de opgeleide generatie. Naast het overbrengen van de vakinhoudelijke kennis moet de universiteit daarom nadrukkelijk de academische normen en waarden vóórleven.

De professionele en persoonlijke ontwikkeling moet ons daarbij aan het hart gaan, en ingevuld worden, soms door verantwoordelijkheden te schenken die boven het verwachtingspatroon uitstijgen, en soms door bescherming te bieden. Als wij die ontwikkeling niet ter harte nemen, wie dan wel? Met het aanvaarden van het ambt van hoogleraar neem ik ook dit aspect aan. Ik daag u allen met mij uit die rol zo goed mogelijk te vervullen. En ik hoop zelf ook op die houding te mogen rekenen.

Kleine zaken met grote gevolgen. In een samenleving waarin zoveel vernieuwing plaatsvindt, ben ik er van overtuigd dat we in een tijdgewricht zijn aangekomen waarin de vernieuwing plaatsvindt waar drie vakgebieden samenkomen. Voor front-ends is de grootste ruimte nog daar waar mechanica, elektronica en elektromagnetisme gelijk optrekken.

De Nederlandse marine heeft een vooraanstaande vloot. Dat op die vloot zulke hoogwaardige sensoren staan is onder meer te danken aan microgolf-onderzoek, dat ongeveer tien tot vijftien jaar voor deze systemen uitloopt, en aan de gouden driehoek van onderzoek, industrie en eindgebruiker. Alleen in Nederland lukt het vervolgens om met rood-wit-blaauwe chips deze ontwikkeltrajecten in minder dan vijf jaar af te ronden. Nederland is groot genoeg om wat voor te stellen en klein genoeg om nog snel en efficiënt te zijn.

Kleine zaken met grote gevolgen. Dat is zeker het geval voor de microgolf-techniek. Anders dan voor veel andere vakgebieden geldt voor de microgolf-techniek namelijk ook nog dat het verkleinen van de zaak de gevolgen vergroot. Door miniaturisatie en integratie wordt de zichtbaarheid van de microgolftchniek kleiner, maar haar impact groter.

Een voorbeeld hiervan wordt gevormd door persoonlijke communicatiesystemen zoals de mobiele telefoon. In de ontwikkeling van autotelefoons die met

een accu ook enige tijd meegetild konden worden zijn ze nu zo handzaam dat er meer dan een miljard exemplaren per jaar van worden verkocht, en ze onder de jeugd als een eerste levensbehoefte worden beschouwd. Liever een boterham minder dan een dag zonder mobieltje. De effectiefste straf van leraren op de middelbare school bestaat uit het innemen van de mobiele telefoon.

Verder is internet thuis en in ieder hotel vaak al draadloos aanwezig. Mocht u in een hotel de toegang nog met een toegangscode op een kaartje moeten kopen dan zou ik dat kaartje bewaren, zodat u over tien jaar nog weet hoe dat vroeger ging.

Een tweede voorbeeld zijn navigatiesystemen. Nu die van tilbare en energie verslindende apparatuur gereduceerd zijn tot een chipje, zitten ze bij verschillende automodellen al standaard ingebouwd. Ik voorspel dat van de volgende generatie autorijders een belangrijk deel zich zonder routesysteem geen enkele raad meer weet buiten zijn eigen stad. Microgolfsysteempjes die botsingen voorkomen worden de volgende standaard. De eerste botsingen bij het inparkeren omdat er tijdelijk in een auto zonder naderingspiep gereden werd zijn al genoteerd.

Uit deze voorbeelden is duidelijk dat de techniek hier maar een schakeltje in is. Van doorslaggevende betekenis zijn ook de psychologie van de mens, de manier waarop we met elkaar omgaan, het prijsniveau van de hardware, de soort van diensten die ontwikkeld worden, de techniek is hier maar een kleine zaak. Maar zonder microgolven had de samenleving er anders uitgezien. **Microwaves matter to society.** Met enig gevoel voor beroepseer merk ik op dat microgolven grotere gevolgen hebben dan lange golven.

Het is een voorrecht om me al zo lang met die microgolftechniek bezig te hebben mogen houden; ik doe dat met veel plezier. Het is een vak met relevantie naar de wetenschap, naar de industrie en naar de samenleving. Het is complex, met dus als aantrekkelijke kant dat je niet snel uitgeleerd bent en dat sommigen er beter in zijn dan anderen. Het heeft theoretische diepgang en vele praktische kanten. Het herbergt een enorm innoverend vermogen en kent in Nederland een rijke traditie. Het is een magnifiek vak en ik hoop dat ik er nog lang een rol in mag spelen.

Kleine zaken met grote gevolgen. Kleine gólven met grote gevolgen. Als de wetgever in 1930 anders beschikt had, had TNO niet bestaan. Zonder een hechte gemeenschap van zendamateurs had ik het radiovirus nooit gekregen. Als TNO geen jonge onderzoekers begeleid had, zou ik hier nu niet gestaan hebben. Dat zijn zaken die slecht te veralgemeniseren zijn, maar voor mij wel cruciaal waren. Het vormt een brug naar het laatste deel van deze rede: Het dankwoord.

Dankwoord

Er is slechts gelegenheid om enkelen te bedanken, waar ik velen erkentelijk ben. Zoals mijn ouders, voor een gelukkige jeugd, een eindeloos vertrouwen en het voorleven van een stabiel gezin.

Hooggeleerde Tauritz, Beste Joe,

Net op tijd heb je me in 1992 voor de wetenschap behouden. Je kritische blik en je gevoel voor de menselijke maat hebben me blijvend gevormd. Ook als we elkaar lang niet zien, heb ik altijd het gevoel dat je op de achtergrond dingen voor me regelt, of zou regelen als het nodig was. Ik ben je daar zeer erkentelijk voor.

Hooggeschatte Van den Bogaart, Beste Frank,

Meer dan zestien jaar hebben we nu met elkaar te maken. Met je strategische blik, je nimmer aflatende scherpte en zoektocht naar beter ben je een van de redenen waarom ik graag voor TNO werk. Ik hoop daar nog jaren van te kunnen leren.

De andere reden wordt gevormd door de plezierige collega's, die met hard werken, veel slimheid en een lange adem de visie van TNO in een collegiale sfeer vorm geven. Jullie zijn en maken het werk de moeite waard.

Hooggeschatte Jongsma, Beste Wik,

Met Joe en Frank had jij eerder dan ikzelf door dat het hoogleraarschap wel wat voor me zou zijn. Je leert me hoe industriële innovatie goed kan werken. Laten we samen blijven dromen, zoals in dat restaurantje in Brussel. Die kleine dingen hebben grote gevolgen.

Hooggeleerde Nauta, Beste Bram,

Als proximus aan de Universiteit Twente heb ik aan jouw steun geen moment getwijfeld. We vullen elkaar aan, en gaan samen een goede tijd tegemoet. Gerdien, zonder jouw ondersteuning weet ik me in Twente geen raad. Michiel, Kesra, Erik, collega's en studenten van de leerstoel Integrated Circuit Design (ICD), wij moeten het maken. Zonder jullie is er helemaal niets.

Tot slot dank ik het College van Bestuur van de Universiteit Twente, en namens haar de Faculteit der Elektrotechniek, Wiskunde en Informatica, samen met de stichting Lorentz-Van Iterson Fonds TNO, de stichting LIFT, voor het in mij gestelde vertrouwen. Ik zal naar mijn vermogen en oordeel handelen om dat vertrouwen niet te beschamen.

De cirkel is rond: Deze oratie is met Lorentz begonnen en eindigt ermee. Kleine zaken, zoals het luiden van de alarmbel door Lorentz in 1917 over de kloof tussen het natuurwetenschappelijk onderzoek en de problemen van de samenleving in een oorlogsomgeving, hebben soms grote gevolgen. Een individu kan het verschil maken. Ik wil dit dankwoord en deze rede afsluiten. Afsluiten door mijn vrouw te bedanken.

Corine: Dat verschil maak jij voor mij!

Ik heb gezegd.



Figuur 15: Teylers museum in Haarlem

Bronvermelding

H.A. Lorentz, Impressions of his life and work. Edited by G.L. de Haas – Lorentz, 1957.

H.A. Lorentz door Ferdinand Gustaaf Willem Oldebelt, 1857 – 1935.

A.T. de Hoop, Research in Academia – Een epiloog, uittreerede 22 november 1996.

L.M. Krauss en R.J. Scherrer, The end of cosmology, Scientific American, maart 2008.

IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques – 50th anniversary issue, maart 2002.

R. den Besten, “Openingspeech CAMRAS”, 29 januari 2007, Dwingeloo.

F.E. van Vliet en A. de Boer, Fully-Integrated Core chip for X-Band Phased-Array T/R modules, IEEE MTT-S, 2004.

M. Leezenberg en G. de Vries, Wetenschapsfilosofie voor Geesteswetenschappen, 2001.

A. Kinninging, Geografie van goed en kwaad, 2005.

Curriculum Vitae

Prof.dr.ir. Frank van Vliet is per 1 december 2007 benoemd tot hoogleraar Microwave Integration aan de faculteit Elektrotechniek, Wiskunde en Informatica van de Universiteit Twente.

Frank van Vliet studeerde elektrotechniek in Delft, waar hij zich specialiseerde in de numerieke elektromagnetisme en de microgolfttechniek. Na zijn afstuderen onder Anton Tjihuis en Hans Blok in 1992 deed hij aldaar een promotieonderzoek in samenwerking met TNO op het gebied van de integratie van microgolffilters onder leiding van Joe Tauritz en Roel Baets.

Na dit promotieonderzoek trad hij in dienst van TNO, waar hij verschillende functies vervulde in de groep radartechnologie, later hernoemd tot integrated front-ends en nog weer later tot transceivers. Frank van Vliet is er nu *senior technology officer*.

Zijn passie voor radiosystemen werd al op jonge leeftijd gewekt en is nooit meer overgegaan. De belangrijkste elementen hierin zijn het ontwerp en de karakterisatie van MMIC's, de integratie van front-ends en antennes voor array systemen en de interactie tussen systeemoplossingen en technologische mogelijkheden. Hij is werkzaam voor toepassingen op het gebied van militaire sensor- en communicatiesystemen, op phased-array technologie voor de ruimtevaart en de civiele microgolfttechniek.

Frank van Vliet is IEEE senior member, lid van de European Defence Agency (EDA) Captech IAPoI (Components) als Technical Expert, lid van het European Space Agency (ESA) Components Technology - Microwave Board en lid van het kernteam van de European Radio and Microwave Interest Group (EuRaMIG).

Colofon

CIP-gegevens Koninklijke Bibliotheek, Den Haag:

Vliet, F.E. van, (2009), 'Microwaves. When waves matter', Oratie Universiteit Twente, Enschede.

ISBN: 978-90-9023986-6

NUR: 959 (Elektrotechniek)

Trefwoorden: Lorentz, Marconi, Humboldt, microgolfttechniek, integratie.

Verantwoording illustraties

Figuur 4 wordt gebruikt met toestemming van PA6NL

Figuur 5 wordt gebruikt met toestemming van de Stichting CAMRAS

Figuur 6 wordt gebruikt met toestemming van Museum Waalsdorp

Figuur 7 en 8 worden gebruikt met toestemming van TNO

Figuur 7 wordt gebruikt met toestemming van Thales

Figuur 10 wordt gebruikt met toestemming van Win Semiconductor

Copyright © F.E. van Vliet, 2009; f.e.vanvliet@utwente.nl

Alle rechten voorbehouden. Niets uit deze uitgave mag worden verveelvuldigd, opgeslagen in een automatisch gegevensbestand, of openbaar gemaakt, in enige vorm, of op enige wijze, hetzij elektronisch, mechanisch door fotocopieën, of op enige andere manier, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van de auteur.

All rights reserved. No part of the material protected by this copyright notice may be reproduced or utilised in any form or by any means, electronically, mechanically, including photocopying, recording or by any other information storage and retrieval system, without the prior permission in writing from the owner of this copyright.



Universiteit Twente
de ondernemende universiteit