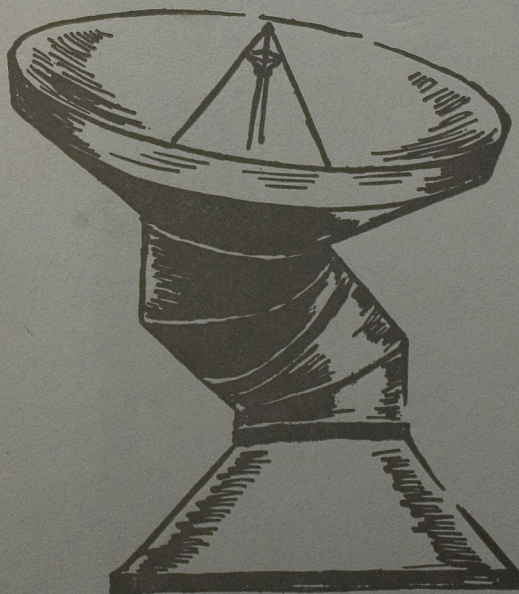


WERKING OP AFSTAND

IR. L. KRUL



DELFTSE UNIVERSITAIRE PERS

Werking op afstand

Werking op afstand

Inaugurale rede
uitgesproken bij de aanvaarding
van het ambt van gewoon hoogleraar
in de microtechniek
aan de afdeling der Elektrotechniek
van de Technische Hogeschool te Delft
op woensdag 3 april 1974
door dr. J. Kruit

Copyright © 1974 by Delft University of Technology
Delft, The Netherlands
All rights reserved
No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted, in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording, or by any information storage and retrieval system, without permission in writing from the publisher.
Delft University of Technology

Werking op afstand

*Inaugurele rede
uitgesproken bij de aanvaarding
van het ambt van gewoon hoogleraar
in de microgolfttechniek
aan de afdeling der Elektrotechniek
van de Technische Hogeschool te Delft
op woensdag 3 april 1974
door ir. L. Krul*

Delftse Universitaire Pers

Copyright © 1974 by Nijgh-Wolters-Noordhoff Universitaire
Uitgevers B.V.
No part of this book may be reproduced in any form, by print,
photoprint, microfilm or any other means without written
permission from the publisher.
ISBN: 90 298 1201

*Mijne heren leden van de Hogeschoolraad
en van het College van Bestuur,
mijnheer de Rector Magnificus
en mijne heren leden van het College van Dekanen,
mijne dames en heren leden van deze Hogeschoolgemeenschap
en voorts u allen die door uw aanwezigheid
blijk geeft van uw belangstelling,
dames en heren:*

Deze rede bevat circa 6500 woorden maar

*Het beste woord dat ik kan geven is
een luisterapparaat voor een geweldige stilte.*

Hans Andreus

De elektrotechniek kent onder haar beoefenaren er een aantal die de indruk wekken nog immer voort te bouwen op die natuurkundeles uit hun jeugd waarbij de elektrische stroom werd voorgesteld als een door een pijp stromende vloeistof. In werkelijkheid zijn hun metalen pijpenstelsels slechts gevuld met een denkbeeldige vloeistof, de 'ether' die volgens klassieke opvatting onmisbaar is als de drager van elektromagnetische golven en wanneer U in een enkel geval toch een echte vloeistof uit de installatie mocht zien stromen dan dient deze alleen als medium voor de afvoer van in het systeem ontwikkelde warmte.

Het fysisch fenomeen dat schuilgaat achter het begrip elektromagnetische golf heeft in de loop der jaren getoond een groot aantal aspecten te bezitten en het begrip heeft hierdoor het karakter gekregen van een verzamelnaam. In verband hiermee heeft zich het gebruik ontwikkeld om de elektromagnetische golven in te delen in groepen waarbij, met voorbijgaan van een aantal andere mogelijkheden, een indeling die gebaseerd is op het fysische kenmerk golflengte thans algemeen ingang heeft gevonden. Van het hele golflengtespectrum dat aldus ontstaat zijn alleen de lichtgolven die liggen in een klein gebiedje rond een golflengte die gelijk is aan de helft van een miljoenste meter zichtbaar voor de mens.

Keer ik nu terug naar het gebruik van een pijp als transportmiddel voor elektromagnetische golven dan zal dit gebruik U in elk geval met betrekking tot deze lichtgolven uit ervaring bekend zijn. Van deze technische mogelijkheid wordt immers bij de bouw van optische instrumenten zoals verrekijkers, microscopen en telescopen op ruime schaal gebruik gemaakt. Het zou echter onjuist zijn uit deze ervaring te concluderen dat een bepaalde pijp elke willekeurige elektromagnetische golf kan transporteren.

Een nauwkeuriger onderzoek leert dan ook dat dit transport is onderworpen aan een bovengrens voor de gebruikte golflengte die van de orde van de dwarsafmetingen van de pijp is, met andere woorden men zal deze dwarsafmetingen steeds groter moeten kiezen naarmate

de golflengte langer is. Uit praktische overwegingen zal het pijptransport van elektromagnetische golven zich daarom moeten beperken tot die gevallen waarin de golflengte niet groter is dan een paar tientallen centimeters. We bevinden ons dan in het zogenaamde microgolfg gebied en de in de aanhef bedoelde elektrotechnici beoefenen de microgolftechniek.

Hoewel reeds gedurende miljoenen jaren microgolven van kosmische oorsprong onze aarde bereiken heeft de microgolftechniek toch niet hieraan haar ontstaan te danken. Naast het feit dat de microgolven vallen buiten het voor zintuigelijke waarneming toegankelijke golflengtegebied is daarvoor de geringe intensiteit van deze kosmische microgolflstraling als oorzaak aan te voeren. Door deze geringe intensiteit zou de microgolftechniek pas na het bereiken van een zekere graad van perfectie in staat blijken haar eigen natuurlijke bronnen op te sporen. Hier tegenover staat echter dat juist deze geringe intensiteit het mogelijk maakte dat, te midden van de microgolven afkomstig van natuurlijke bronnen, microgolven werden ontdekt die afkomstig waren van een kunstmatige bron. Deze kunstmatige bron was een generator voor elektrische vonken en de ontdekker was Heinrich Hertz.

De belangstelling van Hertz voor de vonkgenerator was het gevolg van een door de Berlijnse Akademie van Wetenschappen in 1879 uitgeloopte prijs voor een experimenteel onderzoek naar de relatie tussen elektromagnetische velden en de diëlektrische polarisatie in niet-geleidende media. De door de vonkgenerator opgewekte elektromagnetische velden bleken echter in staat zich van de materie los te maken en zich in de ruimte uit te breiden. Een fenomeen overigens waarmee we allemaal vertrouwd zijn omdat deze vonkgenerator zich in essentie ook in onze samenleving heeft weten te handhaven als elektrische ontstekingsinrichting voor benzinemotoren en de storende invloed daarvan op radio- en televisieontvangst is welbekend. Nadat Hertz deze, wat hij noemde, 'werking op afstand' had aangetoond richtte hij zijn onderzoek in het bijzonder op de zich in de ruimte uitbreidende elektromagnetische velden: de elektromagnetische golven.

Om de werking van de vonkgenerator te kunnen aantonen was uiteraard een indicator, een detector nodig. Hertz gebruikte hiervoor een instrument bestaande uit een in een cirkelvorm gebogen draad waarin, op de plaats van een kleine onderbreking, twee bolvormige elektroden waren aangebracht. Bij plaatsing in een elektromagnetisch veld werd in de ring een tot vonkoverslag tussen de elektroden aanleiding gevende spanning geïnduceerd. Dit instrument is bekend geworden als de resonator van Hertz en het leeft nog heden ten dage voort als het door het Internationaal Elektrotechnisch Comité aan-

bevolen tekensymbool voor een microgolfltrillingskring, ten onrechte overigens want de golven waarvoor Hertz het instrument gebruikte hadden een veel grotere lengte. De microgolven lieten zich pas later ontdekken en wel dank zij een toevallige samenloop van omstandigheden zoals men vaker, op zoek naar het wonder van de techniek, blijkt te stuiten op het wonder van het toeval.

De gevoeligheid van de door Hertz geconstrueerde detector liet nog veel te wensen over waardoor alleen op betrekkelijk korte afstand van de generator een responsie werd verkregen. Hertz was hierdoor echter bepaald niet ontmoedigd want hij schrijft heel enthousiast: 'Meteen nadat ik er in geslaagd was aan te tonen dat elektrische trillingen zich als een golf in de ruimte kunnen uitbreiden bedacht ik experimenten die ten doel hadden hun werking te concentreren om ze zo op grotere afstanden te kunnen aantonen'. Zo gebeurde het dan dat Hertz omstreeks 1888 probeerde de uitgezonden straling te bundelen door gebruik te maken van een metalen spiegel in de vorm van een parabolische cilinder. Hij bracht daartoe twee extra elektroden aan op de brandpuntslijn van deze spiegel en verbond deze elektroden met de vonkgenerator. Groot was zijn verwondering toen hij constateerde dat deze maatregelen in plaats van de 'werking op afstand' te versterken deze juist verzwakten!

Om dit negatieve resultaat te kunnen verklaren moest worden bedacht dat de straling van de vonkbrug niet beperkt was tot één golflengte maar integendeel een heel spectrum van golflengten omvatte. In de eerste plaats nu trad, door de spiegel op de beschreven wijze aan te brengen, afscherming op van het langgolvig deel van het spectrum en dit deel levert bij de vonkgenerator juist de grootste relatieve bijdrage tot de totale intensiteit. In de tweede plaats veronderstelt een toepassing van de parabolische spiegel strikt genomen een verhouding van spiegelafmetingen en golflengte die van dezelfde orde is als in het optische gebied waaraan de toepassing is ontleend. Bij gegeven afmetingen van de spiegel wordt daardoor de bundelende werking steeds beter naarmate de golflengte kleiner is maar bij de vonkgenerator behoort bij een kleinere golflengte ook een kleinere intensiteitsbijdrage. Door het samenspel van alle genoemde factoren kwam een nieuw intensiteitsmaximum tot stand met een lagere waarde en bij een kortere golflengte.

Ten slotte slaagde Hertz er toch in, door het aanbrengen van een aantal verbeteringen en het plaatsnemen van een tweede spiegel aan de ontvangzijde, bij deze kortere golflengte een bruikbare meetopstelling te realiseren. Het is met deze meetopstelling dat hij zijn bekende reeks experimenten heeft uitgevoerd die aantoonde dat elektromagnetische golven met voldoende korte golflengte voor wat betreft hun eigenschappen overeenkomen met lichtgolven. Door herhaling

van de interferentie-experimenten die Young in het optische gebied had uitgevoerd kon Hertz de lengte van zijn golven vaststellen op 66 cm.

Het zal U opgevallen zijn dat de zojuist beschreven meetopstelling door het ontbreken van de pijpen nog niet het uiterlijke kenmerk van de microgolftechniek vertoont waarover ik aan het begin van deze rede sprak. Het was de Engelse onderzoeker Sir Oliver Lodge die in 1894 deze pijp introduceerde als een nieuw soort afscherming. De vonkbrug werd opgenomen in een stuk koperen pijp met ronde doorsnede, aan het ene einde was de pijp open terwijl het andere einde door een plaat was afgedekt. Hoewel Lodge hiermee de eerste gebruiker werd van wat wij thans een golfpijp noemen zijn er geen aanwijzingen dat dit bewust gebeurde. Integendeel de technische wereld van die dagen trok de mogelijkheid van het transport van elektromagnetische golven door een pijp zelfs ernstig in twijfel, zoals in een publikatie van Heaviside uit 1893 duidelijk naar voren komt. De introductie van de pijpafscherming mag dan onbewust hebben plaats gevonden, toch is het juist het karakteristieke golfpijpedrag dat de afschermende werking effectueerde. De golfpijp kan immers alleen golflengten doorlaten die korter zijn dan een door de dwarsdoorsnede bepaalde lengte en daardoor werden uit het opgewekte spectrum de microgolven afgezonderd.

Het eigenlijke doel van het onderzoek dat Hertz en Lodge, als ook een aantal andere onderzoekers in de periode voor 1900, uitvoerden zou men het best kunnen omschrijven als de bestudering van optische fenomenen aan de hand van microgolfschaalmodellen. Hoewel zij daarbij al experimenterende wel nieuwe elementen aan de microgolftechniek toevoegden miste hun werk toch het bredere perspectief dat wordt geopend als een meer praktische toepassing mogelijk blijkt. Het was de jonge Italiaan Marconi die daarin verandering bracht.

Reeds op het moment van zijn eerste kennismaking met de microgolven ontstond bij hem het idee de uitzending van deze golven te doen plaats vinden in het ritme van de punten en strepen van het in de telegrafie via lijnverbindingen reeds bekende alfabet van Morse. In 1896 verlaat hij de universiteit van Bologna en vestigt zich in Engeland waar hij betere mogelijkheden vermoedt om zijn idee te verwezenlijken dan in Italië. Een jaar later slaagt hij er in op een golflengte van 25 cm een radiotelegrafisch contact tot stand te brengen over een afstand van 4 mijl en in datzelfde jaar nog wordt hem op zijn uitvinding octrooi verleend.

Maar de radiotelegrafie zou meer moeten zijn dan een alternatief voor de lijntelegrafie zoals dat bij de korte demonstratie-afstand het

geval was. Met de radiotelegrafie zouden oceanen overbrugd kunnen worden waarbij zowel aan vaste verbindingen als aan verbindingen met schepen kon worden gedacht. Alleen... Marconi realiseerde zich niet dat de door Hertz geconstateerde overeenkomst tussen lichtgolven en microgolven ook inhoudt dat microgolven zich in principe langs rechte lijnen voortplanten waardoor een golf die van het aardoppervlak wordt weggezonden zich met het toenemen van de afstand steeds verder van dit oppervlak verwijderd wat de ontvangst in een verafgelegen punt onmogelijk maakt.

Het is weer door een toeval dat in 1901 bij de eerste daadwerkelijke poging om de Atlantische Oceaan te overbruggen veel langere golven werden opgewekt waardoor de poging, dank zij de afwijkende eigenschappen van deze langere golven, toch kon slagen. Het ligt voor de hand dat het succes van deze onderneming de belangstelling voor de langere golven sterk stimuleerde en dat kon bijna niet anders dan ten koste van de interesse voor de microgolven gaan.

Met Marconi viel het doek, er kwam een einde aan het eerste bedrijf van het microgolfspel en aangezien het nog ruim dertig jaar zal duren voordat het doek weer opgaat voor het tweede bedrijf is er zeker ruimte voor een entr'acte waarin wij eerst nog even de aandacht richten op de spelers uit het eerste bedrijf.

De door de Berlijnse Akademie van Wetenschappen uitgelopen prijs vormde dan voor Hertz misschien wel de aanleiding om zijn onderzoek aan te vangen maar het is nauwelijks denkbaar dat deze prijs in staat was om gedurende bijna tien jaar zijn drijfveer te blijven. Nee, om na elke teleurstelling toch weer verder te gaan met een onderzoek is een betere motivatie nodig en Hertz vond die in de heersende onzekerheid. Onzekerheid met name over de enige jaren daarvoor door Maxwell opgestelde theorie waarmee deze had kunnen aantonen dat elektromagnetische golven in de ruimte mogelijk waren. Maar het was een theorie en niet iedereen was overtuigd van de juistheid ervan. Ook Hertz was op een bepaald moment bereid om alles in twijfel te trekken, hij schrijft daarover: 'Ik bedacht dat het even belangrijk zou zijn om aan te tonen dat elektrische velden zich met oneindig grote snelheid voortplanten, waardoor de theorie van Maxwell onjuist zou blijken, als het zou zijn om te bewijzen dat deze theorie wel juist was'. Als dan tenslotte de experimenten de theorie bevestigen is Hertz een tevreden mens.

De tweede hoofdpersoon Marconi ziet de experimenten van Hertz niet als een verovering op de theorie die een beschrijving is van de natuur, maar als een rechtstreekse verovering op de natuur zelf, een stuk techniek dat moet worden ingezet in dienst van mens en maatschappij. Maar wat meer is, Marconi is ook bereid om door zijn persoonlijke inzet aan deze visie gestalte te geven en hij zal pas

tevreden zijn als de aardbol gevangen is in een draadloos net van radioverbindingen.

Maar laat ik nu terugkeren naar de microgolfttechniek om het tweede bedrijf bij U te introduceren.

Na een eerste periode waarin slechts enkele verspreide publikaties er blijk van geven dat de microgolven nog niet geheel vergeten zijn komt het experimentele werk weer op gang waarbij echter het zoeken naar zekerheid met betrekking tot de ruimtelijke golfuitbreiding heeft plaatsgemaakt voor het zoeken naar een nieuwe zekerheid. Lord Rayleigh had al in 1897 in zijn publikatie: 'On the Passage of Electric Waves through Tubes or the Vibrations of dielectric Cylinders' langs theoretische weg aangetoond dat elektromagnetische golven zich kunnen voortplanten in een metalen pijp en het waren deze theoretische oplossingen voor de golfpijvoortplanting die nog steeds om experimentele verificatie vroegen.

Het experimentele werk met golfpijpen vordert slechts langzaam door het ontbreken van een geschikte microgolfgenerator. De vonkgenerator verdween namelijk van het toneel waar zijn plaats werd ingenomen door de elektronenbuis maar deze bleek voor het opwekken van microgolven nog niet geschikt. Om uit deze impasse te geraken vulde men de pijp wel met water dat dan door zijn hoge diëlektrische constante de maximaal te transporteren golflengte een factor negen groter maakte.

In 1921 legt Hull de basis voor de eerste speciale microgolf-elektronenbuis met de bestudering van de elektronenbeweging in een cilindrische diode waarbij in de asrichting een homogeen, constant magnetisch veld is aangebracht. Door de diode op te nemen in een resonant systeem kan een elektrische trilling in stand worden gehouden maar de schakeling werkt niet betrouwbaar, het rendement is slecht en het opgewekte vermogen is laag bij golflengten die korter zijn dan 50 cm.

Na 1930 nemen zowel de onderzoekactiviteiten als de technische mogelijkheden snel toe en naast de 'Hertzen' krijgen ook de 'Marconi's' weer een kans. Zo wordt in 1931 een microgolf-radioverbinding gedemonstreerd tussen St. Margaret's Bay bij Dover in Engeland en Kaap Blanc Nez in de omgeving van Calais, Frankrijk, een afstand van 56 km. De gebruikte golflengte was 18 cm en het was mogelijk over deze verbinding gelijktijdig 9 telefoongesprekken te voeren. Drie jaar later wordt nog een tweede communicatietoepassing gedemonstreerd waarbij telefoon- en telegraafsignalen worden overgedragen via een ronde golfpijp met een diameter van 5 inch, de overbrugde afstand is echter aanzienlijk korter, namelijk ruim 250 m.

Hoewel deze gebeurtenissen al aangeven dat de microgolfttechniek

op zoek is naar een passende plaats in het maatschappelijk gebeuren begint haar toekomst zich nog pas aan het eind van de dertiger jaren duidelijk af te tekenen. Niet alleen had toen de techniek van opsporing en plaatsbepaling door middel van radiogolven zich onmiskenbaar aangediend maar bovendien waren er sterke aanwijzingen dat de radar, onder welke naam de apparatuur voor deze opsporing en plaatsbepaling bekend geworden is, gebruik zou moeten maken van golflengten in het microgolfgebied. Met deze doorbraak begint een tijdperk waarin een gestadig groeiend aantal toepassingen de wereld der onzichtbare microgolven voor iedereen in onze samenleving bespeurbaar maakt — het tweede bedrijf is begonnen.

Het zwaartepunt lag bij de realisering van de eerste radar zonder twijfel bij het magnetron, een zendbuis die voortbouwt op het reeds door Hull aangegeven principe. Het was de in 1970 met een eredoctoraat van deze Hogeschool geëerde Nederlander Posthumus — niet te verwarren met zijn in universitaire kringen meer bekend geworden naamgenoot — die in 1935 een belangrijke bijdrage leverde aan de ontwikkeling van dit magnetron.

De radar heeft zich sindsdien ontwikkeld tot een voor de navigatie op het water en in de lucht onmisbaar hulpmiddel maar zijn ontwikkeling is daarmee nog lang niet afgesloten. Zo bewees de radar reeds in enkele gevallen zijn nut bij het railverkeer en dank zij de modernste ontwikkelingen zijn ook goedkope 'mini-radars' beschikbaar gekomen waardoor men zelfs kan spelen met de gedachte radar in te schakelen bij het wegverkeer, waarbij ik dan uiteraard niet denk aan de toepassing waarop U door het bekende bordje 'radarcontrole' wordt geattendeerd.

Hoewel het zeker niet zo is dat de radar zijn ontstaan dankt aan de tweede wereldoorlog, werd zijn ontwikkeling er wel door versneld en dat hield ook in dat de kennis van de microgolfttechniek in het algemeen in die periode sterk toenam. Daardoor wordt het verklaarbaar dat reeds kort na deze oorlog de microgolfttechniek kon worden ingezet bij de uitbreiding van de communicatiemiddelen. De microgolf-radioverbinding, meestal straalverbinding genoemd omdat het vermogen in een smalle bundel wordt uitgezonden, doet haar intrede. Aanvankelijk wordt de straalverbinding ontwikkeld ten behoeve van het transport van televisiesignalen omdat daarvoor een geschikt alternatief ontbreekt. In 1947 wordt voor het eerst een dergelijke televisie-straalverbinding ingezet op een traject tussen New York en Boston. De rechtlijnige voortplanting van de microgolven maakte het nodig op deze afstand van 200 mijl zeven gecombineerde ontvang-zendstations tussen te schakelen op welke wijze de langs het aardoppervlak gebogen verbindinglijn van de beide eindstations

werd benaderd door acht rechte lijnstukken. Het succes van dit televisietransport effende de weg voor de telefonietoepassing en twee jaar later werd in Amerika het bekende TD-2 systeem geïntroduceerd dat per verbinding hetzij 480 telefoonsignalen, hetzij één televisiesignaal kon overdragen. Geleidelijk aan begint daarna dan het straalverbindingen net zich ook uit te breiden over de rest van de wereld, met uitzondering van de oceanen, want daar was het onmogelijk de noodzakelijke tussenstations aan te brengen.

Dank zij de ontwikkeling van de ruimtetechnologie echter wordt het mogelijk tussenstations in een baan om de aarde te brengen. De communicatiesatelliet doet zijn intrede en maakt wat eerst een fictie leek tot realiteit: een microgolfbundel die de oceaan overbrugt. In de jaren volgend op de lancering van de eerste experimentele communicatiesatelliet 'Telstar' in 1962 heeft de telecommunicatiester zijn vaste plaats ingenomen aan het radiofirmament. Hoewel die plaats reeds volledig wordt waargemaakt door bij de overdracht van telefoon- en televisiesignalen bewezen diensten liggen nog belangrijke uitbreidingen in het verschiet. Zo denkt men niet alleen aan de inschakeling van communicatiesatellieten bij de afwikkeling van het radioverkeer met schepen en vliegtuigen, maar ook aan het gebruik van satellieten voor omroepdoeleinden: eerst als centraal voedingspunt voor programma-distributie-netwerken, zowel nationaal (in Rusland en Canada al realiteit) als internationaal, maar in een later stadium wellicht ook als rechtstreekse omroepzender.

Hoewel de straalverbinding een snelle start kon maken dank zij de tijdens de voorafgaande radarontwikkeling verworven basiskennis, werd al spoedig duidelijk dat deze communicatietoepassing veel hogere eisen stelde ten aanzien van nauwkeurigheid en betrouwbaarheid van componenten en schakelingen. Het gevolg was dat er nieuwe componenten moesten worden ontwikkeld en dat er betere methoden voor het ontwerpen van schakelingen moesten worden gevonden en zo werd in feite de communicatietechniek bepalend voor de verdere uitbouw van de microgolftechniek voor zover die althans betrekking heeft op kleinere vermogens, want de groot-vermogen-aspecten bleven het domein van de radar.

De betrouwbaarheid van de straalverbinding als systeem wordt echter niet alleen bepaald door de betrouwbaarheid van de componenten, voor een klein percentage van de tijd blijkt ook een ongewenste beïnvloeding van de microgolven op de transmissieweg tussen zender en ontvanger een rol te spelen. Deze ongewenste beïnvloeding hangt rechtstreeks samen met de fysische processen die zich afspelen in de onderste laag van de ons omringende atmosfeer, die meestal wordt aangeduid als de troposfeer.

Voor de aanvankelijk toegepaste langere microgolven is uitsluitend

het brekingsindexverloop in de troposfeer van belang maar voor de kortere golven is ook de neerslag, vooral als deze valt in de vorm van regen, een storende factor. Beide invloeden kunnen een zo grote extra-verzwakking ten gevolge hebben dat het nog resterende signaal onbruikbaar wordt, wat op hetzelfde neerkomt als het verbreken van de verbinding.

Het verloop van de brekingsindex kan de extra-verzwakking veroorzaken als dit verloop een zodanig profiel heeft dat er in plaats van één golf, twee of meer golven bij de ontvanger aankomen. We krijgen dan te maken met het effect dat Francesco Grimaldi in 1650 reeds waarnam bij lichtgolven en dat hij als volgt omschreef: 'Komt er bij het licht dat op een voorwerp valt nog ander licht dan kan het voorwerp donkerder worden'. We noemen dit effect interferentie en het kan tot volledige uitdoving aanleiding geven. De extra-verzwakking die tijdens neerslag optreedt is in zekere zin vergelijkbaar met de vermindering van het optisch zicht onder die omstandigheden. De neerslag-deeltjes zullen daarbij enerzijds een deel van het opvallende microgolf-vermogen verstrooien, terwijl anderzijds ook vermogen door de deeltjes wordt geabsorbeerd.

De kennis van de troposferische invloeden is zo voor het ontwerp en voor de exploitatie van straalverbindingen netten van groot belang gebleken. Aan de andere kant echter is ook de kennis van de troposfeer, althans in kwalitatieve zin, sterk toegenomen dank zij de ontelbare op straalverbindingen uitgevoerde metingen. Het is deze wisselwerking die tengevolge heeft gehad dat zowel bij de meteorologen als bij de communicatie-ingenieurs belangstelling is gegroeid voor een meer kwantitatief onderzoek van de troposfeer. Uit deze gemeenschappelijke belangstelling is onder andere de radarmeteorologie ontstaan waarin de radar zich, met gebruikmaking van aan de communicatie ontleende technieken, heeft ontwikkeld tot een meetinstrument dat in belangrijke mate kan bijdragen tot vergroting van onze kennis met betrekking tot de troposferische processen. Zo kunnen met dit meetinstrument niet alleen de ruimtelijke uitbreiding van regenbuien en de verdeling van de regenintensiteit binnen een bui, maar ook het verloop van de brekingsindex in de troposfeer worden bestudeerd.

Zoals de straalverbinding kon voortbouwen op de bij de radarontwikkeling verworven basiskennis, zo kon de satelliet-communicatie weer gebruik maken van het feit dat, dank zij de straalverbinding, nauwkeurigheid en betrouwbaarheid in de microgolftechniek reeds tot begrippen waren geworden. Ten aanzien van de betrouwbaarheid stelt met name dat deel van de apparatuur dat is ondergebracht in de satelliet zelf wel zeer hoge eisen. Voor deze apparatuur wordt

een garantie van minimaal vijf jaar verlangden; dat zou zonder de ervaring opgedaan bij de fabricage van honderden straalverbindingssystemen een onmogelijke opgave zijn geweest.

De satelliet-communicatie bracht naast een verdere uitbouw van reeds bestaande, ook nieuwe ontwikkelingen met zich mee. Zo ontstond vanuit de satelliet-techniek met het oogmerk energie, gewicht en ruimte te besparen een sterke druk op de ontwikkeling van microgolf-halfgeleidercomponenten en een daarbij passende nieuwe vorm van transmissielijn, de 'microstrip' die qua uiterlijke verschijning veel lijkt op de in de elektronica algemeen gebruikte gedrukte bedrading, maar die daarvan toch, zowel in ontwerptechnisch als in technologisch opzicht, sterk verschilt. Het belangrijkste nieuwe element echter dat de satelliet-communicatie inbracht is ongetwijfeld de gevoeligheid, een begrip dat meer dan de begrippen nauwkeurigheid en betrouwbaarheid, een verklarende toelichting vraagt.

Alle tot nu toe beschreven systemen hebben met elkaar gemeen dat ze gebruik maken van de door Hertz geconstateerde 'werking op afstand'. Dat de microgolven zich lieten ontdekken bij een poging deze 'werking op afstand' te concentreren maakt dat het voor de hand ligt dat juist die microgolven zich bijzonder goed lenen voor het verkrijgen van deze concentratie; de daarbij toegepaste hulpmiddelen noemen we antennes. In het voetspoor van Hertz gaan we voor de realisering van microgolfantennes meestal uit van optische principes en de parabolische spiegel is nog steeds een veel voorkomende hoofdvorm.

De concentrerende functie van de antenne komt in een microgolf-systeem op twee verschillende manieren naar voren. Zoals een optische parabolische spiegel niet alleen het licht afkomstig van een in het brandpunt geplaatste lichtbron concentreert in een bundel, maar ook, op grond van de omkeerbaarheid van de gang der lichtstralen, een op de spiegel vallende lichtbundel concentreert in het brandpunt zo heeft ook de microgolfantenne zowel een bundelende functie aan de zendkant als een opvangende functie aan de ontvangkant. Het vermogen dat de ontvangende antenne maximaal aan de bundel kan onttrekken is gelijk aan het produkt van de intensiteit, dat is het bundelvermogen per eenheid van oppervlakte, en de oppervlakte van de opening van de antenne, de zogenaamde apertuur.

Des te kleiner dus de vermogensdichtheid in de bundel is, des te groter moet het apertuuroppervlak worden gemaakt om in het brandpunt van de spiegel een bepaald vermogen ter beschikking te krijgen en dit vermogen kan weer kleiner zijn naarmate de ontvanger die op de antenne volgt een grotere gevoeligheid heeft. De gevoeligheid van een ontvanger kan men echter nooit los zien van de omgeving waarin die ontvanger funktioneert; denkt U hierbij aan het menselijk

oog dat in de stad, door het storende omgevingslicht, veel minder details van de nachtelijke sterrenhemel kan waarnemen dan een eindweegs buiten de stad het geval is.

Net als het menselijk oog ondervindt ook een radio-ontvanger via de antenne een storende invloed van de omgeving en het heeft om plausible redenen geen zin zijn gevoeligheid verder op te voeren dan de grens waarbij deze storende invloed juist waarneembaar wordt. Nu is bij de satelliet-communicatie, bij een zorgvuldig ontwerp van de antenne voor het grondstation, het niveau van de kosmische radiostraling de bepalende factor en omdat deze straling juist in het microgolfgebied, in de omgeving van een golflengte van 7 cm, een vlakverlopend intensiteitsminimum vertoont worden daar extreem gevoelige ontvangers, zoals gekoelde parametrische versterkers, zinvol toepasbaar. Hierdoor kan, bij de geringe intensiteit die een communicatie-satelliet op aarde produceert, worden volstaan met antennes waarvan de middellijn ongeveer 30 m bedraagt. Toch altijd nog een apertuur-oppervlak van ruim 700 vierkante meter zult U zeggen maar de opvallende bundel heeft dan ook een intensiteit die vergelijkbaar is met die welke door een fietslampje wordt geproduceerd op 7000 km afstand!

Hiermee is dan het moment gekomen waarop U van mij waarschijnlijk verwacht dat ik, door het aangeven van enkele lijnen waarlangs naar verwachting de reeds opgesomde toepassingen zich verder zullen ontwikkelen, een blik in de toekomst zal wagen. Zo eenvoudig echter kan ik mij er niet van af maken, want hoewel de tendenzen die ik hier en daar reeds signaleerde zich zonder twijfel zullen voortzetten is er daarnaast een ander proces op gang gekomen dat belangrijke consequenties heeft voor de plaats die de microgolf-techniek inneemt.

Tot nu toe is de microgolftechniek als het ware opgegroeid in de schaduw van haar toepassingen, in welk verband het misschien wel tekenend is dat gangbare benamingen als radar, straalverbinding en satelliet-communicatie er niet uitdrukkelijk op wijzen dat het daarbij om een microgolftoepassing gaat, alleen het Franse 'câble Hertzien' voor straalverbinding getuigt van hoffelijkheid jegens de ontdekker van de microgolven. Deze gang van zaken heeft echter op zichzelf nooit aanleiding gegeven tot moeilijkheden, integendeel, hij heeft niet alleen bevorderd dat de microgolftechniek zich ontwikkelde tot een specialisme van hoog niveau maar voorkwam tegelijkertijd dat dit specialisme uitliep op verstarring.

Bezwaarlijker is dat ook de toepassingen zelf reeds behoren tot een specialistische categorie professionele apparatuur waarvan het gebruik voornamelijk beperkt is tot overheid en semi-overheid. De invoering van nieuwe en de uitbreiding van bestaande systemen wor-

den daardoor onderwerp van politieke keuze en beslissing, wat de positie van de erbij betrokken laboratoria en industrieën bijzonder kwetsbaar maakt. Tijdens de recente recessie in Amerika, veroorzaakt door een inkrimping van overheidsbudgetten, heeft dan ook met name de microgolfindustrie zware klappen moeten incasseren. Door deze industrie is sindsdien sterk benadrukt dat het noodzakelijk was het werkkterrein van de microgolftechniek te verbreden door het vinden van nieuwe toepassingen die zouden kunnen opgroeien in de schaduw van de microgolftechniek. Het in Canada zetelende 'International Microwave Power Institute', dat zich ten doel stelt de industriële, wetenschappelijke en medische microgolf-toepassingen te bevorderen vervult daarbij een stimulerende rol door het organiseren van internationale conferenties en het uitgeven van een tijdschrift. Omdat ook in Europa een groeiende belangstelling voor deze 'non-communication' aspecten van de microgolftechniek valt waar te nemen wordt waarschijnlijk binnenkort een Europese afdeling van het International Microwave Power Institute opgericht.

Voor de 70-er jaren zullen van de zojuist genoemde toepassingen de industriële vermoedelijk wel het belangrijkste blijken en hoewel daarbij ook wel onderwerpen met een duidelijk meetaspect naar voren komen zoals bijvoorbeeld vochtgehaltebepalingen bij papier, films en weefsels, krijgt toch de microgolfverwarming het zwaarste accent. In dit licht moet men ook de sterke toename zien van het aantal microgolfovens voor huishoudelijk gebruik in Amerika, welk aantal in 1973 steeg tot circa 400 000.

Microgolfverwarming is een vorm van diëlektrische verwarming, wat inhoudt dat de warmte-ontwikkeling optreedt door elektrische agitatie van de moleculen die daardoor heen en weer bewegen zoals een windvaan dat zal doen onder invloed van een telkens van richting veranderende wind. Een noodzakelijke voorwaarde voor het tot stand komen van deze agitatie is uiteraard dat het microgolfvermogen de moleculen kan bereiken, andere gezegd het materiaal moet voor de microgolven van de gebruikte golflengte voldoende door-dringbaar zijn zodat metalen bijvoorbeeld op deze wijze niet kunnen worden verwarmd.

Omdat de agiterende elektromagnetische golf het materiaal binnendringt vindt de microgolfverwarming van binnen naar buiten plaats, dit in tegenstelling tot de conventionele verwarming die van buiten naar binnen plaats vindt. De snelheid waarmee het conventionele verwarmingsproces kan verlopen wordt daarom meestal bepaald door de maximale temperatuur die het buitenoppervlak kan verdragen. Microgolfverwarming kent deze beperking niet; wil men daarbij het proces versnellen dan hoeft slechts een groter vermogen te worden toegevoerd.

De door procesversnelling te realiseren kwantiteitsverhoging is echter

zeker niet het enige voordeel dat met microgolfverwarming te behalen is. Door microgolfverwarming te combineren met conventionele verwarming kan ook tot een betere beheersing van het temperatuurverloop in het te verwarmen object worden gekomen en dit zal dikwijls kwalitatief betere eindprodukten opleveren. Zo zou waarschijnlijk langs deze weg het vulcaniseerproces voor autobanden nog zoveel verbeterd kunnen worden dat de levensduur van de banden die van de auto gaat overtreffen.

Ook de microgolfverwarming is terug te voeren tot het begrip 'werking op afstand' maar het concentreren van de werking op afstand behoeft hier niet te bevorderen dat de afstand kan worden vergroot maar moet erop gericht zijn het microgolfvermogen zoveel mogelijk op de juiste plaats (namelijk in het te verwarmen object) terecht te doen komen. De hiervoor gebruikte middelen worden geen antennes maar applicators genoemd. Het zijn deze applicators die een belangrijk aandeel hebben in de microgolfactiviteit die rond de industriële toepassingen wordt ontwikkeld. De industriële toepassingen brachten daarnaast ook weer een algemeen aspect naar voren dat thuis hoort in de reeks nauwkeurigheid, betrouwbaarheid, gevoeligheid en dat aspect is veiligheid.

'Werking op afstand' kan men ook omschrijven als een proces waarbij gebruik wordt gemaakt van straling. Nu is 'straling' eigenlijk net zo'n verzamelnaam als 'elektromagnetische golf' maar toch denkt vrijwel iedereen als hij het woord straling hoort gebruiken in verband met veiligheid in de eerste plaats aan radio-actieve straling. Microgolfstraling echter veroorzaakt warmteontwikkeling en werkt als zodanig, in tegenstelling tot de radio-actieve straling, niet cumulatief. De hoeveelheid microgolfstraling die het menselijk lichaam kan verdragen hangt af van de snelheid waarmee de ontwikkelde warmte wordt afgevoerd. Die delen van het lichaam waar deze warmte-afvoer door geringe bloedcirculatie slecht is zullen het eerst schade lijden, maar omdat de straling niet cumulatief werkt is er altijd een veilige grens aan te geven. Zo trad in oktober 1971 in Amerika een wet in werking die voor ovens voor huishoudelijk gebruik een maximale intensiteit toestaat van 1 mW per vierkante cm gemeten op 5 cm afstand van de oven, binnen deze afstand mag de intensiteit dan nog tot 5 mW per vierkante cm oplopen. Deze getallen hebben uiteraard betrekking op een oven in gesloten toestand, bij het openen moet de oven vanzelfsprekend automatisch worden uitgeschakeld.

Er zijn een aantal oorzaken aan te geven waardoor speciaal in het kader van de industriële toepassingen het begrip veiligheid extra aandacht vraagt. Zo zijn de bij de microgolfcommunicatie toegepaste vermogens meestal klein, de enige uitzondering vormt de zender

van een grondstation voor satelliet-communicatie maar de daardoor opgewekte vermogensdichtheid bedraagt vlak voor de antenne gemeten minder dan 0,5 mW per vierkante cm, wat ruim onder de veilige grens ligt. In de radartechniek wordt met grotere vermogensdichtheden gewerkt, maar daar kan men aanvoeren dat de gebruiker van de radar, de operator, zich voor het uitoefenen van zijn taak niet in het door de antenne opgewekte veld hoeft te begeven, daar ligt het werkterrein van de technicus en die mag in staat worden geacht veilig te werken.

Bij huishoudelijke en industriële verwarmingstoepassingen zal het meestal in het kader van de uit te voeren werkzaamheden wel noodzakelijk zijn dat de gebruiker zich in de nabijheid van de oven bevindt. Nu zal dit bij een nieuwe installatie geen problemen opleveren want bij de keuring kunnen natuurlijk de nodige metingen worden verricht. Maar in de loop der tijd kunnen zich kleine gebreken gaan voordoen of worden zelfs misschien onoordeelkundig modificaties aangebracht. Teneinde risico's in dit opzicht te vermijden zou ik niet alleen willen pleiten voor een goede voorlichting maar ook voor het aanbrengen van indicatoren in de nabijheid van de apparatuur die de 'werking op afstand' bewaken en zo nodig de apparatuur uitschakelen.

Dames en Heren,

Na het eerste bedrijf waarin ik voor U het prille begin van de microgolfttechniek heb beschreven begon het tweede bedrijf met flitsen van gerealiseerde en nog te verwachten toepassingen van de microgolfttechniek. Heel globaal zou men kunnen stellen dat er te beginnen met de radar in de jaren veertig elke tien jaar een toepassingsgebied is bijgekomen. In de vijftiger jaren werden de straalverbindingen, in de zestiger jaren werd de satellietcommunicatie en in de zeventiger jaren worden de industriële toepassingen aan het werkterrein van de microgolfttechniek toegevoegd. Steeds heeft de nieuwe toepassing daarbij gesteund op de reeds bestaande, maar omgekeerd heeft ook het reeds bestaande geprofiteerd van het nieuwe. Het tweede bedrijf had ik dus kunnen omschrijven als een bedrijf waarin een aantal handelingen zich gelijktijdig voltrekken en waarbij de dialogen voortdurend op elkaar inhaken.

Gebruikmakende van haar toepassingen heb ik nagestreefd U een indruk te geven van de rol die de microgolfttechniek in onze samenleving speelt. Door de toepassingen als uitgangspunt te kiezen heb ik bovendien duidelijk willen maken dat ik de microgolfttechniek zie als een vak dat men alleen op basis van die toepassingen zinvol kan beoefenen. Ik ben mij er van bewust daarmee mijn normen hoog te stellen, want het betekent dat van de microgolfttechnicus naast specifieke vakkennis ook de bereidheid wordt gevraagd zich telkens weer

te verdiepen in nieuwe toepassingen. Uiteraard zal hij er voor moeten waken bij het verkennen van een nieuwe toepassingen-stroom, niet in een stroomversnelling te worden meegenomen. Gezien vanuit de microgolfttechniek zou hij daartoe zorgvuldig moeten overwegen of microgolven daadwerkelijk een, hetzij betere, hetzij snellere, hetzij goedkopere oplossing kunnen bieden. Breder gezien zou hij zijn keuze, om met de woorden van onze minister voor wetenschapsbeleid te spreken, moeten afstemmen op de prioriteiten die vanuit de samenleving worden gesteld.

Hoewel een dergelijke uitspraak ongetwijfeld aardig klinkt moet men er toch niet te lang over nadenken want dan wordt de interpretatie ervan steeds moeilijker. Wat zou men bijvoorbeeld niet allemaal kunnen bedoelen met die drie woordjes 'vanuit de samenleving'?

Zou men er de samenleving als het geheel der met elkaar verkerende mensen mee willen aanduiden, dan mogen onze verwachtingen met betrekking tot het stellen van prioriteiten niet hoog gespannen zijn. Deze samenleving immers is de producten van het wetenschappelijk onderzoek gaan aanvaarden als iets dat min of meer vanzelfsprekend is en bij een directe televisie-uitzending uit Amerika zijn het alleen nog de grondstations voor satelliet-communicatie die in verbazing hun grote ogen oprichten.

Ongetwijfeld zal er ook iemand zijn die aanvoert dat natuurlijk niet gedacht moet worden aan de samenleving als geheel maar aan de door deze samenleving gekozen volksvertegenwoordiging. Daarmee wordt het wetenschapsbeleid echter een onderwerp van politieke beslissing en hem zou ik willen wijzen op de door de microgolfindustrie opgedane ervaring die overigens niet beperkt is tot Amerika, al heeft men er daar wel directe consequenties aan verbonden.

Gelukkig is er ook nog een derde interpretatie te geven aan de woorden 'vanuit de samenleving' en dan denk ik aan de mogelijkheid dat vanuit de samenleving de enkeling naar voren komt die niet alleen bezielde is van een idee dat getuigt van visie, maar die tevens bereid is met volledige persoonlijke inzet aan deze visie gestalte te geven. Maar heb ik deze zelfde woorden niet ook al een keer gebruikt in verband met Marconi?

Het is mijn overtuiging dat er voor deze enkeling — en dat geldt zeker binnen het vakgebied dat microgolfttechniek wordt genoemd — nog steeds goede kansen zijn. Kansen voor de enkeling om creatief te zijn bij het vinden van oplossingen voor door nieuwe toepassingen opgeworpen problemen, kansen ook voor de enkeling om uitgaande van bestaande zekerheden nieuwe zekerheden op te sporen en aldus bij te dragen tot een vergroting van de vakkennis.

Dit beeld van de enkeling brengt mij bij een ander beeld dat een aantal jaren geleden te zien was in een Londense kunstgalerie. Bij oppervlakkige beschouwing leek dit beeld, dat werd gemaakt door

de Westduitse beeldhouwer Michael Schwarze, op een hardloper die zich, geknield in de startblokken, gereed houdt voor het startsein. Bij nauwkeuriger beschouwing blijkt dat het bovenlichaam van de atleet vanaf zijn middel werd vervangen door een hand waarvan de vingertoppen licht de grond beroeren. Dit beeld van Michael Schwarze is voor mij een monument voor de onderzoeker geworden. Daar zijn de gespannen beenspieren als symbool voor de stuwende innerlijke kracht die de onderzoeker voortdrijft ondanks vele tegenslagen en tegelijk zijn er ook de gevoelige vingertoppen die al tastend op zoek zijn naar nieuwe zekerheden.

Maar het beeld vertelt ons ook dat organisatie en reorganisatie van wetenschappelijk onderzoek grote zorgvuldigheid vragen als men wil voorkomen dat de onderzoeker zijn vingers intrekt teneinde zich te vrijwaren voor de pijnlijke ervaring die ontstaat als daarop wordt getrapt!

Zeer geachte toehoorders,

Gekomen aan het einde van mijn rede betuig ik mijn eerbiedige dank aan Hare Majesteit de Koningin die mij tot gewoon hoogleraar aan deze Hogeschool heeft willen benoemen. Voorts betrek ik in deze dank allen die aan de voorbereiding van deze benoeming hebben meegewerkt, in het bijzonder de leden van de benoemingscommissie, de afdelingsraad van de afdeling der Elektrotechniek, het College van Dekanen en het College van Bestuur.

Dames en heren, leden van de E-gemeenschap,

Reeds sedert bijna negen jaar ben ik nu in Uw midden werkzaam. U heeft mij in die periode niet alleen de middelen verschafte om het laboratorium waarvoor Prof. Schouten de basis legde verder uit te bouwen, maar U liet mij bovendien de vrijheid om aan het onderzoek in dit laboratorium een nieuwe richting te geven. Ik ben daarvoor de E-gemeenschap als geheel bijzonder dankbaar maar toch wil ik Prof. Bordewijk met name noemen, zowel zijn morele alsook zijn materiële steun hebben erg veel voor mij betekend. Tenslotte spreek ik de hoop uit dat het mij gegeven zal zijn nog vele jaren mijn bijdrage te leveren aan het werk in onze afdeling, waarbij deze benoeming mij zal stimuleren voort te gaan op de eerder ingeslagen weg.

Medewerkers van de voorlopige vakgroep Microgolftechniek,
Het laboratorium voor Microgolftechniek, later de voorlopige vakgroep Microgolftechniek bestaat nu ruim 7 jaar. Een aantal Uwer heeft de oprichting van het laboratorium nog meegemaakt terwijl de overigen in de loop der tijd de gelederen kwamen versterken. Het verheugt mij bijzonder hier te mogen constateren dat wij daarbij in grote eensgezindheid zijn opgegroeid; alleen daaraan is het te danken dat de ideeën die bij mij leefden ten aanzien van onderzoek en onderwijs gestalte konden krijgen. Mijn benoeming houdt daarom tevens een erkenning in van Uw aller persoonlijke inzet. Ik heb alle reden te mogen verwachten dat onze samenwerking in de toekomst even plezierig zal verlopen als dit in het verleden het geval was.

Dames en heren studenten,

Traditiegetrouw krijgt U het laatste woord, een toegift eigenlijk, want de inhoud van mijn rede was natuurlijk ook voor U bestemd. Het zal U bij het beluisteren ervan zijn opgevallen dat ik vrij uitvoerig heb stilgestaan bij de historische periode van voor 1900; ik wilde daarmee Uw aandacht nog eens vestigen op een hoeveelheid literatuur die naar mijn mening ook thans nog alleszins de moeite van het lezen waard is.

Wat U bij deze literatuur bovenal zal opvallen is de openhartigheid waarmee zowel de positieve als de negatieve resultaten worden beschreven en deze laatste zijn dikwijls wel zo leerzaam. Verder zou deze literatuur U kunnen helpen bij het herontdekken van de fysische wereld wanneer die wereld zich door het mathematisch kortschrift van onze tijd misschien voor U verborgen houdt.

Dames en heren studenten, U krijgt niet alleen het laatste woord maar U heeft ook het laatste woord. U zult voortzetten wat deze generatie begon of misschien zult U verwerpen wat deze generatie begon, maar één ding is zeker: dat U daarbij zult voortbouwen op de verworven zekerheden. Voor het overdragen van deze zekerheden stel ik mij gaarne beschikbaar en ik vertrouw erop dat onze relatie daarbij niet beperkt zal blijven tot een 'werking op afstand'.

Ik dank U voor uw aandacht!