ELEKTROMAGNETISCHE GOLVEN IN PIJPEN

OPENBARE LES

GEGEVEN BIJ DE AANVAARDING VAN HET AMBT VAN LECTOR IN DE THEORIE VAN DE ELEKTRICITEIT AAN DE TECHNISCHE HOGESCHOOL TE DELFT OP DONDERDAG 8 MEI 1958

DOOR

Dr ir A. T. DE HOOP

UITGEVERIJ EXCELSIOR - ORANJEPLEIN 96 - 'S-GRAVENHAGE

Mijne Heren Curatoren,
Mevrouw en Mijne Heren Hoogleraren,
Dames en Heren Lectoren,
Dames en Heren Leden van de Wetenschappelijke Staf,
Dames en Heren Assistenten en Studenten,
en voorts Gij allen, die door Uw aanwezigheid Uw belangstelling toont,

Zeer geachte Toehoorders,

E. G. Cullwick begint de proloog van zijn in 1949 verschenen boek „The Fundamentals of Electromagnetism" aldus:

„The known facts of electricity and magnetism form an exact and coherent body of knowledge of surprising beauty and symmetry, and the unravelling of this beauty by patient thought and experiment forms one of the most fascinating stories of all time. From small and disjoint beginnings, from lodestone and amber, this most incorporeal of nature's secrets gradually capitulated to the restless mind of man, until at last the knowledge handed on by Oersted and Faraday, by Ampère and Maxwell, bids fair to embrace the whole of the physical universe.

To the electrical engineer falls the work of applying this knowledge to practical use. No matter what the particular application, be it a dynamo, a telephone, a broadcast concert, a cathode-ray oscillograph, or a toy magnet, the fundamental physical phenomena are common to all, and fit into one coherent and unified system."

Het kan echter geruime tijd duren, alvorens een theoretisch gevonden en in het laboratorium experimenteel aangetoonde mogelijkheid uitgroeit tot een toepassing in de techniek. Ik moge hedenmiddag in het kort een enkel voorbeeld hiervan met U nagaan en wel het geleiden van elektromagnetische golven door metalen buizen, de z. g. golfpijpen. Deze golfpijpen vormen thans een onmisbaar onderdeel van elk toestel waarin gebruik gemaakt wordt van microgolven (dit zijn elektromagnetische golven met een golflengte in de orde van grootte van centimeters). Als theoretisch ontdekte — en derhalve latent aanwezige — toepassingsmogelijkheid hebben zij echter jaren lang een sluimerend bestaan geleid, totdat een hernieuwde belangstelling leidde tot toepassingen in de techniek. Alvorens echter golven in pijpen te bestuderen, zullen wij enkele ogenblikken onze aan-

dacht wijden aan elektromagnetische golven in de vrije ruimte; ook hier komt de theorie de eer toe vóór te zijn geweest op het experiment.

De grondslagen voor de beschrijving van elektrische en magnetische verschijnselen worden gevormd door een tweetal wetten die genoemd zijn naar James Clerk Maxwell en die uitvoerig worden besproken in zijn in 1873 verschenen, uit twee delen bestaande, „Treatise on Electricity and Magnetism". De beide genoemde wetten hebben wiskundig de vorm van een stelsel simultane partiële differentiaalvergelijkingen van de eerste orde. De z.g. tweede wet van Maxwell is niets anders dan een wiskundige formulering van de inductiewet van Faraday, die door Faraday zelf met gebruik van zijn krachtbuizen in woorden was geformuleerd. In zijn eerste wet verwerkte Maxwell de hypothese, dat een magnetisch veld niet alleen – zoals reeds bekend was – wordt opgewekt door een in een geleider vloeiende elektrische stroom, doch dat dit eveneens geschiedt door een met de tijd veranderend elektrisch veld. Deze stroom noemde hij, in tegenstelling tot de eerstgenoemde geleidingsstroom, de diëlektrische verschuivingsstroom. Maxwell schrijft hierover het volgende:

„One of the chief peculiarities of this treatise is the doctrine which it asserts, that the true electric current, that on which the electromagnetic phenomena depend, is not the same thing as the current of conduction, but that the time-variation of the electric displacement must be taken into account in estimating the total movement of electricity."

De aldus verkregen vergelijkingen waren in tweeërlei opzicht interessant. In de eerste plaats vertoonden zij, wat betreft de coördinaten van ruimte en tijd, een verrassende symmetrie, die later van belang zou zijn voor de speciale relativiteitstheorie. Een tweede opmerkelijk en voor ons thans belangrijker feit was, dat de vergelijkingen van Maxwell oplossingen toelieten, waarbij de elektrische en de magnetische veldsterkte zodanige functies van de plaats en de tijd waren, dat zij geïnterpreteerd konden worden als golven. Hier zou dus sprake zijn van elektromagnetische golven, wier karakter min of meer analoog was met de reeds bekende types van golven, zoals geluidsgolven in lucht, spanningsgolven in een elastisch medium of zwaartekrachtsgolven langs het vrije oppervlak van water en lucht. De voortplantingssnelheid van deze elektromagnetische golven volgde direct uit de uit experimenten bekende waarden van de elektrische en magnetische constanten van het medium, waarin de golven zich voortplantten. Het bleek, dat deze voortplantingssnelheid in lucht van dezelfde orde van grootte was als

de eveneens experimenteel bepaalde voortplantingssnelheid van het licht. Bovendien bleken de elektromagnetische golven transversaal te zijn, d.w.z. de elektrische en de magnetische veldsterkte staan loodrecht op de richting van voortplanting. Experimenteel was reeds aangetoond, dat ook lichtgolven transversaal zijn. Dit alles leidde Maxwell tot de onderstelling, dat licht een elektromagnetisch verschijnsel was, zulks in afwijking van de onderstelling van Fresnel, dat lichtgolven een structuur zouden vertonen, die verwant is met de transversale golven in een elastisch medium.

Zowel het invoeren van de diëlektrische verschuivingsstroom als de hypothese, dat licht een elektromagnetisch verschijnsel was, vroegen echter nog om een experimentele bevestiging. Deze bevestiging werd in de jaren 1886-1888 geleverd door Heinrich Hertz met een reeks van buitengewoon fraaie proeven, waarbij met behulp van een vonkbrug-oscillator elektromagnetische golven werden opgewekt met een golflengte van 66 cm. Hertz toonde aan, dat de door hem opgewekte golven alle eigenschappen hadden, die voor lichtgolven bekend waren. In de eerste plaats bleken de wetten van de geometrische optica, zoals de rechtlijnige voortplanting en de wetten voor terugkaatsing en breking, eveneens geldig te zijn voor elektromagnetische golven. Verder traden er schaduweffecten op, indien in de bundel golven obstakels aanwezig waren; m.a.w. ook de diffraktieverschijnselen uit de fysische optica werden geconstateerd. Een belangrijk verschil ten aanzien van lichtgolven was het sterke effect van de polarisatie van elektromagnetische golven; vooral dit laatste pleitte vóór de juistheid van Maxwell's opvattingen.

Omstreeks deze tijd deden ook de golfpijpen hun intrede. Bij zijn demonstraties op vrijdag 1 juni 1894 in het Royal Institution te Londen plaatste O.J. Lodge om zijn antenne en ontvanger heen buizen met cirkelvormige dwarsdoorsnede. De genoemde antenne bestond uit een vonkbrug-oscillator, die geplaatst was in een aan één zijde afgesloten metalen buis; de ontvanger bestond uit een, eveneens in een aan één zijde afgesloten metalen buis geplaatste, coherer. De pijpen werden dus meer gebruikt om een nauwere bundel van golven te verkrijgen dan om de golven te geleiden. Toch was er een duidelijk effect merkbaar: de sterkte van het door de coherer ontvangen signaal bleek namelijk afhankelijk te zijn van de stand van de coherer ten opzichte van de as van de buis. Op duidelijke wijze werd aangetoond, dat in een stand loodrecht op de as van de buis respectievelijk langs de as van de buis de coherer reageerde op van elkaar verschillende trillingswijzen in de buis; in het

hedendaagse spraakgebruik zouden wij zeggen, dat de ontvanger gevoelig was voor verschillende modi. De bij deze proeven gebruikte golflengte was 20 cm en kleiner; het piekvermogen werd geschat op 70 kW.

In India maakte J.C.Bose voor soortgelijke proeven in de jaren 1895-1897 gebruik van buizen met zowel cirkelvormige als rechthoekige dwarsdoorsnede. De door hem gebruikte golflengte lag tussen 5 mm en 2.5 cm. Een groot aantal toestellen voor microgolf-optica werd door Bose ontwikkeld, o.a. de elektromagnetische hoornantenne en een polarimeter voor microgolven. Ook zocht hij naar een materiaal dat microgolven zou absorberen: vloeipapier gedrenkt in een elektrolyt bleek het beste te voldoen. Enkele van de bovenstaande gegevens werden ontleend aan een zeer lezenswaard overzicht van de microgolftechniek in de jaren 1880 tot 1900, getiteld „Microwave Antenna and Waveguide Techniques before 1900", geschreven door John F.Ramsay en gepubliceerd in Proc. I.R.E. 46 (1958) 405-415.

Laten wij thans onze aandacht richten op de theoretische resultaten die gedurende deze jaren werden verkregen. In het in 1893 verschenen boek „Recent Researches in Electricity and Magnetism" van J.J.Thomson is het volgende probleem te vinden dat men kan beschouwen als een voorloper van het vraagstuk van de voortplanting van golven in holle pijpen. In een door een goed geleidend metaal omgeven cirkelcilindrische holte is op een gegeven tijdstip een elektromagnetisch veld aanwezig. Laat men na dit tijdstip het systeem aan zichzelf over, dan zullen in het algemeen gedempte trillingen optreden. Thomson bepaalt, voor het geval dat de initiale veldverdeling in elke dwarsdoorsnede dezelfde is, de complexe frequentie van deze trillingen. Hoewel men dus niet kan zeggen, dat hiermede de mogelijkheid genoemd is door een holle buis golven te sturen, is het wiskundige probleem er wel zeer nauw mee verwant.

In aansluiting op de berekeningen van J.J.Thomson verschijnt in de Phil. Mag. 43 (1897) 125-132 een artikel van Lord Rayleigh, getiteld „On the Passage of Electric Waves through Tubes, or the Vibration of Dielectric Cylinders". Het probleem van de voortplanting van harmonisch met de tijd veranderende elektromagnetische golven door een buis vindt men hier voor het eerst duidelijk gesteld. Er wordt onderscheid gemaakt tussen golven, waarvan de longitudinale component van de magnetische veldsterkte ontbreekt, en golven, waarvan de longitudinale component van de elektrische veldsterkte ontbreekt, of, om het moderner te zeggen, tussen transversaal magnetische en transversaal elektrische golven. In de onderstelling dat de wand van de buis volmaakt geleidend is, bepaalt Rayleigh de

mogelijke trillingen in de dwarsdoorsnede voor het geval dat deze dwarsdoorsnede een rechthoek respectievelijk een cirkel is. Uit de berekeningen blijkt, dat de trillingen een discreet stelsel vormen, en dat bij elke trillingsvorm een zekere afsnijfrequentie behoort, die uitsluitend bepaald wordt door de vorm en de afmetingen van de doorsnede en het rangnummer van de trilling. Alleen indien de frequentie van de trillingen boven de afsnijfrequentie ligt, is het mogelijk gemiddeld over de tijd vermogen door de buis te sturen. De laagste afsnijfrequentie behoort bij een golflengte, die van dezelfde orde van grootte is als de maximale diameter van de dwarsdoorsnede.

(Wij mogen er hier aan herinneren, dat elektromagnetische golven waarvan de longitudinale component van de magnetische en de elektrische veldsterkte beide ontbreken een afsnijfrequentie nul hebben; deze golven zijn alleen mogelijk indien de dwarsdoorsnede meervoudig samenhangend is of, om het meer technisch uit te drukken, indien er voor de stroom zowel een heen- als een teruggeleider ter beschikking staat. Tot deze laatste categorie behoren de coaxiale kabel en het uit twee draden bestaande snoer van toestellen voor huishoudelijk gebruik.)

Na de publikatie van Rayleigh komt er een tijdperk van stilstand. Theoretische beschouwingen vindt men niet meer en ook experimenteel verdwijnt de belangstelling voor de microgolven. Marconi en zijn navolgers zetten de proeven van Hertz voort en vonden dat voor communicatie-doeleinden elektromagnetische golven met een grotere golflengte dan die Hertz gebruikte meer geschikt waren. Hierdoor verschoof ook de belangstelling van de theoretici naar het gebied van de langere golven.

Tot 1936 wordt er in de literatuur gezwegen over de theorie van de golfpijpen. Later is gebleken, dat John R. Carson in 1924 de mogelijkheid om elektromagnetische golven door pijpen te sturen herontdekte. Zijn onderzoekingen zijn samengevat in een niet-gepubliceerd rapport, getiteld „Hyper-Frequency Wave Filters".

In 1936 verschenen drie publikaties, die alle tot onderwerp hadden de voortplanting van golven in buizen met cirkelvormige dwarsdoorsnede. In de eerste plaats vermelden wij het artikel van W. L. Barrow in de Proc. I. R. E. 24 (1936) 1298-1328, getiteld „Transmission of Electromagnetic Waves in Hollow Tubes of Metal". Deze auteur was tot zijn onderzoek gekomen door zich af te vragen of het mogelijk zou zijn elektromagnetische energie te transporteren door deze als het ware op te sluiten in een — in het ideale geval volmaakt geleidende — metalen buis, zulks in tegenstelling tot Lodge, die, zoals reeds eerder is gezegd, deze buizen eigenlijk als een soort afscherming voor zijn

antenne en ontvanger gebruikte. Ofschoon in theorie de golven, indien de frequentie hoger is dan de reeds genoemde afsnijfrequentie, zich ongedempt, dus zonder verzwakking, voortplanten, eist een meer realistische, technische, behandeling van het vraagstuk vanzelfsprekend het in rekening brengen van het niet-ideaal zijn van de metalen buis en van het materiaal (vaak lucht) waarmee de buis gevuld is. Deze laatste factoren zijn er de oorzaak van, dat de golven meer en meer verzwakt worden naarmate zij grotere afstanden moeten afleggen; hierdoor wordt derhalve de praktische bruikbaarheid van dit soort transmissie beperkt. Dit voor de praktijk uitermate belangrijke aspect wordt uitvoerig besproken in de beide andere publikaties die in 1936 verschenen en wel van de hand van enkele wetenschappelijke onderzoekers van de Bell Telephone Laboratories. Het experimentele gedeelte van dit probleem wordt behandeld door G. C. Southworth in het artikel „Hyper-Frequency Wave Guides - General Considerations and Experimental Results", gepubliceerd in Bell Syst. Techn. Journ. 15 (1936) 284-309. Onmiddellijk hierop aansluitend volgt een theoretische beschouwing van J. R. Carson, S. P. Mead en S. A. Schelkunoff onder de titel „Hyper-Frequency Wave Guides - Mathematical Theory", Bell Syst. Techn. Journ. 15 (1936) 310-333. De auteurs van dit laatste artikel hebben — evenals Barrow — in eerste orde benadering de demping bepaald, in de onderstelling dat de wand van de buis zoal niet volmaakt geleidend dan toch zeer goed geleidend is. Een hoogst merkwaardig resultaat was, dat voor één bepaald type golven, nl. voor de golven die axiale symmetrie vertonen, de demping een monotoon dalende functie van de frequentie is bij toenemende frequentie. Hoe hoger dus de frequentie gekozen wordt, des te minder worden de golven verzwakt. Deze eigenschap maakt dit type golven uitermate geschikt voor transmissie over grote afstanden, met name het transcontinentale telefoonverkeer.

Dank zij de genoemde grondige studies had men, zowel theoretisch als experimenteel, een beter inzicht verkregen in het gedrag van de golfpijp als transmissielijn. De theorie beperkte zich echter nog tot berekeningen voor het geval de golfpijp een zich onbepaald voortzettende cilinder is. Gaat men deze golfpijpen toepassen in schakelingen in een technisch toestel, dan zullen afwijkingen optreden van dit geïdealiseerde beeld. Enerzijds zal men, indien de as van de golfpijp van richting moet veranderen, noodgedwongen bochten of hoeken in de pijp moeten aanbrengen. Dit heeft ten gevolge, dat er in de pijp behalve de golf in de gewenste richting ook een golf in de tegengestelde richting optreedt. Daar deze z. g. gereflecteerde golf het ver-

mogen niet in de gewenste richting transporteert, is dit een nadelig effect. Gesteld nu dat men er door berekening in zou slagen de mate waarin een dergelijke hoek of bocht de invallende golf reflecteert uit te drukken in de afmetingen van de meetkundige configuratie en de gebruikte frequentie. Uit deze resultaten zou blijken of bij een speciale keuze van de diverse grootheden bereikt kan worden, dat er geen gereflecteerde golf optreedt en dus het gehele vermogen in de gewenste richting wordt getransporteerd. Voor sommige configuraties blijkt dit inderdaad het geval te zijn en van de aldus gevonden theoretische kennis kan men profiteren bij het ontwerpen van een technische installatie. De zojuist genoemde effecten zijn, zoals reeds is opgemerkt, ongewenst. Anderzijds worden in vele gevallen met opzet obstakels in de vorm van staafjes, schermen, e.d., in de golfpijp aangebracht, b.v. voor het verwezenlijken van filters voor zeer hoge frequenties. Ook voor dit soort discontinuïteiten is het vanzelfsprekend in hoge mate gewenst via een wiskundige behandeling van het vraagstuk te zien, hoe de verschillende elektrische grootheden afhankelijk zijn van de geometrie van de structuur.

Kon men het hier geschetste programma eerst nog beschouwen als een hobby van de theoreticus, kort vóór en in de Tweede Wereldoorlog werd dit, in verband met het bouwen van radartoestellen voor centimetergolven, voor de geallieërden, en speciaal voor Groot-Britannië, een zaak van lijfsbehoud. In een nota van 15 oktober 1940 werd dan ook door Prime Minister Winston S. Churchill aan de ontwikkeling van radartoestellen de hoogste prioriteit verleend. In deze nota schrijft Churchill:

„The very highest priority in personnel and material should be assigned to what may be called the Radio sphere. This demands scientists, wireless experts, and many classes of highly-skilled labour and high-grade material. On the progress made much of the winning of the war and our future strategy, especially naval, depends. We must impart a far greater accuracy to the A.A. guns, and a far better protection to our warships and harbours. Not only research and experiments, but production, must be pushed hopefully forward from many directions, and after repeated disappointments we shall achieve success."

Wij allen weten dat het, dank zij een gigantische organisatie, een succes geworden is.

In Engeland stond het radaronderzoek onder leiding van Watson-Watt. De strenge geheimhouding, die in de jaren vóór en tijdens de oorlog werd betracht, werd na de oorlog grotendeels opgeheven op de in 1946 gehouden „Radiolocation Conven-

tion" van het „Institution of Electrical Engineers". De verslagen van deze conventie werden gepubliceerd in het 1610 bladzijden tellende Deel III A van Volume 93 van The Journal of the Institution of Electrical Engineers.

In de Verenigde Staten van Amerika werd, in samenwerking met de Engelsen, het onderzoek grootscheeps aangepakt. Een keurkorps van wetenschappelijke onderzoekers werd bijeengebracht in het voor dit doel opgerichte en onder leiding van L. A. DuBridge staande Radiation Laboratory van het Massachusetts Institute of Technology. Specialisten uit allerlei gebieden van de natuurwetenschappen werkten hier samen; ter illustratie moge vermeld worden dat in de oorlogsjaren een bekend geoloog gewerkt heeft aan de ontwikkeling van magnetronzenders. Misschien is juist door deze heterogeniteit het succes zo groot geweest. Was de opzet van dit laboratorium groots, de wetenschappelijke nalatenschap was niet minder monumentaal: in de 28 delen van de M. I. T. Radiation Laboratory Series werd de verworven kennis samengevat.

Wij zullen thans enkele van de problemen noemen die door de theoretische werkgroep onder leiding van J. Schwinger op het Radiation Laboratory zijn opgelost en nagaan welke wiskundige hulpmiddelen daarbij een rol hebben gespeeld.

In grove trekken kunnen twee soorten van vraagstukken worden onderscheiden. De eerste groep zou men kunnen kenschetsen als detailproblemen. Hierbij wordt van een zekere gegeven configuratie uitgerekend, wat de invloed ervan is op een elektromagnetisch veld. Wiskundig gesproken leidt deze klasse van problemen tot elektromagnetische randwaardeproblemen. Als voorbeeld noemen wij een geleidend scherm met openingen, dat aangebracht is loodrecht op de lengterichting van een golfpijp. Door gebruik te maken van geschikt gekozen functies van Green gelukte het Schwinger het elektromagnetische vraagstuk terug te brengen tot het oplossen van zekere integraalvergelijkingen. In sommige gevallen, met name voor half-oneindige cilindrische configuraties, zijn deze integraalvergelijkingen van een type, dat met een door N. Wiener en E. Hopf gevonden methode exact kan worden opgelost. Deze z. g. Wiener-Hopf techniek werd door Schwinger — en onafhankelijk van hem in de Sovjet Unie door V. A. Fock — uitgebreid. De methode maakt gebruik van een integraaltransformatie, de z. g. tweezijdige Laplace-transformatie. Hierbij wordt aan elke in het probleem optredende functie een z. g. getransformeerde functie toegevoegd, die afhankelijk is van een complexe veranderlijke. De singulariteiten van deze getransformeerde functies worden vervolgens op een zeer slimme wijze gescheiden. Nie-

mand zal hebben kunnen vermoeden, dat deze techniek een zo grote vlucht zou nemen, toen punt vier van de notulen van de Sitzung der physikalisch-mathematischen Klasse der Preussischen Akademie der Wissenschaften op 5 november 1931 vermeldde:

„Hr. Bieberbach legte von eine Arbeit der H.H. Prof. N. Wiener in Cambridge (Mass.) und Dr. E. Hopf in Berlin "Ueber eine Klasse singulärer Integralgleichungen". "

Op virtuose wijze werd de techniek door J. Schwinger, J. F. Carlson, A.E. Heins en H.A. Levine toegepast op problemen van de elektromagnetische veldentheorie, die tot de fraaiste op dit gebied behoren.

Een andere, eveneens door Schwinger ontwikkelde methode staat in de literatuur bekend als de „Variatiemethode van Schwinger". Het principe van deze methode moge uiteengezet worden aan de hand van een voorbeeld. Stel, dat in een golfpijp een metalen obstakel, b.v. in de vorm van een scherm met openingen, aanwezig is. Door een invallende elektromagnetische golf worden in dit obstakel stromen opgewekt, die op hun beurt weer een elektromagnetisch veld opwekken. Het is nu mogelijk voor de technisch belangrijke grootheden, die de invloed van dit obstakel karakteriseren, wiskundige uitdrukkingen neer te schrijven, die zodanig gebouwd zijn, dat zij ongevoelig zijn voor kleine verstoringen van de juiste stroomverdeling in het obstakel. Substitueert men in dit soort uitdrukkingen (z.g. stationaire uitdrukkingen) een verstandige keuze voor de stroomverdeling, dan kunnen resultaten bereikt worden die verrassend nauwkeurig zijn. Dit principe heeft in de jaren na 1945 geleid tot een stroom van publikaties, waarin het effect van allerlei configuraties op de aangegeven wijze is berekend. Een schat van aldus verkregen theoretische resultaten is te vinden in het „Waveguide Handbook" van N. Marcuvitz, het tiende deel van de M.I.T. Radiation Laboratory Series.

Een tweede klasse van problemen heeft ten doel het opsporen van algemene betrekkingen tussen de veldgrootheden en is als volgt te karakteriseren. Gegeven zijn een aantal golfpijpen, die aangesloten zijn op een gemeenschappelijk verbindingsstuk. Tussen de bij de diverse modi in deze pijpen behorende transversale componenten van de elektrische en magnetische veldsterkte bestaan, op grond van het lineair zijn van de wetten van Maxwell, lineaire betrekkingen. De coëfficiënten in deze lineaire betrekkingen vormen een vierkant schema, een z.g. matrix. Indien de transversale componenten van de elektrische veldsterkte uitgedrukt worden in de transversale componenten van de magnetische veldsterkte, noemt men de betreffende ma-

trix de impedantiematrix, zulks naar analogie met een dergelijke matrix in de netwerktheorie. Met behulp van stellingen uit de veldentheorie kan men van deze impedantiematrix allerlei algemene eigenschappen afleiden. Wanneer op grond van de hier vermelde beschrijvingswijze de golfpijpen worden voorgesteld als transmissielijnen en het verbindingsstuk wordt gezien als een netwerk van impedanties, is een beeld verkregen waarmee elke elektrotechnicus vertrouwd is. Hierbij kan nog opgemerkt worden, dat meetkundige symmetrie van het verbindingsstuk met inbegrip van de golfpijpen het aantal van elkaar verschillende elementen in het vervangingsnetwerk reduceert. Hoe groter de symmetrie, des te geringer het aantal onafhankelijke parameters van het netwerk. De grootte van deze parameters volgt vanzelfsprekend niet uit deze algemene beschouwingen; daarvoor moet een randwaardeprobleem opgelost worden van de klasse die hiervóór genoemd is.

Hiermede is in korte trekken geschetst hoe de golfpijpen, na begonnen te zijn als een onderwerp van zuiver theoretische interesse, zich ontwikkeld hebben tot een onmisbaar onderdeel van de microgolftechniek. Deze snelle ontwikkeling zou onmogelijk geweest zijn indien niet fysici, mathematici en ingenieurs met een fundamentele wetenschappelijke vorming daarvoor beschikbaar waren geweest.

Zeer geachte Toehoorders,

Wanneer men zich tot taak gesteld ziet onderwijs te geven in de theorie van de elektriciteit en wel in de Afdeling der Elektrotechniek, komt men voor de vraag te staan in hoeverre „theorie" voor onze toekomstige elektrotechnische ingenieurs van belang is. De meningen hierover zijn verdeeld. Sommigen vinden theoretisch inzicht geheel overbodig en beroepen zich op de meester-experimentator Faraday. In zijn boek „Michael Faraday, Man of Simplicity" vertelt de schrijver, James Kendall, dat het aantal proefnemingen dat door Faraday is verricht gesteld kan worden op 16.041. Zonder het genie van Faraday ook maar in het minst te kort te willen doen willen wij toch, voor hen die de theorie zouden willen afschaffen, vaststellen dat de resultaten van enkele duizenden van deze proeven op eenvoudige wijze volgen uit de twee wetten van Maxwell. Evenals vele ingenieurs stak ook Faraday zijn afkeer van de wiskunde niet onder stoelen of banken. Vol trots placht hij te vertellen, dat hij slechts éénmaal in zijn leven een wiskundige handeling had verricht, nl. het draaien aan de zwengel van een rekenma-

chine. Bekend is de opmerking, die Faraday eens tegen Maxwell heeft gemaakt, dat de wiskundigen hun resultaten eigenlijk op twee manieren zouden moeten publiceren: naast het resultaat in de vorm van formules zouden voor het gemak van de experimentatoren in een paralleluitgave de wiskundige „hiëroglyfen" in woorden vertaald moeten zijn.

Een uiterste aan de andere zijde is het in 1957 verschenen boek „Grundprobleme der mathematischen Theorie elektromagnetischer Schwingungen" van Claus Müller. Hierin treft men uitvoerige discussies aan over de existentie en de eenduidigheid van oplossingen van de vergelijkingen van Maxwell, indien deze oplossingen bovendien nog aan een aantal neveneisen (randvoorwaarden, uitstralingsvoorwaarde) moeten voldoen. Als uitgangspunt kiest de schrijver de wetten van Maxwell in integraalvorm en niet, zoals gebruikelijk, in differentiaalvorm, zodat de velden niet differentieerbaar ondersteld behoeven te worden. Daar voor het afleiden van verschillende resultaten gebruik wordt gemaakt van stellingen uit de vectoranalyse, met name de stellingen van Gauss en Stokes, moeten deze stellingen in een zodanige vorm geschreven worden, dat zij eveneens geldig zijn voor niet-differentieerbare vectorvelden. Daartoe voert Müller nieuwe definities in voor de begrippen divergentie en rotatie van een vectorveld. Het is wel bijzonder frappant te zien, hoe deze nieuwe definities niets anders zijn dan een formulering in wiskundige taal van wat de fysicus als beeld van bronsterkte resp. wervelsterkte voor de ogen zweeft. Het zou mij te ver voeren op Müller's werk verder in te gaan. Van zijn boek zou ik willen zeggen, dat het voor de fijnproevers is.

Dat de hier aan de orde gestelde problematiek niet van de laatste jaren is, moge geïllustreerd worden met enkele citaten uit het reeds genoemde boek van J. J. Thomson:

„Students, especially those who commence the subject after a long course of mathematical studies, have a great tendency to regard the whole of Maxwell's theory as a matter of the solution of certain differential equations, and to dispence with any attempt to form for themselves a mental picture of the physical processes which accompany the phenomena they are investigating." Enkele regels verder vervolgt hij: „The use of a physical theory will help to correct the tendency.... to regard as the normal process of investigation in this subject the manipulation of a large number of symbols in the hope that every now and then some valuable result may happen to drop out" en „Analysis is undoubtedly the greatest thought-saving machine ever invented, but I confess I do not think it necessary or desirable

to use artificial means to prevent students from thinking too much."

Ergens tussen de uitersten zal het onderwijs in de elektriciteitsleer moeten liggen. Het verrichten van wetenschappelijk onderzoek op de vele gebieden die de elektrotechniek thans bestrijkt is niet mogelijk zonder een behoorlijk theoretisch inzicht en dan zal het theoretisch arsenaal van de elektrotechnische ingenieur meer moeten bevatten dan de wet van Ohm (spanning is gelijk stroomsterkte maal weerstand), al of niet aangevuld met enkele, vaak in de meest vreemdsoortige eenhedenstelsels geschreven, vuistformules.

Dames en Heren,

Het heeft Hare Majesteit de Koningin behaagd mij te benoemen tot lector aan de Technische Hogeschool te Delft; hiervoor moge ik Hare Majesteit mijn eerbiedige dank betuigen.

Mijne Heren Curatoren der Technische Hogeschool te Delft,

Ik ben U ten zeerste erkentelijk, dat U mij hebt willen voordragen voor de benoeming tot lector in de theorie van de elektriciteit. Het vertrouwen, dat U hiermede in mij hebt gesteld, hoop ik waardig te zijn.

Mijne Heren Hoogleraren en Lectoren van de Afdeling der Elektrotechniek,

De vele wijzigingen, die het studieprogramma voor de elektrotechnische studenten de laatste jaren heeft ondergaan, doen duidelijk uitkomen dat ook voor Uw Afdeling het onderwijs een voorwerp van aanhoudende zorg is. Met vertrouwen in Uw leiding beloof ik naar beste weten mede te werken aan de vorming van onze toekomstige elektrotechnische ingenieurs.

Hooggeleerde Schouten, Hooggeachte Leermeester,

Het is ruim acht jaar geleden, dat ik onder Uw leiding mijn wetenschappelijk werk begon. Dat Gij in al die jaren, ondanks vele organisatorische beslommeringen, steeds tijd wist te vin-

den om over allerlei problemen te discussiëren, bewonder ik in U in hoge mate. Door Uw kritische geest is mijn wetenschappelijk inzicht gerijpt en verdiept. Dat Gij enkele maanden geleden als mijn Promotor wilde optreden, stemt mij zeer dankbaar. Naast U en met U onderwijs te mogen geven in de theoretische elektriciteitsleer is voor mij een grote eer.

Hooggeleerde Bouwkamp,

Uit Uw publikaties leerde ik het fascinerende gebied van de diffraktietheorie kennen. Uw wijze van werken heeft mij steeds tot voorbeeld gediend. Ik hoop dat in mijn werk daardoor iets doorschemert van Uw – zoals Morris Kline het eens heeft uitgedrukt – „passion for accuracy".

Gaarne betuig ik U vanaf deze plaats mijn hartelijke dank voor Uw bemoeiingen, die ertoe geleid hebben, dat ik een jaar lang kon werken aan het Institute of Geophysics van de University of California te Los Angeles, California, U.S.A.

Mijne Heren Leden van de Wetenschappelijke Staf van het Laboratorium voor Elektrotechniek,

Ik ben U zeer dankbaar voor de prettige wijze waarop wij in de achter ons liggende jaren mochten samenwerken. Van harte hoop ik, dat onze samenwerking op dezelfde wijze zal worden voortgezet.

Dames en Heren Medewerkers in de technische en administratieve sector van het Laboratorium voor Elektrotechniek,

Reeds menigmaal heb ik een beroep op Uw kennis en bekwaamheid gedaan. De ervaring heeft geleerd, dat een dergelijk beroep nooit vergeefs is geweest. Dit geeft mij het vertrouwen, dat ik mij ook in de toekomst van Uw medewerking verzekerd kan voelen.

Dames en Heren Elektrotechnische Studenten,

Het is mijn taak voor U een aantal vakken te doceren, die onder het begrip theorie van de elektriciteit vallen. Ik zal

trachten door de daarbij onvermijdelijk optredende wiskundige behandeling heen steeds weer te wijzen op de samenhang met de physische verschijnselen. Wetenschappelijk inzicht in Uw vakgebied kan ik U echter niet leren; dit kunt Gij alleen verwerven door zelfstandig over de vraagstukken na te denken. Mochten er in mijn colleges onduidelijkheden zijn, dan kan ik er mij enerzijds op beroepen dat dit Uw zelfwerkzaamheid zal bevorderen, anderzijds hoop ik dat Gij in dat geval de weg naar mijn werkkamer zult kunnen vinden.

Ik dank U voor Uw aandacht.