

TH. I. SPRENGER

OPWEKKEN EN VERSTERKEN
VAN CM- EN MM-GOLVEN



UITGEVERIJ WALTMAN - HIPPOLYTUSBUURT 4 - DELFT

OPWEKKEN EN VERSTERKEN VAN CM- EN MM-GOLVEN

REDE

UITGESPROKEN BIJ DE AANVAARDING
VAN HET AMBT VAN BUITENGEWOON
HOGLERAAR IN DE ELEKTROTECHNIEK
AAN DE TECHNISCHE HOGESCHOOL TE
DELFT, OP WOENSDAG 14 FEBRUARI 1962

DOOR

IR TH. I. SPRENGER, S.M.



UITGEVERIJ WALTMAN - HIPPOLYTUSBUURT 4 - DELFT

*Mijne Heren Curatoren,
Mijne Heren Leden van de Senaat,
Dames en Heren Lectoren, Docenten en Leden van de Wetenschappelijke staf,
Leden van de Technische en Administratieve Staf,
Dames en Heren Studenten,
en voorts Gij allen, die door Uw aanwezigheid blijk geeft van
Uw belangstelling,*

Zeer gewaardeerde toehoorders,

Er zijn inderdaad weinig takken van de techniek die een zo snelle evolutie hebben vertoond als de elektronica. Immers, welk een verscheidenheid van elektronenbuizen kennen wij in onze dagen, ongeveer een halve eeuw na de eerste toepassing van zo'n element. En hoe uiteenlopend is de aard van de functies, waarvoor zij werden ontworpen. Het huidige terrein van hun toepassingen is zo uitgestrekt, dat de enkeling het ternauwernood kan beheersen. Nog moge steeds de telecommunicatie hierin een dominerende positie innemen, er zijn anderzijds weinig gebieden van de natuurwetenschappen en de techniek waarin elektronische hulpmiddelen niet hun intrede hebben gedaan en hun nut niet veelvoudig hebben bewezen. Zo kon in sommige gevallen met deze middelen een arbeidsproces worden gemechaniseerd, in andere gevallen een onderzoek worden verdiept of versneld.

Doch het vorenstaande zou ten onrechte de indruk kunnen wekken, dat de elektronica in hoofdtrekken zou mogen worden afgebakend als het terrein van de elektronenbuizen en hun toepassingen. Dit beeld, dat wellicht een tiental jaren geleden nog juist was, is inmiddels achterhaald door de groeiende importantie van halfgeleiders als schakelementen, versterkers en omvormers, die niet alleen nieuwe taken kunnen uitoefenen, doch reeds in vele functies elektronenbuizen kunnen vervangen. De verwachting is zelfs gerechtvaardigd dat op den duur het zwaartepunt van dit vakgebied bij deze elementen zal komen

te liggen, daar zij bepaalde, doorslaggevende, voordelen bieden, zoals langere levensduur en kleiner energieverbruik, alsmede het groeiende kostprijnsvoordeel. Dit neemt echter niet weg, dat er op korte termijn zeker nog vele functies zijn waarvoor, om technische of economische redenen, de voorkeur wordt gegeven aan elektronenbuizen. Ook zijn er functies die door halfgeleiders nog niet kunnen worden vervuld. Stelt men bijvoorbeeld een hoog vermogensniveau of een zeer geringe traagheid als eis, dan zal hieraan in het huidige stadium met een halfgeleider moeilijk kunnen worden voldaan. Het wekt dan ook geen verbazing dat in dergelijke gevallen nog overwegend elektronenbuizen worden gebruikt. Dergelijke gevallen, waarin sprake is van extreem korte schakeltijden, vormen hedenmiddag het onderwerp van mijn betoog, namelijk: het opwekken en versterken van elektromagnetische golven met golflengten in de orde van centimeters en millimeters.

Het ligt niet in mijn bedoeling om U deze hoofdschotel zonder verdere inleiding voor te zetten. Integendeel, vooraf zou ik U een hors d'oeuvre willen offeren, waarvan de ingrediënten zijn ontleend aan de fascinerende historie van de radiotechniek. Ik vlei mij met de gedachte dat zulk een inleiding voor de meesten onder U enige interessante aspecten biedt. Daarnevens geeft deze benadering toegang tot enkele begrippen en gedachten die van belang zijn voor een beschouwing van het eigenlijke onderwerp.

Elektronenbuizen zijn voor het eerst toegepast in het begin van deze eeuw, toen bleek dat deze elementen konden worden benut voor het verbeteren van de radiocommunicatie, een medium waarvoor de tijd rond de eeuwwisseling rijp was. Er bestond in die jaren een behoefte aan uitgebreider en sneller inlichtingenverkeer, terwijl anderzijds de techniek voldoende was gevorderd om de radiocommunicatie gestalte te kunnen geven. Remmende factoren, zoals politieke en vooral sociale weerstanden en vooroordelen, zijn van weinig invloed geweest. De eerste stoomboot, die in 1707 werd gebouwd door DENIS PAPIN, zag niet onder zulke profijtelijke omstandigheden het licht. Woedende zeelieden, die zich in hun bestaan bedreigd zagen, vernielden deze uitvinding bij de eerste proefvaart. Een soortgelijk lot trof in 1760 een machinale zaagmolen in handen

van een groep Engelse zagers. In het begin van de negentiende eeuw verkreeg de Amerikaan HEATHCOTE een octrooi op een stoomploeg, doch gemotoriseerde ploegen vonden pas ongeveer een eeuw later algemeen ingang.

Het lijkt geen twijfel dat ook MARCONI niet is ontkomen aan gebrek aan begrip en aanmoediging in Italië gedurende de periode, toen hij aldaar zijn eerste proefnemingen verrichtte met de „draadloze” telegrafie. De potentiële draagwijdte van zijn uitvinding werd echter wel ingezien in Engeland, vermoedelijk ingegeven door de wens in het „Empire” snelle verbindingen tot stand te brengen, alsmede door het baanbrekende, voorafgaande werk van SIR OLIVER LODGE. Het wekt dan ook geen verbazing dat MARCONI zijn experimenten enige jaren later voortzette in Engeland, waar van 1896 af een tijdperk van vruchtbare samenwerking volgt met WILLIAM PREECE, hoofd-ingenieur bij de Britse Postdienst, die door zijn inspirerende vertolking van deze proeven velen wist te overtuigen van het belang van het nieuwe communicatiemiddel. De grote triomf van MARCONI en zijn medewerkers kwam in 1901, toen het gelukte een morseteken, de letter S, over een afstand van ongeveer 3500 km tussen Poldhu en New Foundland over te zenden. Dit evenement wekte enorme sensatie en grote bewondering in de gehele wereld en kan wellicht worden beschouwd als het begin van de grote vlucht, die de radiocommunicatie heeft genomen.

Omstreeks deze tijd wordt MARCONI bijgestaan door SIR AMBROSE FLEMMING, die in 1904 voor het eerst een elektronenbuis, de diode, benut voor het detecteren van radiosignalen. Dan wordt slechts enige jaren later een zeer grote stap vooruit gedaan, als de individualistische experimentator en uitvinder LEE DE FOREST, in zijn onderzoek naar een gevoelige detector, in de diode een rooster plaatst tussen de katode en de anode en aantoonde, dat het regelen van de elektronenstroom door de elektrische spanning van dit rooster benut kan worden om langs zuiver elektrische weg te versterken. Dit Audion, later triode genoemd, gaf de radiocommunicatie het hulpmiddel van een gevoelige detector, een elektrische versterker en tenslotte ook een efficiënte omvormer voor het opwekken van trillingen met een hoog trillingsgetal. Omstreeks 1913 werd er namelijk door verscheidene onderzoekers praktische uitvoering gegeven aan

de principiële mogelijkheid om deze versterker te benutten las generator, door het ingangs-wisselvermogen te ontlenen aan het uitgangsvermogen.

Het lijkt mij gewenst – in verband met de komende beschouwingen – om er reeds thans op te wijzen, dat het regelen van de stroom in de triode in wezen berust op een beïnvloeding van de elektronenconcentratie in de onmiddellijke nabijheid van hun bron: de katode. Het is een directe dichtheidsregeling. Op dit principe berust ook het mechanisme van de later ontwikkelde buizen met meer roosters die, naar gelang van het aantal elektroden, worden aangeduid als tetrode, pentode, hexode, etc.

Er is echter ook een andere strategie mogelijk. Een periodieke dichtheidsverandering kan ook ontstaan uit een groeperings-effect. Dit doet zich bijvoorbeeld voor, indien op een willekeurige plaats in een evenwijdige bundel elektronen, een periodieke snelheidwijziging wordt geïnduceerd. Volgen wij de elektronen op hun weg dan blijkt dat de snellere elektronen de eerder vertrokken langzamere elektronen gaan inhalen, waarbij zich de dichtheid wijzigt. Dit groeperingseffect is reeds in de tweede helft van de dertiger jaren door verscheidene onderzoekers benut voor het opwekken en versterken van signalen met korte trillingstijd. Zij schiepen het klystron, ook wel inhaalbuis genoemd.

Het gemak en de mogelijkheden van de elektrische communicatiemiddelen heeft de mens vanzelfsprekend ook aangewend voor de oorlogvoering, waarin het vestigen en onderhouden van goede verbindingen immer van essentieel belang is geweest. De mechanisatie van de militaire berichtgeving verving de arbeid van de ordonnans en de koerier ten dele door effectievere middelen, zoals de telegraaf, de telefoon en de radioverbinding. Doch in deze gevallen is er nog steeds uitsluitend sprake van de overdracht van het in elektrische vorm omgezette geschreven en gesproken woord; het lijkt een logische verwachting dat deze rij met de overdracht van lichtindrukken zal worden aangevuld. Overdag het zichtbare licht, 's nachts het infrarode licht. Zo zal het toekomstbeeld van de commandopost wellicht een reminiscentie opwekken aan de contrôlekamer van een televisiestudio, een ruimte waarin een aantal monitors is opgesteld, die een beeld vertonen van verschillende sectoren van het slagveld.

Velen zijn de overtuiging toegedaan dat in de moderne technische oorlog, meer nog dan de beschikbare mankracht, het vermogen om nieuwe wapenen uit te vinden, te ontwikkelen en te fabriceren, van doorslaggevende invloed zal zijn op het wel of niet behalen van de overwinning. In overeenstemming hiermede worden in onze dagen in verscheidene landen grote sommen belastinggeld uitgegeven aan wetenschappelijk onderzoek, dat direct of zijdelings van belang kan zijn voor de oorlogvoering.

Het is zeker betreurenswaardig, dat een verbetering van de strijdmiddelen het motief moet zijn voor deze uitgaven. Ook is het triest, dat de geheimhouding dikwijls leidt tot het dupliceren van een onderzoek in verschillende landen, mede omdat de onderzoekers onvoldoende gelegenheid wordt gegeven hun buitenlandse collegae op de hoogte te stellen van hun vorderingen. Doch het staat vast, dat vele ontwikkelingen voor militaire doeleinden achteraf van groot wetenschappelijk, technisch en commercieel belang zijn gebleken. Dit geldt zeker voor een aantal nieuwe technieken die, vrij van beperkende economische factoren, tijdens de tweede wereldoorlog in een versneld tempo werden ontwikkeld ten behoeve van de radar. Radar is in wezen een elektronisch systeem dat de mens in staat stelt objecten waar te nemen onder omstandigheden, waarin een optische bewapening van het oog zijn effectiviteit verliest, bijvoorbeeld doordat het licht is verstrooid, zoals in de mist, of door het ontbreken van bronnen, zoals in de nacht. Dat een optisch niet doorzichtig medium als de mist geen beletsel vormt voor de radarwaarneming is te verklaren uit het feit, dat in dit systeem gebruik wordt gemaakt van elektromagnetische golven, wier golflengten die van het zichtbaar licht in vele orden van grootte overtreffen. Anderzijds heeft dit eveneens tot consequentie, dat het scheidend vermogen van radar inferieur is vergeleken met dat van optische waarnemingen. Het is alleen mogelijk tamelijk grote objecten op te merken, terwijl vrijwel de gehele detailstructuur van de voorwerpen aan de waarnemer ontgaat.

In de beginperiode van de ontwikkeling van radar – omstreeks 1935 – was het vooral Engeland, dat de nadruk legde op de opsporing *vanuit* vliegtuigen. De proefnemingen hiermede toonden allengs de wenselijkheid aan van het gebruik van decimeter-

of nog kortere golven, wier straling scherp gebundeld zou kunnen worden met reflectoren van betrekkelijk kleine afmetingen. Bij deze kleine golflengten was het echter niet mogelijk het vereiste vermogensniveau te bereiken met de conventionele triode, of de hiervan afgeleide meerroosterbuizen. Enige oorzaken hiervan mogen wij in het volgende nader toelichten.

Het verschuiven van het werkgebied van een elektronenbuis naar kleinere golflengten vereist in principe het verkleinen van de essentiële afmetingen in evenredigheid met de golflengte. Zo men afziet van circuitverliezen en van de invloed van thermische snelheden, laat het zich in theorie aantonen dat het af te geven vermogen hierbij ongewijzigd blijft. Het is echter evident, dat om tal van praktische redenen een voortgezette verkleining met minder vermogen gepaard zal moeten gaan. Zo zal de thermische belastbaarheid van kleine elektroden een grens stellen aan het af te geven vermogen. Ook wordt de stroom begrensd door het oppervlak van de katode, daar de emissie hiermede evenredig is. Bovendien zal bij kleinere golflengten, tengevolge van de grotere circuitverliezen, een geringer deel van het opgewekte vermogen voor nuttig gebruik beschikbaar komen.

Het vorenstaande impliceert, dat men voor het opwekken van grote vermogens bij zeer kleine golflengten dient uit te gaan van elektronenbuizen, wier afmetingen voor een gegeven golflengte zo groot mogelijk zijn. In dit opzicht valt een onderlinge vergelijking niet gunstig voor de triode uit. Een van de oorzaken hiervan is te vinden in het feit dat de sturing of regeling van de elektronenstroom plaats heeft in de onmiddellijke nabijheid van de katode, waar de elektronensnelheden klein zijn. Indien namelijk de looptijd van de elektronen vergelijkbaar wordt met de trillingstijd van het stuursignaal, neemt de versterking af, waardoor het duidelijk wordt dat zeer kleine afstanden tussen de elektroden onontbeerlijk zijn voor het bedrijf bij kleine golflengte. Doch dit legt eveneens een begrenzing op aan de oppervlakten van de elektroden, daar ook een kleine capaciteit tussen de elektroden een essentiële voorwaarde is voor zulk een bedrijf.

De beperkingen die looptijdeffecten opleggen aan het gedrag van de triode werden reeds in de dertiger jaren onderkend en deden verscheidene onderzoekers uitzien naar systemen waarin

looptijdeffecten geen nadelige gevolgen zouden hebben, of zelfs zouden kunnen worden benut. Hun creatieve arbeid vond gestalte in het klystron en het magnetron. En de velen, die later dit werk voortzetten, breidden deze rij uit tot de grote verscheidenheid van microgolfbuizen, waarvoor ik aanstonds Uw aandacht zou willen vragen.

Vooreerst acht ik het wenselijk microgolven nader te definiëren als radiogolven met een golflengte kleiner dan ongeveer 30 cm, overeenkomende met een trillingstijd van 1/1000 microseconde. Deze, in de literatuur ingeburgerde grens, vormt een ruwe scheidingslijn tussen twee gebieden van de radiotechniek.

Aan één zijde ligt het gebied van de lange trillingstijden, waar de afmetingen van de systemen in het algemeen zeer klein zijn, vergeleken met de golflengte. Hier kan de elektrotechnicus zijn elektronische circuits opbouwen met in massa gefabriceerde bouwelementen, zoals bijvoorbeeld weerstanden, condensatoren, elektronenbuizen en transistoren. Zijn creativiteit en vindingrijkheid komen tot uitdrukking in de aard van de functies die hij met combinaties van deze elementen weet te concretiseren en in de eenvoud van het ontwerp.

Aan de andere zijde van de scheidingslijn ligt het gebied van de korte trillingstijden, waar de systemen afmetingen aannemen in de orde van grootte van de golflengte. De circuits evolueren hier tot afgeschermden ruimten, waarin zich elektromagnetische velden voortplanten. De afgestemde kringen nemen de vorm aan van trillholten of resonatoren. In elektronenbuizen voor dit golflengtegebied is er een interactie tussen een elektronenstroming in vacuüm en wisselende en constante velden van elektrische en magnetische aard.

In de verschijningsvormen van deze microgolfbuizen zijn naar analogie van eigenschappen in hoofdzaak twee groepen te onderscheiden.

Eén groep wordt gevormd door de buizen waarin de statische velden van magnetische aard geen essentiële functie vervullen in het mechanisme. Zo zij aanwezig zijn, hebben deze velden uitsluitend de taak de elektronenstroming te bundelen en bijeen te houden. De elektronenbanen zijn veelal over een groot traject ten naaste bij rechtlijnig. Globaal geldt voor deze groep dat het de *kinetische* energie van de elektronen is, die omgezet wordt in hoogfrequente energie.

Het mechanisme van de buizen van de tweede groep berust onder meer op het feit dat een elektron, tijdens zijn beweging in de interactieruimte, wordt onderworpen aan de afbuigende kracht van een statisch magnetisch veld. Hierdoor zijn de elektronenbanen gekromd. In sommige gevallen vertonen zij een grote overeenkomst met de cycloïdale banen die beschreven worden door punten van een wiel dat over een plat of een cilindrisch vlak rolt. De nuttige energie wordt hier opgewekt ten koste van potentiële energie van de elektronen, hetgeen resulteert in een hoog rendement.

Beschouwen wij thans, na deze algemene klassificatie, meer in het bijzonder enige voorbeelden. Tot de tweede groep behoort de *trilholte*-magnetronoscillator, in 1939 uitgevonden door RANDAL en BOOT. Deze uitvinding gaf Engeland en later ook Amerika – op grond van een uitwisselingsverdrag – de ontbrekende schakel voor de verwezenlijking van microgolfradar, namelijk: de elektronenbuis die trillingen van groot vermogen met golflengten in de orde van decimeters en centimeters kon opwekken. Velen beschouwen dit magnetron als het belangrijkste enkelvoudige bouwelement van de radar, dat tijdens de tweede wereldoorlog werd uitgevonden. Trouwens, ook de resultaten die men in de ontwikkeling van deze buis heeft weten te boeken, dwingen respect af. In een spanne tijds van vijf jaren nam het impulsvermogen van magnetrons van een golflengte van 10 cm toe van ongeveer 10 kW tot enige megawatts. Gelijkelijk steeg het rendement van omzetting van 10% tot meer dan 50%. De omvang van deze prestatie spreekt te meer, indien men bedenkt dat op de huidige dag het mechanisme van de magnetron nog maar zeer ten dele wordt begrepen. Ofschoon er een globaal, kwalitatief, inzicht is, bestaat er geen afgeronde theorie, die voldoende antwoorden geeft, om er een ontwerp op te kunnen baseren. En aan het theoretisch onderzoek van het magnetron zijn toch waarlijk namen van groten verbonden, zoals BRILLOUIN en SLATER. Zo worden de hoofdafmetingen van een nieuw magnetron nog steeds afgeleid van een eerder gerealiseerd ontwerp, of worden zij gekozen langs de weg van verstandig giswerk, waarbij ervaring onontbeerlijk is.

Naast de oscillator kent men de laatste jaren ook verschijningsvormen van magnetronversterkers. Een type hiervan, het am-

plitron, haalt het voor microgolfbuizen zeer hoge rendement van 70%. Een voortgezet onderzoek van deze versterkers, die nog betrekkelijk nieuw zijn, zal wellicht nog veel kunnen bijdragen tot een beter inzicht in de oscillator.

Tot de eerste groep behoren de klystrons en verscheidene typen lopende-golf-buizen. Klystrons worden als vermogensversterkers onder meer benut in zenders voor de televisiebanden IV en V. In deze toepassing bedraagt het vermogensniveau een tiental kilowatts, bij een duizendvoudige versterking en een rendement van 30%. Deze versterkers zijn gigantische bouwsels, wier lengte die van de mens evenaart. Welk een contrast hiermede vormen de oscillatoren voor het opwekken van enige tientallen milliwatts vermogen bij golflengten van enkele millimeters. De voornaamste afmetingen van de elektroden variëren hier tussen enige tienden en enige honderdsten van millimeters, waarbij de reproduceerbaarheid gebiedt, dat er zeer hoge eisen worden gesteld aan de nauwkeurigheid van de bewerkingen. De kleinste golflengte, die men met dit type buizen heeft weten op te wekken, is heden 2,3 mm, en ofschoon de ontwikkeling naar kleinere golflengten zeker nog niet als afgesloten mag worden beschouwd, begint zich reeds de grens van het huidig mogelijke af te tekenen. In dit gebied van de ondergrens groeit de zwaarte van de opgave om het vermogen van de elektronenbundel in een steeds kleinere doorsnede te concentreren en voorts te voorkomen dat de temperaturen van de minuscule elektroden, die aan elektronenbombardement worden blootgesteld, te hoog oplopen. Ter illustratie van de dimensie van dit probleem zij gezegd, dat reeds in een ontwerp voor een golflengte van 2,5 mm, een vermogen van 45 Watt wordt geconcentreerd in een doorsnede van vijfduizendste mm²; een vermogensconcentratie die zich leent voor het geconcentreerd versmelten van metalen, hetgeen toepassing vindt als een van de moderne bewerkingsmethoden in de fijn-mechanische techniek.

Wij bevinden ons inderdaad in een situatie die reminiscenties opwekt aan de dertiger jaren, toen men zocht naar nieuwe systemen, waarmede het mogelijk zou zijn om coherente trillingen van zeer kleine golflengte op te wekken; systemen met grotere afmetingen voor een gegeven golflengte dan de conventionele buizen. Toen en nadien werden de microgolfbuizen ge-

concipieerd; hun grenzen zijn langzamerhand ook bereikt. Zeker, er zijn opmerkelijke resultaten verkregen met een lopende-golf-oscillator, het carcinotron, zoals een vermogen van meer dan 2 Watt bij 2 mm golflengte en een tiental milliwatts bij 0,7 mm golflengte, doch deze feiten doen in wezen geen afbreuk aan de juistheid van vorenstaande uitspraak.

Dit stelt ons onvermijdelijk voor de vraag met welke systemen voor coherente straling men wezenlijk in het gebied van de submillimetergolven zal kunnen doordringen en welke natuurverschijnselen aan deze systemen ten grondslag zullen liggen; een problematiek, waarin wij ons aanstonds nader zullen verdiepen.

Vooreerst moge ik het woord meer in het bijzonder richten tot de niet-vakgenoten onder U, die zich inmiddels zullen hebben afgevraagd, welke toepassingen men voor zulke systemen voorziet. Het ontwikkelen van een oscillator of versterker zal uiteindelijk immers geen doel op zichzelf zijn, doch slechts een middel tot een doel. Zo'n ontwikkeling kan de weg banen voor een verdere uitbreiding van onze kennis van de materie, hoe smal deze weg ook moge zijn. Mogelijk heeft men een concreet of een vermeend doel van technische aard voor ogen, of is men de overtuiging toegedaan, dat het resultaat van de ontwikkeling aanleiding zal zijn voor het ontstaan van nieuwe, nog niet voorziene, toepassingen.

Toen men na de tweede wereldoorlog het gevestigde bruggehoofd in het gebied van de cm-golven ging uitbreiden naar het domein van de mm-golven, heeft men zeker gedacht aan de grote informatiecapaciteit van communicatieverbindingen met mm-golven, ofschoon van de transmissie-eigenschappen van deze golven nog zeer weinig bekend was. Doch laat ik eerst het woord informatiecapaciteit meer inhoud geven door U te herinneren aan Uw zomervakantie, die U mogelijk hebt doorgebracht in het zonnige en levendige Italië. Indien U op weg naar deze bestemming gebruik hebt gemaakt van de Autobahn in het Ruhrgebied, dan zullen de wrakken die hier en daar op de middenberm waren gedeponeerd, U er aan hebben herinnerd dat, naarmate de verkeersstroom op een weg toeneemt, de kans dat men „onvervormd” op de plaats van bestemming komt, afneemt. Is het nu niet verleidelijk om een parallel te trekken tussen enerzijds de verkeersstroom en de capaciteit van een

verkeersverbinding en anderzijds de inlichtingenstroom en de informatiecapaciteit van een communicatieverbinding, hoe onvolstrekt die overeenkomst bij nadere analyse ook blijkt te zijn? Vast staat evenwel, dat voor beide typen verbindingen geldt, dat de capaciteit afhankelijk is van de breedte. In het bijzonder geldt voor de communicatieverbinding, dat de informatiecapaciteit evenredig is met de breedte van de frequentieband.

Een aantrekkelijk aspect van het domein van de millimetergolven is nu, dat het voor mogelijk wordt gehouden om in de toekomst met betrekkelijk geringe inspanning zeer „brede” verbindingen met golven van deze golflengten tot stand te brengen. Dit hangt samen met het feit, dat voor de informatiecapaciteit van een verbinding de *absolute* breedte van de frequentieband maatgevend is, terwijl de problemen, die samenhangen met de overdracht en de versterking, in het algemeen eenvoudiger zijn naarmate de *relatieve* bandbreedte kleiner is. In dit opzicht is het dus gunstig om voor radio-communicatieverbindingen gebruik te maken van zeer korte golven en dus zeer hoge frequenties. Ter illustratie moge ik wijzen op het feit, dat een relatieve bandbreedte van 10% bij een golflengte van 1 mm een frequentiespectrum vertegenwoordigt, dat uitgebreider is dan het gehele spectrum dat thans benut wordt voor communicatieverbindingen en voor radar. Verbindingen in het gebied van de langere mm-golven, met een capaciteit van 150.000 telefoniekkanalen of 150 televisiekkanalen zijn niet ver meer af van realisatie.

In verscheidene universiteits- en industriële laboratoria wordt gezocht naar oplossingen voor de problemen die de concretisering van deze communicatieverbindingen thans nog in de weg staan. Daarbij richt het onderzoek zich zowel op de wijze van transmissie – in casu transmissie in de vrije ruimte tussen antennes met een sterke gerichtheid of transmissie langs golfgeleiders – alsook op de wijze van het opwekken en versterken van de signalen. Over de wijze van transmissie zou ik willen opmerken, dat overdracht door middel van een smalle stralenbundel in de vrije ruimte reeds thans vrij algemeen toepassing vindt in het gebied van de centimeter- en decimetergolven. Ik denk hierbij met name aan de zogenaamde straalverbindingen, die bijvoorbeeld de schakels vormen van het Eurovisienet. Stille getuigen van hun aanwezigheid zijn in ons land de be-

tonnen radio- en televisietorens, die mede aan dit doel dienstbaar zijn gemaakt.

In een beoordeling van de mogelijkheden van straalverbindingen met mm-golven dient in overweging te worden genomen, dat mm-golven, anders dan golven van grotere golflengten, geabsorbeerd worden door de moleculen, aanwezig in de atmosfeer. Van de mate van absorptie is bekend, dat deze afhangt van de golflengte, van de weersgesteldheid en van de hoogte. In ongunstige gevallen kan over een afstand van 1 km 99% van het door een antenne uitgestraalde vermogen verloren gaan.

Reeds jaren wordt in de fysica de gasabsorptie van mm-golven bestudeerd met het doel hieruit gegevens te vergaren omtrent de bouw van moleculen en atomen. Uit een oogpunt van transmissietechniek is het verschijnsel te betreuren, aangezien het de mogelijkheden van straalverbindingen beperkt tot korte trajecten of bijzondere toepassingen, waarbij de absorptie kan worden benut.

De tweede wijze van transmissie, namelijk transmissie langs golfgeleiders, biedt meer perspectief voor lange afstand-verbindingen. Absorptieverliezen kunnen hierbij worden vermeden, aangezien men de ruimte binnen het gesloten metalen oppervlak van de golfgeleider kan evacueren, of vullen met een gas, dat in het gebruikte golflengtegebied geen absorptielijnen heeft. Hier staat tegenover, dat golfgeleiders elektrische verliezen bezitten. Het wordt echter voor mogelijk gehouden om deze verliezen door middel van speciale technieken zodanig te beperken, dat over een afstand van 1 km slechts 40% van het „ingestralde” vermogen verloren gaat. Vooral de laatste jaren hebben medewerkers van de Bell-laboratoria opmerkelijke resultaten geboekt bij deze ontwikkeling.

Zeer gewaardeerde toehoorders,

Staat U mij toe, om na de voorgaande beschouwing over een enkele toepassing van millimetergolven, thans terug te komen op de vraag, welke energiebronnen wij mogen verwachten in het domein van de sub-millimetergolven. In dit verband zij vooropgesteld dat ik zeker niet de pretentie wil hebben de toekomst te kunnen aflezen uit een kristallen bol.

Eerder stelden wij ons deze vraag, na te hebben geconstateerd, dat de grenzen van de microgolfbuizen in zicht zijn, doch dat de ontwikkeling naar kleinere golflengten zeker nog niet als afgesloten is te beschouwen. Het laatste impliceert dat het werkelijk-haaltbare nog niet is bereikt en dat er van een voortgezette ontwikkeling nog resultaten zijn te verwachten. Doch het valt toch wel te betwijfelen of het mogelijk zal blijken, met het meest geschikte type onder deze buizen enige milliwatts continu vermogen op te wekken bij een golflengte kleiner dan $\frac{1}{4}$ millimeter.

Wij moeten echter bij het binnendringen van het sub-millimetergebied ons er niet toe beperken, zulks te doen vanuit de langgolvlige zijde van het elektromagnetische spectrum, waar bronnen worden gebruikt, wier mechanisme berust op een wisselwerking tussen een elektronenstroming en elektromagnetische velden. Ook de mogelijkheden, die wellicht worden geboden door de bronnen van het licht – de elektromagnetische straling van veel kleinere golflengten – dienen te worden onderzocht. Doch dan zal deze straling hetzelfde karakter moeten bezitten als de straling, die opgewekt wordt door de elektronische bronnen, d.w.z. monochromatisch en coherent. Een enkele, continue golf dus, met een hoge graad van fase-stabiliteit. De optische bronnen zijn gewoonlijk incoherent; zij bestaan uit een groot aantal oscillatoren, die onafhankelijk van elkaar trillen. Zoals bekend, is het echter onlangs gelukt *coherent* licht op te wekken, met de optische „maser”, of „laser”. Welnu, ik waag het de veronderstelling uit te spreken, dat men er in de toekomst in zal slagen om ook coherente straling, met een golflengte in de orde van grootte van 0,1 mm, op te wekken met zulk een bron, die is gebaseerd op het verschijnsel van de gestimuleerde emissie.

Aan het einde van mijn toespraak gekomen, past het mij Hare Majesteit de Koningin eerbiedig dank te zeggen voor Haar besluit mij te benoemen tot buitengewoon hoogleraar aan deze Technische Hogeschool.

Mijne Heren Curatoren,

Ik ben U zeer erkentelijk dat U mij hebt voorgedragen voor deze benoeming, hetgeen ik beschouw als een blijk van ver-

trouwen. Naar beste vermogen zal ik trachten dit vertrouwen waardig te tonen en de mij opgedragen taak met volledige toewijding uit te oefenen.

Mijne Heren leden van de Senaat,

Ik beschouw het als een groot voorrecht in Uw kring te worden opgenomen.

Mijne Heren leden van de Afdeling der Elektrotechniek,

Het is mij bekend dat het initiatief voor mijn benoeming van Uw college is uitgegaan. Dat U mij waardig hebt gekeurd in Uw midden mede te mogen werken aan de opleiding van elektrotechnische ingenieurs, stel ik op hoge prijs.

De omstandigheden hebben ertoe geleid, dat ik reeds enige tijd aan Uw werk heb mogen deelnemen, zij het op zeer bescheiden schaal. Het is mij daarbij opgevallen op welk een vriendschappelijke wijze U mij tegemoet bent getreden. Ik hoop dat ik ook in de toekomst mag blijven rekenen op Uw gewaardeerde raad en steun. U kunt er anderzijds zeker van zijn dat ik van mijn kant mijn uiterste best zal doen om op den duur ook U van dienst te kunnen zijn.

Hooggeleerde Casimir,

Mijne Heren Directeuren van het Natuurkundig Laboratorium van de N.V. Philips' Gloeilampenfabrieken,

Ik heb het zeer op prijs gesteld dat U er zonder aarzeling in hebt toegestemd dat ik een deel van mijn arbeid besteed aan het onderwijs aan deze Technische Hogeschool; ik zeg U hiervoor van harte dank. Ik ben mij er wel van bewust dat de omgang met collegae en de aard van het werk dat ik op Uw laboratorium heb moge verrichten, veel hebben bijgedragen tot mijn vorming. U moge mij veroorloven dit te beschouwen als een van de resultaten van Uw streven, de samenwerking in teamverband te bevorderen, met behoud van een zo groot mogelijke mate van vrijheid voor de individuele onderzoeker.

Dames en Heren Studenten,

Het spreekt vanzelf dat ik slechts kan gissen naar de redenen die U hebben bewogen tot de keuze van een studie die U voorbereidt op een werkring in de techniek. Wellicht hebt U zich laten leiden door Uw belangstelling voor de techniek en de exacte wetenschappen, waarbij U zich realiseerde dat de technische beroepen in het algemeen redelijk gehonoreerd worden.

Voordat U zich liet inschrijven aan deze Technische Hogeschool hebt U zich vermoedelijk niet afgevraagd welke eisen de kille maatschappij stelt aan een ingenieur. De belangstelling hiervoor groeit meestal eerst tijdens de studie. Ik hoop hedenmiddag erin geslaagd te zijn U een idee te geven van het tempo waarin een vakgebied van de techniek kan evolueren. Mocht U zich ontwikkelen tot een ingenieur, die zijn werk slechts baseert op de recepten uit een handboek, dan zult U zich zeker niet kunnen aanpassen aan dit tempo; laat staan iets kunnen bijdragen tot de vooruitgang. U zult niet alleen moeten beschikken over een uitgebreide vakkennis, maar vooral over vermogen om kritisch te denken, opdat U in de problemen waarmee U geconfronteerd zult worden, de hoofdzaken weet te onderkennen.

Het zal mij een grote voldoening geven indien ik door mijn contacten met U iets zal kunnen bijdragen tot deze beide aspecten van Uw opleiding.

Ik dank U allen voor Uw aandacht.