

Jaargang 42

Nummer 11/12

Maart 1986

PHILIPS TECHNISCH TIJDSCHRIFT

PHILAN

'Harmonika'-sensor

Nikkel-hydridecel

Diëlektrische resonatoren



PHILIPS

Philips Technisch Tijdschrift (ISSN 0165-5965) wordt uitgegeven door het Philips Natuurkundig Laboratorium, Eindhoven, en is gewijd aan de onderzoeken, werkwijzen en produkten van laboratoria en fabrieken, behorende tot of samenwerkende met ondernemingen van het Philips-concern. In de artikelen worden hiermee samenhangende technische problemen met hun fysische of chemische achtergrond behandeld. Het tijdschrift richt zich bij de behandeling van de zeer uiteenlopende onderwerpen zowel tot de specialist alsook tot de algemeen technisch of fysisch geschoolde maar niet in het onderwerp gespecialiseerde lezer.

Philips Technisch Tijdschrift wordt uitgegeven in een Nederlandse en een Engelse editie. Beide edities hebben dezelfde inhoud. Twaalf nummers van ongeveer 32 bladzijden vormen een jaargang, die wordt afgesloten met een register. Bovendien verschijnen er verzamelregisters over perioden van 10 jaargangen (het laatste is opgenomen in jaargang 40, 1981/82).

Redactie	Dr. J. W. Broer
	Dipl.-Phys. R. Dockhorn, hoofdredacteur
	Dr. E. Fischmann
	Dr. J. L. Sommerdijk
	Ir. N. A. M. Verhoeckx
	Dr. M. H. Vincken
Redactie-assistenten	Ir. F. Zuurveen
	Ing. P. Post
	T. M. B. Schoenmakers
Engelse editie	D. A. E. Roberts, B.Sc., M.Inst.P., A.I.L.

© N.V. Philips' Gloeilampenfabrieken, Eindhoven, 1986.

Overnemen van artikelen of gedeelten daarvan is toegestaan, mits de bron voluit wordt vermeld. De redactie zal het op prijs stellen een bewijs-exemplaar te ontvangen. Voor het overnemen kunnen foto's en tekeningen beschikbaar worden gesteld.

Inhoud

PHILAN, een glasvezelnetwerk voor bedrijfscommunicatie	329
J. R. Brandsma	
<i>Eén glasvezel is voldoende voor het gecombineerd verzenden van signalen van totaal verschillende herkomst zoals telefoon, computer en bewakingstelevisie</i>	
De 'harmonika'-sensor, een nieuwe vaste-stofbeeldopnemer	341
A. J. P. Theuwissen en C. H. L. Weijtens	
<i>Een vernuftige manier van transport van de beeldinformatie maakt een grotere dichtheid van beeldelementen mogelijk</i>	
Philips Technisch Tijdschrift 50 jaar geleden	349
Onderzoek naar een nieuw type herlaadbare batterij, de nikkel-hydridecel	350
J. J. G. Willems	
<i>Via de zuil van Volta en de nikkel-cadmiumcel en via reversibel te absorberen waterstof op weg naar een nieuwe accu</i>	
Diëlektrische resonatoren voor geïntegreerde microgolfoscillatoren	364
G. Lütke en D. Hennings	
<i>Kleine resonatoren, gemaakt van keramiek naar 'maat', vervangen omvangrijke trilhouten</i>	
Wetenschappelijke publikaties	377

PHILAN, een glasvezelnetwerk voor bedrijfscommunicatie

J. R. Brandsma

Informatie is een van de belangrijkste hulpbronnen van onze moderne samenleving. De kwaliteit van het maatschappelijk, bestuurlijk en economisch functioneren wordt immers in sterke mate bepaald door het al dan niet beschikbaar zijn van actuele, betrouwbare en voldoende informatie op de juiste plaats en op het juiste moment. Daarvoor zijn goede communicatiemiddelen vereist, die zijn afgestemd op de situatie waarin ze gebruikt worden. Een specifieke situatie doet zich voor in fabrieken en kantoren, waar grote aantallen mensen intensief samenwerken. Daar is op een duidelijk geografisch begrensd gebied behoefte aan een gemakkelijke uitwisseling van veel informatie van allerlei soort en volgens een dikwijls wisselend communicatiepatroon. Men maakt voor deze bedrijfscommunicatie steeds vaker gebruik van een zogenaamd 'local-area network' of LAN. In het Projectencentrum van het Philips Natuurkundig Laboratorium in Geldrop is een nieuw en veelzijdig concept voor een LAN op basis van glasvezels ontwikkeld en uitgewerkt tot een proefopstelling voor demonstratiedoeleinden. In onderstaand artikel worden de belangrijkste aspecten van dit type netwerk, aangeduid als PHILAN, beschreven.

Inleiding

Slechts weinig mensen zouden serieus overwegen om een auto aan te schaffen, als de bijbehorende infrastructuur in de vorm van onder meer wegen en verkeersregels niet voorhanden was. Zonder die voorzieningen komen immers de vele mogelijkheden van dit technische hulpmiddel — op zijn zachtst gezegd — niet helemaal tot hun recht.

Een vergelijkbare situatie vinden we op het gebied van de informatie-technologie. De plaats van de auto wordt dan ingenomen door één van de vele soorten informatieverwerkende apparaten en de vereiste infrastructuur bestaat dan uit een communicatienetwerk met bijbehorende gebruiksregels ('protocollen'). In deze situatie is het immers weinig zinvol om grote hoeveelheden gegevens ('data') op één bepaalde plaats op te slaan of zeer snel te verwerken, als ze vervolgens niet eveneens snel en met hoge betrouwbaarheid naar elke daarvoor in aanmerking komende bestemming verstuurd zouden kunnen worden. Vooral in situaties waarin veel mensen intensief met elkaar moeten samenwerken of van dezelfde informatie gebruik moe-

ten maken, zoals in kantoren, fabrieken, ziekenhuizen en universiteiten, is er behoefte aan speciale communicatievoorzieningen. Deze moeten voldoen aan de volgende eisen.

- **Veelzijdigheid:** vele verschillende soorten informatie moeten naast elkaar overgedragen kunnen worden (telefoongesprekken, telex, elektronische post, communicatie met computers en tussen computers onderling, bewakingssignalen zoals 'slow-scan TV', röntgenopnamen enz., enz.).
- **Universaliteit:** aansluitingen moeten zo universeel mogelijk zijn, dat wil zeggen dat op elk aansluitpunt zo veel mogelijk soorten informatie ontvangen en uitgezonden moeten kunnen worden (mits de juiste eindapparatuur aanwezig is).
- **Flexibiliteit:** aangesloten apparatuur moet gemakkelijk verplaatst kunnen worden zonder dat ingrijpende wijzigingen (zoals herbekabeling) nodig zijn.
- **Aanpasbaarheid:** wijziging van de soorten overgebrachte informatie en uitbreiding van het aantal aansluitingen moeten eenvoudig te realiseren zijn.

In het verleden heeft men in deze problematiek vaak zijn toevlucht genomen tot ad-hoc-oplossingen, die niet zelden geleid hebben tot een weinig overzichtelijke

Ir. J. R. Brandsma, medewerker van het Philips Natuurkundig Laboratorium, Eindhoven. In het Projectencentrum Geldrop is aan het project PHILAN gewerkt door een groep medewerkers die tot voor kort onder leiding stond van de auteur.

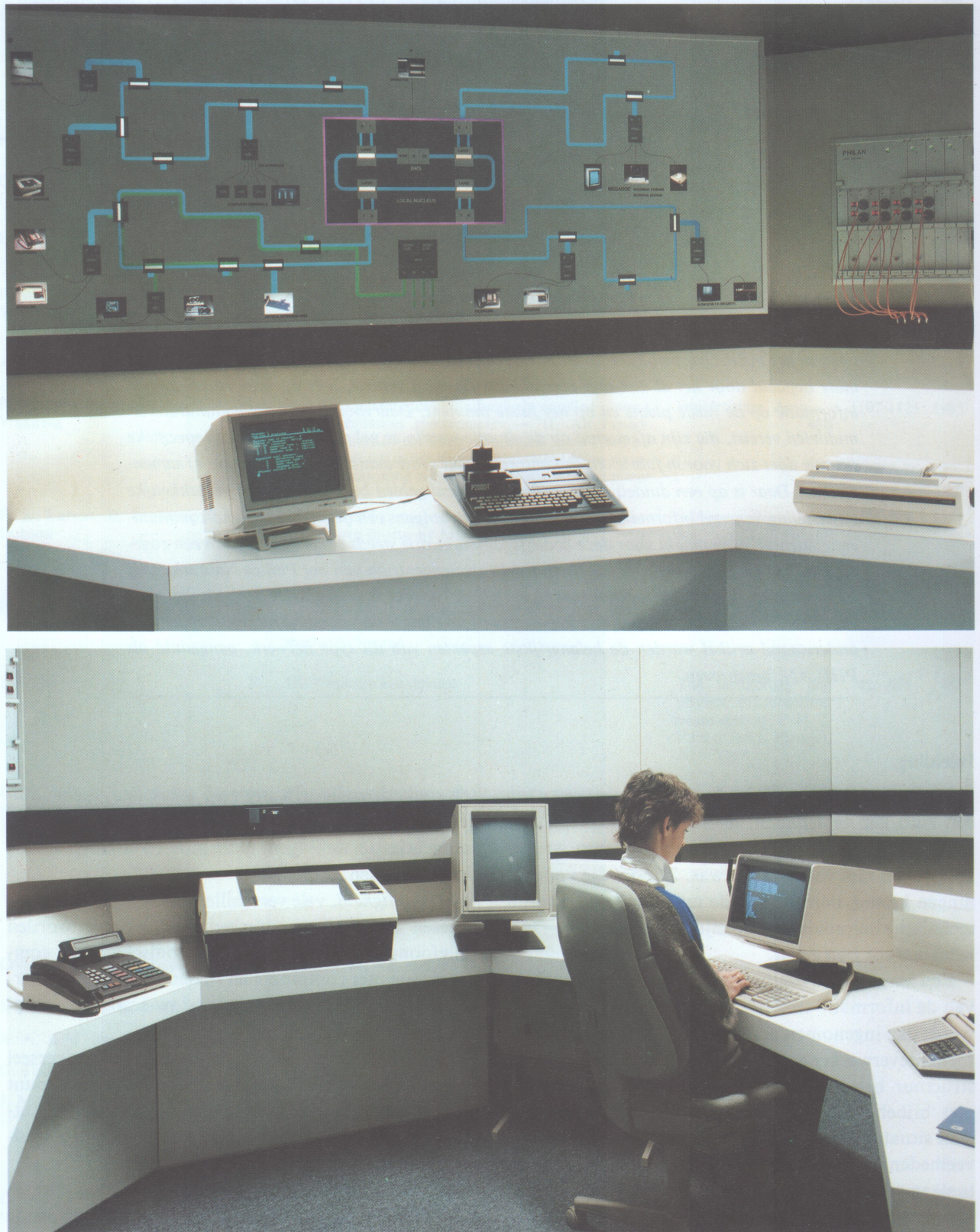


Fig. 1. In het Projectcentrum van het Philips Natuurkundig Laboratorium is voor demonstratiedoeleinden een proefopstelling gemaakt van een netwerk voor bedrijfscommunicatie ('Local Area Network') volgens het PHILAN-concept. De apparatuur die op de bovenste foto staat afgebeeld vormt de centrale eenheid, van waaruit het beheer over het netwerk plaatsvindt. Daarboven, op een groot bord, is een schema van de volledige proefopstelling weergegeven om de precieze werking van het netwerk te kunnen

verduidelijken. Elders in de proefopstelling (onderste foto) wordt een groot aantal toepassingsmogelijkheden getoond. Van links naar rechts ziet men onder andere een geavanceerd telefoontoestel, een afdrummachine, een beeldscherm dat speciaal geschikt is voor het weergeven van documenten, een tekstverwerker en een intercomtoestel. De signalen van al deze apparaten worden aan- en afgevoerd via hetzelfde transmissiemedium: één enkele glasvezel.

combinatie van allerlei communicatienetwerken met verschillende typen kabels, netwerkstructuren, stop-contacten enz. Het liefst wil men eigenlijk alle bovenstaande wensen vervullen door middel van één communicatienetwerk dat men aanduidt ^[1] als 'local-area network (LAN)' of, wanneer men speciaal de nadruk wil leggen op de grote verscheidenheid van de over te brengen informatie, als 'integrated local-area network (ILAN)'. Door het lokale karakter van deze LANs hoeft men tijdens het ontwerp daarvan in principe weinig rekening te houden met reeds bestaande (meestal voor de lange afstand bestemde) communicatienetwerken. Daarom heeft men een grote mate van vrijheid bij de keuze van bij voorbeeld de netwerkstructuur, het transmissiemedium en het type signaal dat gebruikt wordt.

In dit artikel willen wij een beschrijving geven van PHILAN, een onlangs bij Philips ontwikkeld uiterst modern ILAN ^[2], waarvan voor demonstratiedoel-einden een proefopstelling is gemaakt (*fig. 1*). Het daarin gebruikte netwerk heeft een 'meanderachtige' ringstructuur, waarin glasvezelkabel wordt toegepast. De informatie (o.a. spraak, bepaalde videosignalen en allerlei soorten data) wordt in digitale vorm getransporteerd met een transmissiesnelheid van ongeveer 20 Mbit/s en een foutenkans die kleiner is dan $1:10^{10}$.

Eerst zullen we ons bezig houden met de belangrijkste overwegingen die een rol gespeeld hebben bij het ontwerp van PHILAN, zoals de verschillende eisen die gelden voor het transport van diverse soorten informatie en de mogelijke alternatieven die er bestaan voor de netwerkstructuur. Daarna zullen we beschrijven hoe de samenstelling ('rasterstructuur') van de digitale signalen is en hoe de afhandeling van het verkeer tussen de aangesloten volgens bepaalde protocollen plaatsvindt. Tot slot zullen we dieper ingaan op een aantal bouwstenen waaruit PHILAN bestaat, zoals het ringbesturingssysteem ('ring management system'), de ringtoegangseenheden ('ring access units') en een klein, vernuftig optisch relais.

Bedrijfscommunicatie

De verschillende soorten informatie die men in een bedrijfscommunicatienetwerk wil verzenden, kan men in twee grote groepen onderscheiden: doorlopende (continue) informatie en met tussenpozen verschijnende (intermitterende) informatie. De eerste soort vinden we bij voorbeeld bij telefoon- en videocommunicatie en bij communicatie ten behoeve van beveiliging en bewaking. De andere soort treffen we aan bij dataverwerking, elektronische archivering en in vergelijkbare gevallen van communicatie tussen een (reken)machine enerzijds en de mens anderzijds.

Continue informatie vereist een verbinding die permanent beschikbaar is en hoogstens een kleine, constante, vertraging vertegenwoordigt. Traditioneel realiseert men dat door middel van *circuitschakelen* ('circuit switching') waarbij — althans schijnbaar — voortdurend een verbinding bestaat tussen informatiebron en bestemming. Intermitterende informatie kan men het beste verzenden via een verbinding die tot stand komt via *pakkettschakelen* ('packet switching'), dat wil zeggen dat de verbinding telkens voor het overdragen van een bepaalde, duidelijk begrensde hoeveelheid ('pakket') informatie tot stand wordt gebracht. Elk pakket wordt daarbij afzonderlijk geadresseerd, overgestuurd en ontvangen. Lange boodschappen worden gesplitst in meer pakketten. In een modern bedrijfscommunicatienetwerk is het voor het verkrijgen van maximale doelmatigheid uiterst zinvol om beide soorten informatieoverdracht te combineren ^[3].

Men kan dit bij voorbeeld bereiken door eerst alle informatie om te zetten in digitale vorm, dus in bitstromen. Deze afzonderlijke bitstromen kunnen door middel van tijdmultiplex ('time division multiplex' of TDM) gecombineerd worden tot één totale bitstroom met een (veel) hogere bitsnelheid, die verzonden kan worden via één gemeenschappelijke informatiedrager (b.v. een glasvezel) waarop alle belanghebbenden zijn aangesloten. De gecombineerde bitstroom vertegenwoordigt dus een heleboel zich gelijktijdig afspelende communicatieprocessen; de circuitgeschakelde verbindingen beschikken elk over een strikt periodiek terugkerend stukje van de gecombineerde bitstroom (b.v. 8000 keer per seconde een stukje van 8 opeenvolgende bits) en het pakketgeschakelde verkeer krijgt naar behoefte gedeelten van de resterende bitposities toegewezen. Wij zullen hierop later nog uitvoerig terugkomen.

Een belangrijk uiterlijk kenmerk van elk communicatienetwerk is de netwerkstructuur of topologie ^{[4][5]}. In *fig. 2* zijn vier verschillende basisstructuren geschetst: ster, bus, boom en ring. In principe kunnen

[1] W. A. M. Snijders, Bedrijfscommunicatie en glasvezel, een symbiose, I & I (Inf. & Informatiebeleid), nr. 7, 20-30, 1984; D. D. Clark, K. T. Pograd en D. P. Reed, An introduction to local area networks, Proc. IEEE 66, 1497-1517, 1978.

[2] J. R. Brandsma, PHILAN: a fiber-optic ring for integrated traffic, verschijnt in: Proc. GLOBECOM '85, New Orleans, LA, 1985; Werkwijze voor het overdragen van digitale informatie over een transmissiering, Nederlandse octrooiaanvraag nr. 8300033, 6 januari 1983 (uitvinders: J. R. Brandsma, A. M. L. Bruckers en J. L. W. Kessels).

[3] Speciaal voor bedrijfscommunicatienetwerken waarin deze combinatie plaatsvindt, gebruikt men de — al eerder genoemde — term 'integrated local-area network (ILAN)'.

[4] C. D. Tsao, A local area network architecture overview, IEEE Commun. Mag. 22, nr. 8, 7-11, 1984.

[5] D. Hutchison, J. A. Mariani en W. D. Shepherd (red.), Local area networks: an advanced course (Proceedings, Glasgow 1983), Lect. Notes Comput. Sci., Vol. 184, Springer, Berlijn 1985.

we steeds onderscheid maken tussen de centrale eenheid, vanwaaruit de besturing en het beheer plaatsvinden, de aangesloten stations, die fungeren als bron of bestemming van informatie, en de eigenlijke transmissiewegen.

Elke netwerkstructuur kent een eigen manier van verkeersafhandeling tussen de stations en bij elke structuur verschilt ook de rol van de centrale eenheid. Bij een busstructuur is het zelfs gebruikelijk om de besturing zó te decentraliseren dat er geen afzonderlijke centrale eenheid nodig is. Zowel bij een sterstructuur als een boomstructuur loopt alle informatie vanaf de bron via de centrale eenheid naar de bestemming. In de ringstructuur loopt de informatie rond van station naar station. Als een station zelf geen informatie te verzenden heeft, wordt de binnenkomende informatie ongewijzigd doorgezonden naar het volgende station. Als alle stations dat doen, dan ontstaat er — via de centrale eenheid — een 'circulerend geheugen', waarvan de capaciteit afhangt van de totale vertraging die optreedt in de stations en de transmissiewegen en (natuurlijk) van de bitsnelheid.

Een tweede belangrijk uiterlijk kenmerk van een communicatienetwerk is het gebruikte transmissiemedium. Voor een LAN komen drie soorten media in aanmerking: getwiste aderpennen, coaxiale kabel en glasvezelkabel. Getwiste aderpennen zijn goedkoop en gemakkelijk aan te sluiten. Coaxiale kabel heeft een grotere transmissiecapaciteit en is populair vanwege het grote aantal reeds bestaande andersoortige toepassingen (zoals kabel-TV); mede daardoor is een grote variëteit aan accessoires beschikbaar. Glasvezelkabel biedt de grootste transmissiecapaciteit, weinig signaalverzwakking en de unieke eigenschappen van volledige elektrische isolatie en ongevoeligheid voor elektromagnetische storingen.

In het vervolg van dit artikel willen we onze aandacht speciaal richten op de ringstructuur waarbij de signalen in digitale vorm (kortweg: data) met behulp van tijdmultiplex worden overgestuurd. In fig. 3 zijn de globale blokschema's getekend van de centrale eenheid en een station uit zo'n ring. Beide bevatten een ontvanger en een zender. De minimale bewerking die plaatsvindt, is het opnieuw en ongewijzigd uitzenden van de ontvangen informatie. Het station beschikt echter ook over een ringtoegangseenheid ('ring-access unit' of RAU), waarmee data van de ring gelezen of juist erop geschreven kunnen worden. De centrale eenheid bestuurt en bewaakt de goede werking van de ring; zij bepaalt onder meer de bitsnelheid en speelt een rol bij het toewijzen van transmissiecapaciteit aan de stations.

Uit het voorgaande zijn twee potentiële nadelen van de ringstructuur af te leiden. Op de eerste plaats is een

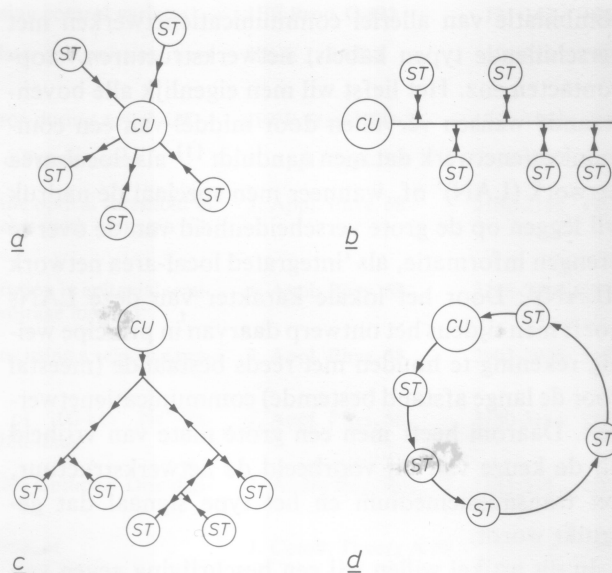


Fig. 2. Vier elementaire netwerkstructuren. a) Ster. b) Bus. c) Boom. d) Ring. CU centrale eenheid. ST aansluitingseenheid ofwel station.

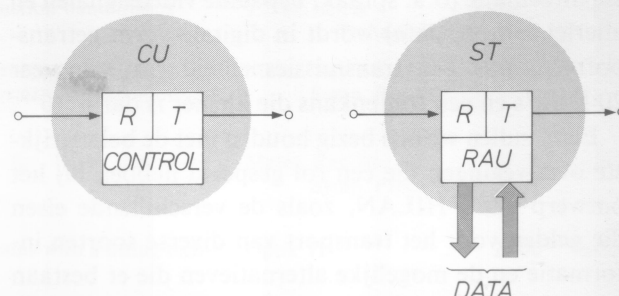


Fig. 3. Globale blokschema's van de centrale eenheid CU en een station ST uit een netwerk met ringstructuur. In beide schema's is het ontvangerdeel R en het zenderdeel T te herkennen. Bij de CU vinden ten behoeve van besturing en beheer een aantal bewerkingen plaats in het gedeelte CONTROL. Het station bevat een ringtoegangseenheid RAU, die zorgt voor de uitwisseling van data tussen de ring en de buitenwereld.

ringstructuur relatief kwetsbaar doordat één defect station of één gebroken kabel de hele ring buiten werking kan stellen. Daarnaast levert het herhaald ontvangen en opnieuw uitzenden van data in de vorm van een bitstream een geleidelijk toenemende onnauwkeurigheid van de bitposities ('jitter') op, die uiteindelijk kan leiden tot transmissiefouten. Het is daarom nodig om in de centrale eenheid bijtijds de oorspronkelijke, nauwkeurige tijndeling te herstellen. Dit beperkt het maximale aantal stations dat de ring kan bevatten. Beide nadelen kunnen ondervangen worden door segmentering van de ring. Dit is in PHILAN toegepast en heeft geleid tot een gewijzigde ringstructuur, die wij aanduiden als meandering.

PHILAN

Voor het PHILAN-systeem is een netwerkstructuur gekozen die in wezen overeenkomt met een ring, maar waarbij steeds delen van de ring ('meanders') kunnen worden afgesneden als daar aanleiding toe is. Dit gebeurt in een speciale eenheid die we aanduiden als meanderpoort ('meander gate' of MG; zie tabel I voor een overzicht van afkortingen die we veel zullen gebruiken). Elke meander bevat een beperkt aantal stations die volgens de gebruikelijke ringstructuur met elkaar zijn verbonden (fig. 4). In de meanders wordt gebruik gemaakt van glasvezelkabel als transmissiemedium. De centrale eenheid en de meanderpoorten vormen samen met hun onderlinge verbindingen de lokale kern ('local nucleus') van PHILAN. Deze bevindt zich op één plaats geconcentreerd; vanwege de korte afstanden worden in de lokale kern uitsluitend elektrische verbindingen gebruikt.

In elke meanderpoort wordt het signaal dat naar de volgende meanderpoort verstuurd wordt, met behulp van één storingsvrij kloksignaal (afkomstig van de centrale eenheid) samengesteld. Op die manier wordt eventuele jitter die in een meander ontstaan is, geëlimineerd en kunnen in principe willekeurig veel meanders aangesloten worden.

Een meer gedetailleerd blokschema van een meander is getekend in fig. 5 (deze figuur correspondeert met het deel A-A' in fig. 4). Het totale digitale signaal dat op een bepaald moment in het PHILAN-systeem optreedt, komt (in elektrische vorm) aan bij de ingang van de meanderpoort. Tijdens normaal bedrijf wordt hieruit in de zender een optisch equivalent gevormd, dat de meander op gestuurd wordt. Op elke mogelijke positie in de meander waar een station moet kunnen

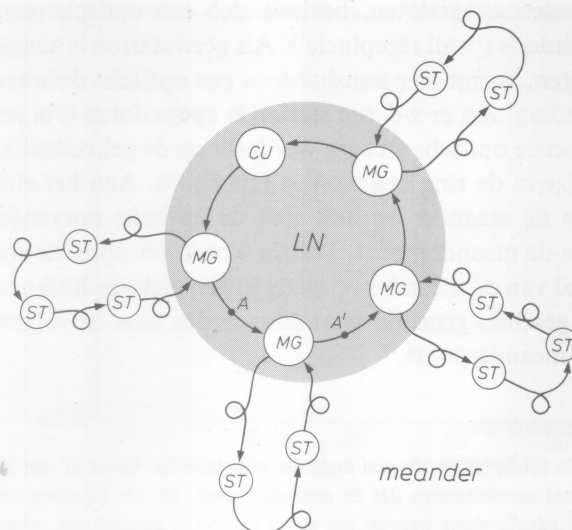


Fig. 4. De meanderingstructuur van PHILAN. Naast de centrale eenheid CU en de stations ST die in elke ringstructuur voorkomen, bevat de PHILAN-ring een aantal meanderpoorten MG. Deze verdelen de ring in stukken, meanders genaamd, die elk een aantal stations bevatten. De CU, de MG's en de tussenliggende verbindingen vormen de lokale kern LN (grijs). In de meanders wordt gebruik gemaakt van glasvezelkabel (aangeduid met $\text{---}\circ\text{---}$), in de lokale kern van elektrische verbindingen.

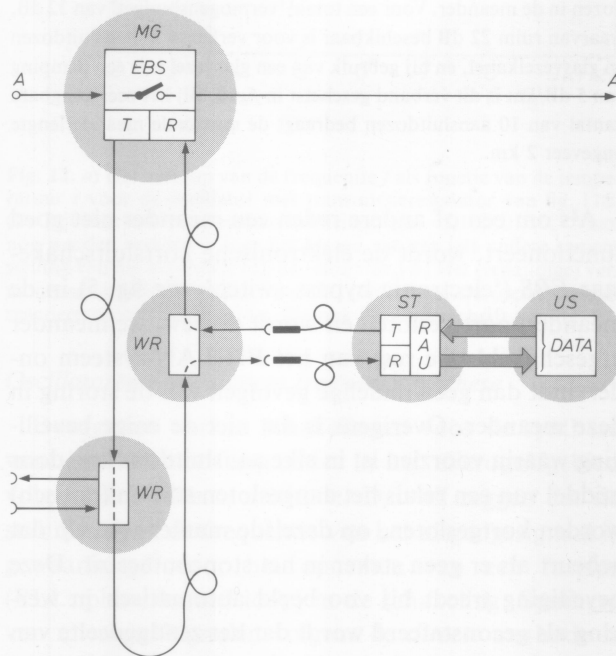


Fig. 5. Principeschema van een PHILAN-meander. De meanderpoort MG vormt de verbinding tussen de eigenlijke meander en de rest van het netwerk. Deze verbinding vindt plaats via de optische zender T en de optische ontvanger R. Verder bevat MG een elektronische kortsluitschakelaar EBS, waarmee de meander 'afgesneden' kan worden. In de glasvezelkabel van de meander is op een aantal vaste plaatsen een aansluitdoos WR geplaatst. Een gebruikers-toestel US kan via een station ST en een stekker op WR worden aangesloten. Als de stekker ontbreekt, vormt WR een (optische) doorverbinding. ST bevat dezelfde optische ontvanger/zender-combinatie R/T als MG. Via een elektrische verbinding is US gekoppeld aan de ringtoegangseenheid RAU van ST.

Tabel I. Overzicht van afkortingen gebruikt voor onderdelen van PHILAN.

	betekenis	omschrijving
CRAU	Circuit RAU	RAU voor circuitgeschakeld verkeer
CU	Central Unit	centrale eenheid
EBS	Electronic Bypass Switch	elektronische kortsluitschakelaar
LN	Local Nucleus	lokale kern
MG	Meander Gate	meanderpoort
PRAU	Packet RAU	RAU voor pakketgeschakeld verkeer
RAU	Ring Access Unit	ringtoegangseenheid
R/T	Receiver/Transmitter	ontvanger/zender-combinatie
ST	STation	aansluitpunt, station
US	USer	gebruikerstoestel
WR	Wall Receptacle	aansluitdoos
WS	Wall Socket	stopcontact

worden aangesloten, bevindt zich een optische aansluitdoos ('wall receptacle'). Als geen station is aangesloten, vormt elke aansluitdoos een optische doorverbinding. Als er wel een station is aangesloten (via een speciale optische stekker), wordt dit op de gebruikelijke wijze in de ring opgenomen (zie fig. 3). Aan het eind van de meander bevindt zich de optische ontvanger van de meanderpoort. Daarin wordt het optische signaal van de meander omgezet in een elektrisch signaal en geschikt gemaakt voor doorzenden naar de volgende meanderpoort.

Meanderlengte

De totale lengte die een meander mag hebben, hangt af van het aantal aansluitdozen dat de meander bevat. Bij het passeren van elke aansluitdoos waarop een *actief* station is aangesloten, wordt het rondgaande digitale PHILAN-sigitaal geregenereerd ('ververst') voordat het wordt doorgezonden; alle eerder opgetreden signaalverzwakking wordt dus teniet gedaan. Een ongunstiger situatie bestaat voor elke aansluitdoos waarop *geen actief* station is aangesloten. Daar doorloopt het signaal rechtstreeks de aansluitdoos, hetgeen gepaard gaat met een nominale verzwakking van 1,3 dB. De meest ongunstige situatie ontstaat nu als alle stations passief zijn, behalve één van de twee die het dichtst bij de meanderpoort liggen. De totale demping die in de meander voorkomt is dan maximaal. Bij een gegeven maximale demping is er een rechtstreeks verband af te leiden tussen maximale meanderlengte en het aantal aansluitdozen in de meander. Voor een totaal 'vermogensbudget' van 32 dB, waarvan ruim 22 dB beschikbaar is voor verliezen in aansluitdozen en glasvezelkabel, en bij gebruik van een glasvezel met een demping van 5 dB/km is dit verband geschetst in fig. 6. Bij het zeer gangbare aantal van 10 aansluitdozen bedraagt de maximale meanderlengte ongeveer 2 km.

Als om een of andere reden een meander niet goed functioneert, wordt de elektronische kortsluitschakelaar *EBS* ('electronic bypass switch', zie fig. 5) in de meanderpoort gesloten en wordt de bewuste meander afgeschakeld. De rest van het PHILAN-systeem ondervindt dan geen nadelige gevolgen van de storing in deze meander. Overigens is dat niet de enige beveiliging waarin voorzien is; in elke aansluitdoos kan door middel van een relais het aangesloten station (optisch) worden kortgesloten, op dezelfde manier waarop dat gebeurt als er geen stekker in het stopcontact zit. Deze beveiliging treedt bij voorbeeld automatisch in werking als geconstateerd wordt dat het zendgedeelte van een station geen optische signalen uitzendt. Als laatste beveiliging is er ook nog de mogelijkheid om in een station een (elektrische) doorverbinding tussen de uitgang van de ontvanger en de ingang van de zender te bewerkstelligen. Deze mogelijkheid speelt overigens ook een belangrijke rol bij het lokaliseren van fouten ('foutendiagnose').

Tijdens het ontwerpen van PHILAN heeft de betrouwbaarheid steeds centraal gestaan. Niet alleen wat netwerkstructuur en apparatuur betreft, maar ook wat

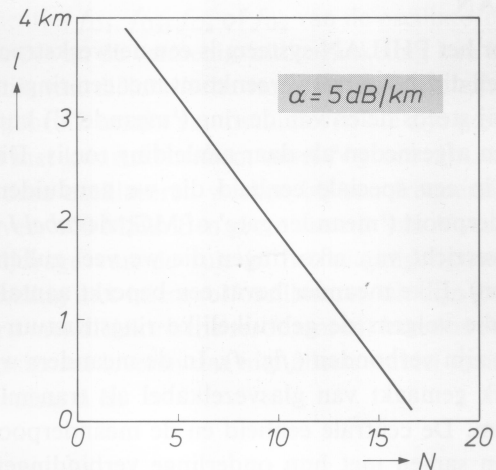


Fig. 6. Per aansluitpunt moet rekening worden gehouden met een zekere verzwakking van het signaal dat de ring doorloopt. In PHILAN geldt het hier weergegeven verband tussen het aantal aansluitpunten N per meander en de maximale meanderlengte l (bij gebruik van een glasvezelkabel met een demping van 5 dB/km en bij een maximaal toelaatbare demping in aansluitdozen en glasvezel samen van ruim 22 dB).

gebruikte signalen en protocollen betreft, is gestreefd naar het verschaffen van *veilige communicatiediensten* ('safe-communication services'). Daaronder verstaan we dat een gebruiker op een bepaald moment ervan verzekerd kan zijn dat zijn boodschap foutloos op de juiste bestemming is aangekomen, zonder dat hij daartoe zelf extra maatregelen behoeft te nemen. Om dit nader te kunnen toelichten gaan we nu in op de signaalstructuur die in PHILAN gebruikt wordt.

De signaalstructuur: rasters en subringen

Het signaaltransport in PHILAN vindt plaats in de vorm van een continue reeks bits die met een snelheid van 20,48 Mbit/s achtereenvolgens alle aangesloten stations doorloopt. Elke groep van 2560 opeenvolgende bits is op dezelfde manier georganiseerd en wordt een raster ('frame') genoemd. Een raster correspondeert met 125 μ s. In de centrale eenheid wordt ervoor gezorgd dat de signaalvertraging die hoort bij één volledige rondgang door de ring altijd gelijk is aan een geheel aantal rasters. Daardoor blijven op elk punt in de ring de rasters met vaste regelmaat verschijnen.

De eerste 16 bits van een raster vormen steeds een speciaal en onveranderlijk synchronisatiewoord ('preamble'), waardoor alle onderdelen van het PHILAN-systeem met elkaar gesynchroniseerd kunnen blijven en precies weten wanneer een nieuw raster begint. De overige bits van het raster horen in groepjes van acht bits ('bytes') bij elkaar. Door uit alle opeenvolgende rasters de bits van een bepaalde byte aaneen te voegen ontstaat een transmissiekanaal ('subring') met een capaciteit van $8/(125 \times 10^{-6}) = 64$ kbit/s. Evenzo

levert een combinatie van N bytes een subring van $N \times 64$ kbit/s (fig. 7). De bits in één bepaald raster die tot dezelfde subring behoren, vormen samen een veld ('field'); de grootte van een veld kan variëren van 1 tot 64 byte (dus van 8 tot 512 bit).

Tussen het synchronisatiewoord en de velden die de subringen vormen, zitten in elk raster nog 6 bytes met een speciale functie. Die worden namelijk gebruikt voor de onderlinge communicatie tussen de onderdelen van de centrale kern (CU en MGs) of tussen de onderdelen van een bepaalde meander (MG en STs). In dit artikel gaan wij niet verder daarop in.

Communicatie binnen PHILAN vindt plaats doordat in de zender van een station de bits van een bepaalde subring worden ingeschreven en in de ontvanger van een (ander) station worden uitgelezen. Inschrijven en uitlezen kan eventueel in een station ook tegelijkertijd gebeuren; we spreken dan van een 'swap' (letterlijk: ruil of wissel) ^[6]. In de stations worden de van de ring komende en voor de ring bestemde bits opgeslagen in buffers, die als het ware een scheiding vormen tussen de snelle (20 Mbit/s) transmissie op de ring en de daaraan voorafgaande of de daarop volgende verwerking. Verwerkingssnelheid en transmissiesnelheid zijn daardoor onafhankelijk van elkaar geworden. Dit heeft onder meer als voordeel dat er geen bewerkingen op transmissiesnelheid ('on the fly') hoeven te worden uitgevoerd.

Via het mechanisme van de subringen vindt alle communicatie plaats: zowel de eigenlijke informatie-overdracht bij pakketgeschakeld of circuitgeschakeld

verkeer als alle bijkomende informatie-overdracht over bijvoorbeeld herkomst en bestemming en over het functioneren van het hele netwerk. We kunnen daarbij drie soorten subringen onderscheiden: verkeerssubringen, geheugensubringen en invoegsubringen. Elke subring is volkomen onafhankelijk; wat op een bepaalde subring gebeurt, heeft geen enkele invloed op de overige subringen.

Verkeerssubringen

Zoals de naam al suggereert, vindt het eigenlijke verkeer in PHILAN plaats via de verkeerssubringen, die te zamen ongeveer 90% van de totale ringcapaciteit vertegenwoordigen.

Bij circuitgeschakeld verkeer wordt een subring met de gewenste capaciteit van $N \times 64$ kbit/s beschikbaar gesteld voor de totale duur van een 'gesprek', die in principe ook onbegrensd kan zijn. Zelfs bij tweerichtingsverkeer ('full-duplex') tussen twee stations is hier toch maar één subring nodig, als beide stations gebruik maken van de ruilbewerking.

Bij pakketgeschakeld verkeer wordt een subring voor het transport van één pakket (maximaal 8 kbyte) beschikbaar gesteld. Deze subring beslaat per raster een veld van 1, 4, 16 of 64 byte; op basis hiervan kan men vier categorieën kanalen onderscheiden met een capaciteit van respectievelijk 64, 256, 1024 en 4096 kbit/s. Vanwege de beperkte afmetingen van de velden zal een pakket in het algemeen verdeeld zijn over meer dan één raster. Boodschappen die langer zijn dan het langst mogelijke pakket worden op hun beurt weer over een aantal pakketten verdeeld.

Verkeerssubringen zullen we in het vervolg ook wel kortweg aanduiden als 'kanalen'.

Geheugensubringen

Geheugensubringen fungeren als een 'circulerend geheugen' voor een aantal systeemgegevens die voor alle aangesloten stations van belang kunnen zijn. Zij worden bijvoorbeeld gebruikt om een kanaal voor een bepaalde tijd aan een bepaald station toe te kennen voor het verzenden van een pakket data. Dat gaat in principe op de volgende manier. Door de 'kanaalbeheerder' (een onderdeel van de centrale eenheid) wordt per raster, zolang de voorraad strekt, steeds het nummer van een vrij kanaal in een veld van de geheugensubring geplaatst. Elk aangesloten station mag dit nummer door middel van de ruilbewerking vervangen door nul en daarmee beslag leggen op het bewuste kanaal. De kanaalbeheerder voert ook voortdurend

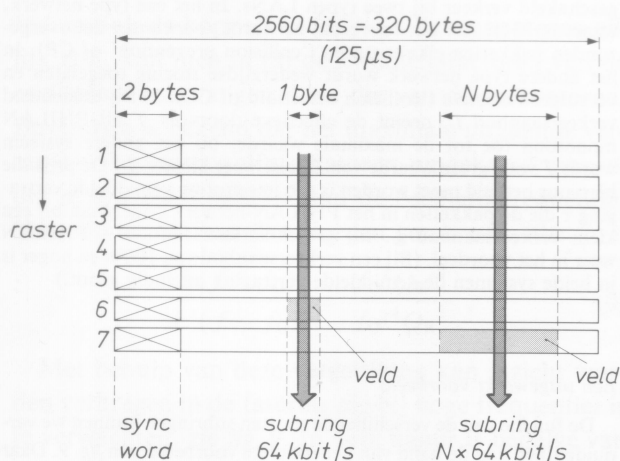


Fig. 7. Rasterstructuur van het digitale signaal dat in de PHILAN-ring gebruikt wordt. Elke 2560 opeenvolgende bits vormen één raster bestaande uit 320 bytes van elk 8 bits. De eerste twee bytes vormen een onveranderlijk synchronisatiewoord ('sync word'). Door de bits uit één bepaalde byte van elk raster aaneen te voegen ontstaat een transmissiekanaal ('subring') met een capaciteit van 64 kbit/s. Door N bytes samen te nemen verkrijgt men een subring van $N \times 64$ kbit/s. Het aandeel van elke subring in een bepaald raster noemen we een 'veld'.

^[6] Door alleen uitlezen wordt het signaal dat op de ring rondloopt, niet gewijzigd; dat gebeurt pas als er op bepaalde bitposities nieuwe informatie wordt ingeschreven (eventueel als onderdeel van de ruilbewerking).

de ruilbewerking uit op de geheugensubring en merkt door het ontvangen van het nummer nul wanneer het kanaal bezet wordt. Het weer vrijkomen van een kanaal wordt aan de kanaalbeheerder gemeld door het desbetreffende nummer op soortgelijke wijze via de geheugensubring terug te sturen.

De kanaalbeheerder houdt permanent een overzicht bij van de vrije kanalen. Elk van de vier categorieën kanalen voor pakketverkeer heeft een eigen geheugensubring. Afhankelijk van het feitelijke verkeersaanbod kan de kanaalbeheerder door samenvoegen of splitsen kanalen uit de ene categorie overhevelen naar een andere. De kanaalbeheerder waakt er bovendien over dat er geen kanaalnummers blijvend verloren gaan of dubbel in omloop raken als gevolg van eventuele transmissiefouten.

Invoegsubringen

In elk raster zijn tweemaal 8 bytes gereserveerd voor het vormen van twee zogenaamde invoegsubringen. Elk van beide heeft dus een transmissiecapaciteit van 512 kbit/s en wordt gebruikt om ten behoeve van het pakketverkeer informatie ('protocolberichten') uit te wisselen tussen de verschillende aangesloten stations. Over de ene invoegsubring worden protocolberichten verstuurd die dienen om een zender en een ontvanger voor de duur van het volledige transport van een boodschap aan elkaar te koppelen ('oproepberichten'). Over de andere invoegsubring worden protocolberichten uitgewisseld tijdens het eigenlijke pakketverkeer tussen eenmaal gekoppelde partners. Deze berichten dienen voor het voorkómen van verlies van pakketten als gevolg van het overlopen van geheugenbuffers bij de ontvanger ('flow control') of als gevolg van transmissiefouten ('error control').

De naam van dit type subring is afgeleid van de manier waarop hij gebruikt wordt: elk station kan een protocolbericht van 8 bytes invoegen op een veld in deze subring met behulp van de ruilbewerking. De huidige inhoud van het veld wordt daarbij in een ontvangstbuffer gelezen en vervangen door een nieuwe inhoud. De huidige inhoud kan echter een geldig bericht voor een volgend station vertegenwoordigen en mag daarom niet vernietigd worden. Hij wordt in het volgende raster opnieuw ingevoegd (weer via de ruilbewerking). Op deze manier reist elk protocolbericht het hele PHILAN-systeem door, tot het weer als een soort echo terechtkomt bij het station dat het oorspronkelijk heeft uitgezonden. Dit station verwijdt nu het bericht definitief van de ring.

De totale tijd die verstrijkt voordat een echo arriveert, hangt af van het aantal stations waarin een ruilbewerking wordt uitgevoerd, maar de maximale vertraging is wel van te voren bekend. De correcte ont-

vangst van een echo op de plaats van herkomst betekent dat de bewuste protocolboodschap alle in bedrijf zijnde stations correct heeft gepasseerd. Als daarentegen geen (correcte) echo wordt ontvangen binnen de maximale vertragingstijd, dan wordt dezelfde protocolboodschap opnieuw verstuurd. Deze werkwijze vormt de basis waarop binnen het PHILAN-systeem de juiste overdracht van informatie gegarandeerd kan worden ('safe-message service').

Een van de belangrijkste voordelen van de voor PHILAN gekozen signaalstructuur en daarbij behorende protocollen is netwerkstabiliteit: een toenemend verkeersaanbod leidt *niet* — zoals in sommige andere netwerken — tot een lagere effectieve transmissiecapaciteit, die veroorzaakt wordt doordat relatief steeds minder pakketten in één keer ongeschonden overgezonden kunnen worden (fig. 8). Daarnaast zijn er speciale maatregelen genomen om PHILAN onpartijdig ('fair') te laten functioneren, zodat geen zenders of ontvangers bevoordeeld worden bij het toewijzen van transmissiecapaciteit.

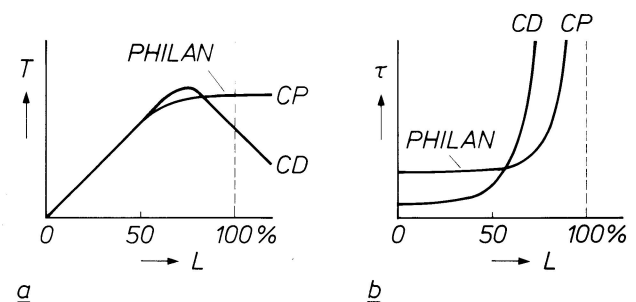


Fig. 8. Globale vergelijking van de netwerkstabiliteit voor pakket geschakeld verkeer bij twee typen LANs. In het ene type netwerk, waarvan PHILAN een voorbeeld is, wordt voorkomen dat overgezonden pakketten elkaar storen ('collision prevention' of CP). In het andere type netwerk wordt wederzijdse storing toegelaten en vervolgens hersteld ('collision detection' of CD). a) Bij toenemend verkeersaanbod L , neemt de effectieve doorvoer T bij PHILAN monotoon toe tot de maximale waarde; bij het andere systeem wordt T voor grote waarde van L juist weer kleiner. b) De prijs die hiervoor betaald moet worden is een iets grotere gemiddelde vertraging τ die de pakketten in het PHILAN-netwerk ondergaan bij een klein verkeersaanbod L . Bij groter verkeersaanbod is PHILAN weer in het voordeel. (Bij een verkeersaanbod van 100% en hoger is in beide systemen de gemiddelde vertraging oneindig groot.)

Een uitgewerkt voorbeeld

De functie van de verschillende soorten subringen kunnen we verduidelijken aan de hand van het concrete voorbeeld van fig. 9. Daar zijn twee willekeurige gebruikerstoestellen *US-A* en *US-B* geschetst, waartussen een pakketgeschakelde verbinding via de stations *ST-A*, *ST-B* en de rest van het PHILAN-systeem moet worden opgebouwd. *US-A* en *US-B* zijn via een gestandaardiseerde verbinding die bekend staat als 'VMEbus' [7], verbonden met respectievelijk *ST-A* en *ST-B*. Deze stations beschikken over een 'ring-access unit' die speciaal geschikt is voor pakketgeschakeld verkeer en die daarom wordt aangeduid als *PRAU*. Laten we aannemen dat het initia-

tief voor de verbinding uitgaat van *US-A* en dat *US-B* niet bezet is; dat betekent dat *PRAU-B* voortdurend de eerste invoegsubring, die gebruikt wordt voor het verzenden van oproepberichten, in de gaten houdt.

Op het moment dat *US-A* een verbinding wenst, stuurt hij een verzoek daartoe met inbegrip van het adres van *US-B* over de VMEbus naar *PRAU-A*. Deze plaatst een oproep voor *US-B* op de eerste invoegsubring door middel van de ruilbewerking. Deze oproep bevat tevens het adres van *US-A*. Als reactie hierop verricht *PRAU-B*

wordt de inhoud van de andere pakketbuffer van *PRAU-A* verstuurd naar één van de pakketbuffers van *PRAU-B* en wordt tevens de andere pakketbuffer van *PRAU-B* geleegd door *US-B*. Als het transport op volle snelheid loopt, worden dus op drie plaatsen in het PHILAN-systeem pakketten van dezelfde boodschap getransporteerd: één via de eigenlijke ring en twee via de VMEbussen van *A* en *B*. Op deze manier is het mogelijk om willekeurig lange boodschappen met een maximale snelheid van ongeveer 4 Mbit/s over te dragen van *A* naar *B*.

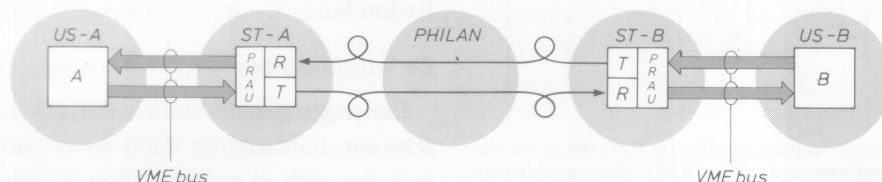


Fig. 9. Vereenvoudigde voorstelling van een pakketgeschakelde verbinding tussen de gebruikers-toestellen *US-A* en *US-B*. Tussen elk gebruikerstoestel en het bijbehorende station *ST* worden (elektrische) signalen uitgewisseld via een gestandaardiseerde verbinding, VMEbus genaamd. De stations zijn via glasvezelkabels verbonden met de rest van het — hier niet nader gespecificeerde — PHILAN-systeem. *PRAU* ringtoegangseenheid voor pakketgeschakeld verkeer. *R* optische ontvanger. *T* optische zender.

twee handelingen. Hij plaatst een oproep voor *US-A* op dezelfde invoegsubring om aan te geven dat hij bereid is om informatie te ontvangen en hij licht toestel *US-B* erover in dat er een bericht ontvangen gaat worden. Als de oproep voor *US-A* door *PRAU-A* is ontvangen, wordt *US-A* via de VMEbus verzocht om de pakketbuffer van *ST-A* te vullen met een pakket. Dat gebeurt vervolgens, waarbij *US-A* aangeeft hoe groot het pakket is en of het het laatste pakket is van deze boodschap.

Dan legt *PRAU-A* beslag op een vrije verkeerssubring (kanaal) door middel van een ruilbewerking op de geheugensubring die hoort bij de categorie met de door *PRAU-A* gekozen capaciteit. Daarna stuurt *PRAU-A* een startbericht via de tweede invoegsubring naar *PRAU-B* en geeft tegelijk informatie over het gebruikte kanaal, de grootte van het pakket en het feit of dit al of niet het laatste pakket is. Daarop schakelt *PRAU-B* voor ontvangst naar het betreffende kanaal, wacht op de komst van het pakket en schrijft het in in zijn pakketbuffer. Vervolgens plaatst *PRAU-B* via een ruilbewerking het nummer van het gebruikte kanaal in de geheugensubring om aan te geven dat het kanaal weer vrij is. Daarnaast wordt via een foutendetectieprocedure gekeken of het pakket foutloos is ontvangen, en als dat het geval is, wordt het pakket via de VMEbus aan *US-B* ter beschikking gesteld. Ten slotte wordt hiervan een bevestiging en een verzoek om het volgende pakket door *PRAU-B* aan *PRAU-A* gestuurd via de tweede invoegsubring. *PRAU-A* verzoekt dan *US-A* om het volgende pakket, legt opnieuw beslag op een vrij kanaal enz., enz. Als *PRAU-B* ontdekt dat een bepaald pakket niet foutloos is ontvangen, stuurt hij onmiddellijk een bericht via de tweede invoegsubring terug naar *PRAU-A* met het verzoek om het desbetreffende pakket nogmaals te versturen. Dat gebeurt zodra er opnieuw een vrij kanaal is gevonden. Deze hele procedure herhaalt zich net zo lang tot alle pakketten van een bepaalde boodschap foutloos van *US-A* naar *US-B* zijn gestuurd. De koppeling tussen *US-A* en *US-B* wordt opgeheven, zodra *PRAU-A* de bevestiging heeft gekregen dat *PRAU-B* het laatste pakket van de boodschap goed heeft ontvangen.

De werkelijke gang van zaken wijkt met name op één punt af van wat tot nu toe gesuggereerd is: elke *PRAU* beschikt niet over slechts één, maar over twee — gelijkaardige — pakketbuffers van elk 64 kbit. Terwijl *US-A* de ene pakketbuffer van *PRAU-A* vult,

Onderdelen van PHILAN

De stations

Zoals we al gezien hebben (fig. 5) kunnen we een station verdelen in een ontvanger/zender-combinatie *R/T* en een 'ring-access unit' *RAU*. De twee belangrijkste taken van *R/T* zijn de opto-elektrische en de elektro-optische omzettingen van de digitale signalen die in de PHILAN-ring rondlopen. Een meer gedetailleerd blokschema van *R/T* is getekend in fig. 10. Terwijl de elektrische signalen tussen *R/T* en *RAU* de vorm hebben van een simpele bitstroom (zonder codering), is voor de digitale signalen die over de glasvezels gestuurd worden om diverse transmissie-technische redenen^[8] een elementaire vorm van codering (bifase-codering^[9]) toegepast (fig. 11). De zender is daartoe voorzien van een codeerschakeling en de ontvanger

[7] Door een aantal fabrikanten op computergebied (met name Motorola, Mostek en Signetics/Philips) is een gezamenlijke standaard gedefinieerd voor verbindingen in toepassingen van 8bit-, 16bit- en 32bit-microprocessoren. Deze heet 'VMEbus', maar wordt tegenwoordig ook aangeduid als 'IEC 821 bus' of 'IEEE P1014'. De afkorting VME staat formeel voor 'Versa Module Europe', maar de volledige naam heeft nog slechts historische betekenis. Voor de verbreiding van informatie over de VMEbus bestaat een speciale organisatie VITA (VMEbus International Trade Association) met een eigen tijdschrift 'VMEbus Systems', uitgegeven door Intratech Communications, St Clair Shores, Michigan 48081, U.S.A.

[8] Een belangrijke rol spelen hierbij: het opvangen van de grote spreiding in de sterkte van het ontvangen optische signaal (ter grootte van een factor 1000), het vergemakkelijken van de klokopwekking in de ontvanger en het optimaliseren van de signaal/ruis-verhouding na ontvangst.

[9] Zie b.v. blz. 355 in het themanummer: F. W. de Vrijer, Modulatie, Philips Techn. T. 36, 313-368, 1976; zie ook: Transmissiestelsel voor de overdracht van tweewaardige datasymbolen, Nederlandse octrooiaanvraag nr. 8204856, 16 december 1982 (uitvinders: P. J. van Gerwen en W. A. M. Snijders).

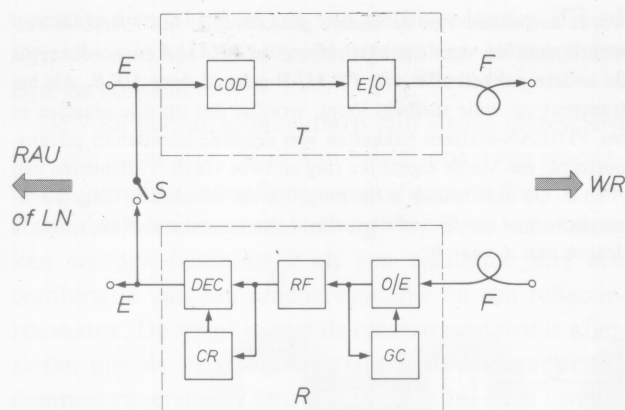


Fig. 10. Optische ontvanger/zender-combinatie R/T, die in elk station (en ook in elke meanderpoort) van het PHILAN-systeem wordt toegepast. E elektrische verbinding. F glasvezelkabel. COD bifase-codeerschakeling. E/O elektro-optische omzetter. O/E opto-elektrische omzetter voor het signaal dat van de glasvezelkabel komt. GC versterkingsregeling voor het elektrische signaal. RF ontvangfilter. DEC bifase-decodeerschakeling. CR schakeling voor klok-opwekking. S elektrische kortsluitschakelaar. WR aansluitdoos. RAU ringtoegangsseenheid. LN lokale kern.

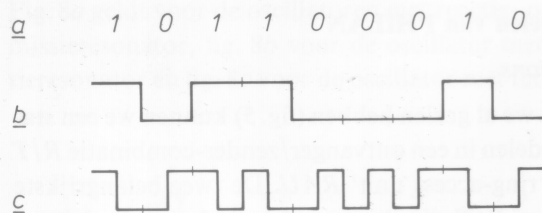


Fig. 11. a) Willekeurige bitstream bestaande uit enen en nullen. b) Hiermee overeenkomend 'ongecodeerd' binair signaal; een '1' wordt voorgesteld door een hoog niveau en een '0' door een laag niveau. c) Dezelfde bitstream na bifase-codering. Een '1' wordt nu voorgesteld door een opeenvolging van een hoog niveau en een laag niveau, een '0' door het omgekeerde. Door deze codering verkrijgt men een zendsignaal met een gunstiger frequentiespectrum en is aan de ontvangkant het benodigde kloksignaal gemakkelijker terug te winnen.

van een speciaal ontvangfilter, een kloksynchronisatieschakeling en een decodeerschakeling.

Van de 'ring-access unit' bestaan twee versies, die elk gebouwd zijn rond een standaardmicroprocessor (de '68000'): een CRAU voor circuitgeschakeld verkeer en een PRAU voor pakketgeschakeld verkeer. Een CRAU heeft aan de gebruikerskant een aansluiting (in beide richtingen) van 2,048 Mbit/s. Daarmee kan de gebruiker toegang krijgen tot 32 kanalen op de PHILAN-ring met elk een capaciteit van 64 kbit/s, of tot een of meer combinaties van een aantal van deze kanalen. Uitwisseling van signaleringsinformatie tussen een gebruiker en een CRAU vindt plaats via een zogenaamde VMEbus [7].

De VMEbus wordt ook gebruikt bij de PRAU om zowel de eigenlijke pakketten als de daarmee verband houdende berichten tussen gebruiker en station uit

te wisselen. Zoals we reeds gezien hebben, kunnen pakketten over de PHILAN-ring met verschillende snelheden verzonden worden, die variëren van 64 tot 4096 kbit/s. De maximale pakketlengte is steeds 64 kbit (8 kbyte); langere boodschappen moeten in meer dan één pakket verdeeld worden. Elke PRAU beschikt ook over de benodigde apparatuur om ná ontvangst foutendetectie op elk pakket mogelijk te maken. Dit gebeurt met behulp van een zogenaamde CRC (Cyclic Redundancy Code) [10].

De aansluitdozen

Een eigen plaats binnen PHILAN nemen de optische aansluitdozen in. Hun eerste taak is het mogelijk te maken om op eenvoudige en betrouwbare wijze het aantal aansluitingen van PHILAN te wijzigen. Daarnaast moeten ze een optische 'kortsluiting' kunnen vormen en, ondanks de hoge mechanische eisen die dat met zich mee brengt, moeten ze betaalbaar zijn. De oplossing hiervoor is gevonden in het gebruik van een speciaal ontwikkeld optisch relais waarmee glasvezelkabels geschakeld kunnen worden. Het principe-

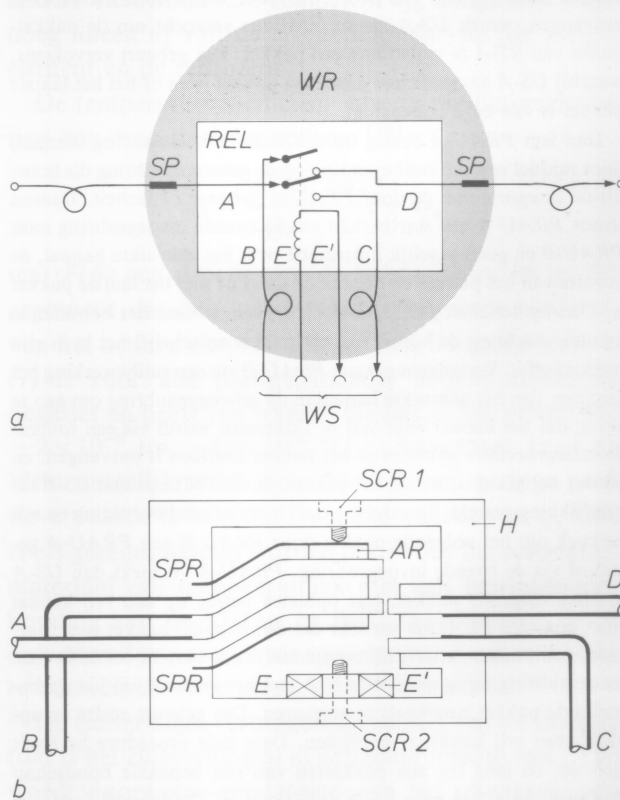


Fig. 12. a) Principeschema van de aansluitdoos WR. Met twee optische lussen SP is WR vast opgenomen in de meander. Via een stopcontact WS, dat twee optische en twee elektrische contacten bevat, kan een station ST worden aangesloten. Het hart van WR bestaat uit een relais REL, waarmee twee optische wisselcontacten worden bestuurd. b) Doorsnede door het relais REL. A, B, C, D glasvezels. SPR bladveren. E-E' aansluitingen van de relaispoel. SCR1, SCR2 instelschroeven. AR anker. H behuizing [11].

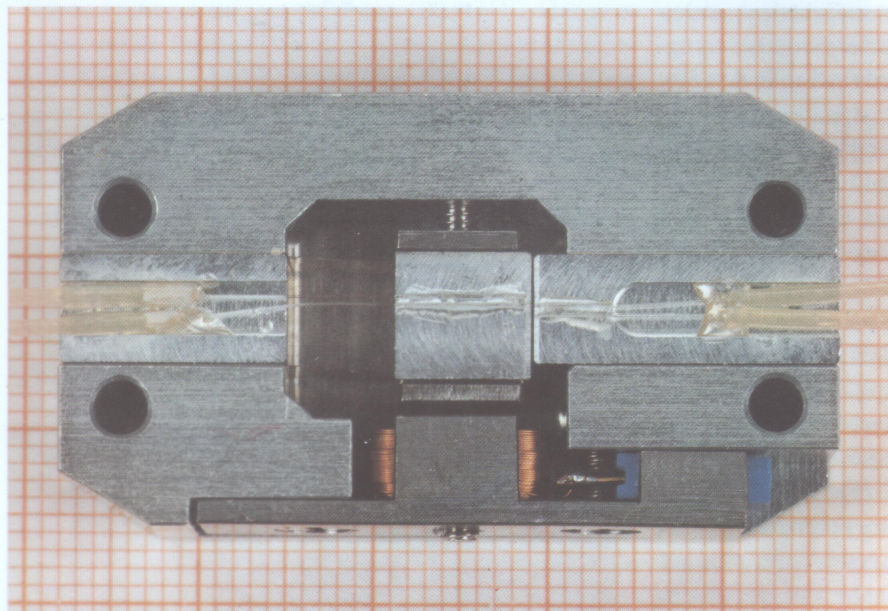


Fig. 13. Foto van het inwendige van het relais *REL* uit fig. 12. De glasvezels zijn vastgelijmd in V-vormige groeven, die bij fabricage in één enkele bewerking zowel in de behuizing als in het anker zijn aangebracht. Daardoor hoeft men niet aan extreem hoge tolerantie-eisen te voldoen. Met stelschroeven aan de onder- en bovenkant worden de twee uiterste standen van het anker gefixeerd. De twee bladveren waarmee het anker aan de behuizing vastzit, zijn op de foto bijna niet te herkennen.

schema van een aansluitdoos is getekend in fig. 12a, een doorsnede van het daarin gebruikte relais is geschetst in fig. 12b en een foto van dat relais wordt getoond in fig. 13. Als de spoel van het relais niet bekrachtigd is (hetgeen onder andere het geval is, als er geen stekker in het stopcontact zit) dan vormt het relais een optische doorverbinding; anders lopen de optische signalen via de aangesloten stekker (fig. 14). De nominale demping die in het relais optreedt, bedraagt slechts 0,7 dB.

De meanderpoorten

Reeds vrij in het begin van dit artikel (zie ook fig. 5) zijn we de belangrijkste drie functies van de meanderpoorten tegengekomen:

- met behulp van hetzelfde type ontvanger/zendercombinatie *R/T* als elk station bevat, wordt een opto-elektrische en een elektro-optische koppeling tussen de lokale kern en de afzonderlijke meanders tot stand gebracht;
- in voorkomende gevallen kan met behulp van de schakelaar *EBS* de bijbehorende meander worden 'afgesneden';
- de jitter die in de meander is ontstaan, wordt geëlimineerd.

Bovendien wordt het synchronisatiepatroon dat zich aan het begin van elk raster bevindt, 'ververst'.

Om het in- en uitschakelen van de schakelaar *EBS* zonder storing (o.a. van de synchronisatie) van de rest van het PHILAN-systeem te laten plaatsvinden, moet de signaalvertraging tussen in- en uitgang van de meanderpoort vóór en na omschakelen gelijk zijn. Daarvoor zijn speciale voorzieningen getroffen, zodat deze vertraging altijd 256 bits bedraagt.

Daarnaast moet de meanderpoort bij het in werking treden van de schakelaar *EBS* kortstondig een aantal extra maatregelen nemen om de 'safe-message service' van PHILAN te garanderen. Deze is immers gebaseerd op het werken met echo's (zie blz. 336) en deze echo's

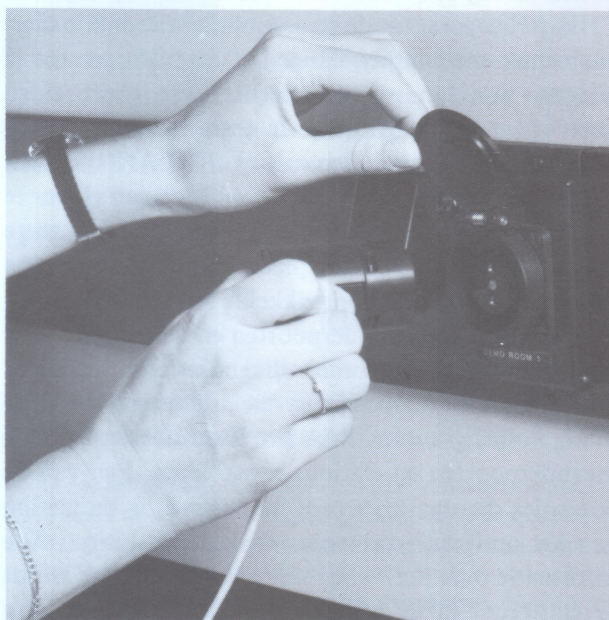


Fig. 14. Stopcontact en stekker voor de PHILAN-meandering. Hiermee kan een betrouwbare en gemakkelijk losneembare dubbele optische en dubbele elektrische verbinding tot stand gebracht worden (zie ook fig. 12a)^[12].

[10] Zie b.v. blz. 129 in: A. S. Tanenbaum, Computer networks, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1981.

[11] Optischer Schalter, Duitse octrooiaanvraag nr. 3437489, 12 oktober 1984 (uitvinders: W. A. M. Snijders en J. P. Klomp).

[12] Optische verbindingsinrichting, Nederlandse octrooiaanvraag nr. 8403691, 5 december 1984 (uitvinders: J. W. Faber en J. P. Klomp).

kunnen onder deze speciale omstandigheden aanleiding geven tot foutieve conclusies: een correct terugkerende echo heeft een operationeel station in de afgesneden meander nu namelijk *niet* gepasseerd.

Ten slotte bewaakt elke meanderpoort ook de synchronisatie van alle stations in de bijbehorende meander en neemt speciale maatregelen om deze zo snel mogelijk te herstellen, als zij verloren is gegaan.

De centrale eenheid

De centrale eenheid *CU* van PHILAN (fig. 3) fungeert als ringbesturingssysteem ('ring management system'). In de simpelste uitvoering bevat zij een monitor en twee kanaalbeheerders voor respectievelijk circuit- en pakketgeschakeld verkeer (fig. 15).

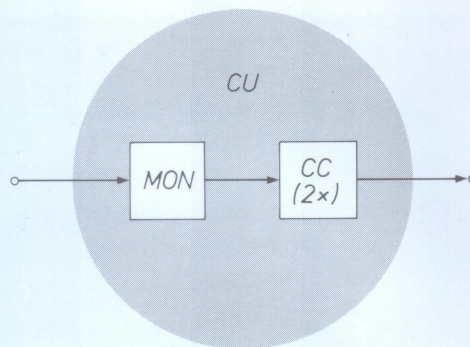
De monitor heeft als voornaamste taken het opwekken en bewaken van de juiste rasterstructuur van het PHILAN-sigitaal en het completeren van de vertraging die dat signaal bij één rondgang door de meander-ring ondergaat tot een geheel aantal rasterperioden.

De kanaalbeheerders houden zich bezig met het registreren en opnieuw beschikbaar stellen van vrije kanalen.

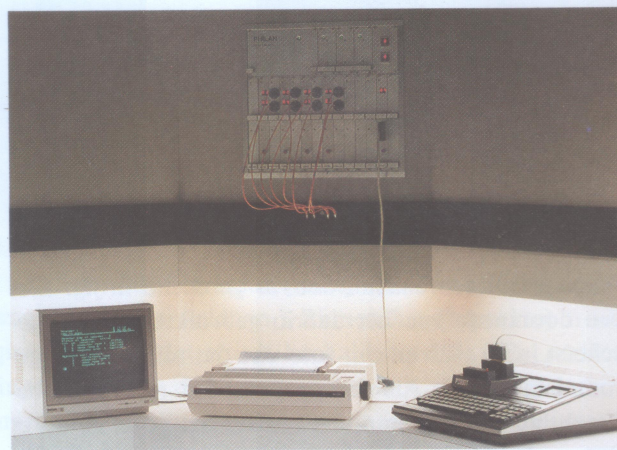
Uitbreidingsmogelijkheden

Tot nu toe hebben wij onze beschrijving van PHILAN beperkt tot de basisconfiguratie; er zijn hieraan echter een aantal belangrijke uitbreidingen toe te voegen, waarvan we hier slechts twee voorbeelden kort willen vermelden. Op de eerste plaats is het in principe mogelijk om een aantal PHILAN-systemen via de respectievelijke centrale eenheden aan elkaar te koppelen, waardoor grotere transmissienetwerken te vormen zijn. Op de tweede plaats zijn door toepassing van speciaal daarvoor ontwikkelde apparatuur de centrale eenheid, de meanderpoorten en de stations zó te completeren dat uitgebreide diagnose- en beheersmogelijkheden ontstaan. Het systeem kan daarbij regelmatig volledig automatisch het functioneren van alle meanderpoorten en stations controleren. Een van de controles die daarbij wordt uitgevoerd, is de meting van het optische zendvermogen van elk station. Alle informatie over het wel en wee van het netwerk wordt geregistreerd in de centrale eenheid en kan via een beeldscherm of zelfs via alarmsignalen aan een operator worden meegedeeld. In omgekeerde richting kan de operator via een toetsenbord aan de centrale eenheid opdracht geven tot het uitvoeren van bepaalde taken.

Door de keuze van de juiste uitbreidingen op de PHILAN-basisconfiguratie kan zo voor praktisch elke situatie het optimale 'local-area network' gecreëerd worden.



a



b

Fig. 15. a) In haar eenvoudigste vorm bestaat de centrale eenheid *CU* in PHILAN uit een monitor *MON*, die de signaalstructuur bewaakt, en twee kanaalbeheerders *CC*. Desgewenst kan hier andere apparatuur ten behoeve van foutendiagnose, beheer en rechtstreekse bediening door een operator aan worden toegevoegd. b) Foto van de uitgebreide centrale eenheid die in de demonstratie-opstelling van het Projectencentrum wordt gebruikt; de specifieke PHILAN-schakelingen bevinden zich in een rek in de wand (midden boven). Daaronder ziet men van links naar rechts een beeldscherm, een afdrukmachine en een P2000-computer, die onder andere een toetsenbord en een cassettebandspeler bevat. Deze dienen als in- en uitvoerapparatuur voor de operator. (Zie ook fig. 1.)

Samenvatting. PHILAN (PHilips Integrated Local-Area Network) is een systeem voor bedrijfscommunicatie, waarin digitale informatie met een bitsnelheid van ongeveer 20 Mbit/s wordt overgedragen op basis van tijdmultiplex. Dit systeem heeft een ringvormige netwerkstructuur, waarvan delen — meanders genaamd — kunnen worden afgesneden bij het optreden van plaatselijke storingen. In de meanders wordt gebruik gemaakt van glasvezelkabel als transmissiemedium. In PHILAN kan gelijktijdig circuitgeschakeld verkeer en pakketgeschakeld verkeer plaatsvinden. Voor het pakketverkeer is dank zij het gebruik van bepaalde protocollen praktisch 100% betrouwbaarheid ('safe-message service') verkregen. Voor het maken van aansluitingen op de meanders worden aansluitdozen gebruikt, waarin een dubbele optische stekerverbinding tot stand wordt gebracht. In elke aansluitdoos bevindt zich ook een speciaal ontwikkeld relais, waarmee langs elektromechanische weg twee glasvezelkabels kunnen worden omgeschakeld. Naast een tamelijk eenvoudige basisconfiguratie kent het PHILAN-systeem ook uitgebreidere versies met geavanceerde voorzieningen voor foutendiagnose en beheer. In het Projectencentrum van het Philips Natuurkundig Laboratorium is een PHILAN-proefopstelling voor demonstratiedoeleinden gerealiseerd.

De 'harmonika'-sensor, een nieuwe vaste-stofbeeldopnemer

A. J. P. Theuwissen en C. H. L. Weijtens

Van alle bekende beeldopnemers zijn onze ogen nog steeds ongeëvenaard. Zelfs al zou het ontstaan van een ladingsverdeling in een vaste-stofbeeldsensor met dezelfde nauwkeurigheid verwezenlijkt kunnen worden als de vorming van een beeld op het netvlies, dan zou het transport van de informatie nog niet op dezelfde manier kunnen gebeuren. Elk lichtgevoelig element in het oog heeft een eigen kanaal voor het transport van de beeldinformatie naar de hersenen. Een nabootsing van dit systeem zou te veel verbindingen bevatten. In de vaste-stofbeeldsensoren wordt de informatie afkomstig van alle afzonderlijke beeldelementen uiteindelijk door één kanaal getransporteerd. Het idee voor het transport van de beeldinformatie in de hieronder te beschrijven vaste-stofbeeldsensor, de 'harmonika'-sensor, ontstond in het begin van de jaren tachtig in het Philips Natuurkundig Laboratorium.

Inleiding

Een vaste-stofbeeldsensor lijkt een aantrekkelijk alternatief voor de opneembuis, die in videocamera's gewoonlijk gebruikt wordt. In een opneembuis wordt met een elektronenstraal de ladingsverdeling afgetast die onder invloed van opvallend licht op fotogeleidend materiaal ontstaat. In de meeste vaste-stofbeeldsensoren is het aftasten van de ladingsverdeling vervangen voor het rechtstreeks transporteren ervan.

Belangrijke toepassingen van deze beeldsensoren zijn te vinden in opneemapparatuur voor bewakingsdoeleinden, elektronische foto- en filmcamera's en zelfs in speelgoed. Speciaal in verband met toepassingen voor de consumentenmarkt is het van belang dat de prijs laag is. Aangezien de prijs rechtstreeks afhangt van de grootte van de sensor, wordt getracht deze zo klein mogelijk te maken met behoud van het scheidend vermogen.

Een vaste-stofbeeldsensor heeft een aantal voordelen vergeleken met een opneembuis; hij kan met IC-technologie gemaakt worden, heeft een laag gewicht, verbruikt weinig energie, heeft kleine afmetingen en is stevig. Bovendien kan het optreden van 'naijl'- of 'komeet'-effecten vermeden worden en een te intensieve lichtbundel beschadigt het beeldgedeelte niet. De beeldkwaliteit weegt echter op dit moment nog niet op tegen die van een opneembuis. Om vergelijkbare beeldkwaliteiten te verkrijgen, moet de vaste-stofbeeldsensor tenminste een bepaald aantal beeldelementen bezitten.

Dit mag echter niet tot gevolg hebben dat de kritische afmetingen veranderen (dit zou een nieuwe technologie vereisen) of dat de prijs van de chip te hoog wordt. Met de huidige stand van de technologie is het in vergelijking met andere beeldopneemapparatuur economisch gezien voordelig als de chipoppervlakte niet meer dan 40 mm² bedraagt.

Een vaste-stofbeeldsensor is niets anders dan een plaatje silicium ('chip'). Dit bestaat uit twee gedeelten, een beeldgedeelte en een opslaggedeelte. In het beeldgedeelte worden onder invloed van opvallend licht elektronen gegenereerd, die op bepaalde plaatsen (de beeldelementen) in potentiaalputjes verzameld worden. Zo ontstaat een met een beeld overeenkomende verdeling van ladingspakketjes. De grootte van een ladingspakketje komt overeen met de hoeveelheid licht die valt op een beeldelement. Nadat gedurende een bepaalde tijd ('rastertijd') lading verzameld is, wordt deze verdeling in zijn geheel ^[1] overgebracht naar het opslaggedeelte, dat voor licht afgeschermd is. Dit overbrengen moet snel gebeuren omdat de ladingspakketjes tijdens het transport niet merkbaar beïnvloed mogen worden door opvallend licht. De ladingspakketjes mogen elkaar uiteraard ook niet beïnvloeden. De potentiaalputjes in het silicium worden tot stand gebracht door op het oppervlak, loodrecht op een aantal lijnvormige kanalen van n-silicium,

Dr. ir. A. J. P. Theuwissen en drs. C. H. L. Weijtens, medewerkers van het Philips Natuurkundig Laboratorium, Eindhoven.

^[1] De met een beeld overeenkomende ladingsverdeling wordt in zijn geheel naar het opslaggedeelte getransporteerd dat onder het beeldgedeelte ligt. Dit type sensor wordt daarom 'frame transfer'-sensor (FT) genoemd.

elektroden aan te brengen waarop elektrische spanningen gezet worden.

Vanuit het opslaggedeelte worden de ladingspakketjes rij voor rij (lijn voor lijn) naar het uitleesregister overgebracht. De informatie kan daarna op de voor TV-beelden gebruikelijke wijze verder verwerkt worden.

Het scheidend vermogen van de sensor wordt bepaald door het aantal beeldelementen per oppervlakte-eenheid. De afmetingen van een beeldelement zijn vastgelegd door de breedte van één n-kanaal en door het aantal en de afmetingen van de elektroden die nodig zijn om de potentiaalputjes te verwezenlijken. In een vierfasige beeldsensor beslaat een beeldelement vier elektroden (zie fig. 1).

In fig. 2 is een doorsnede getekend door een gedeelte van een vierfasige beeldsensor, die eigenlijk niets anders is dan een ladingsschuifregister van het CCD-type ('charge-coupled device') [2]. In een substraat van p-silicium bevinden zich smalle kanalen van n-silicium. Hierop bevindt zich een isolerende laag (siliciumoxide) en daar weer bovenop bevinden zich de elektro-

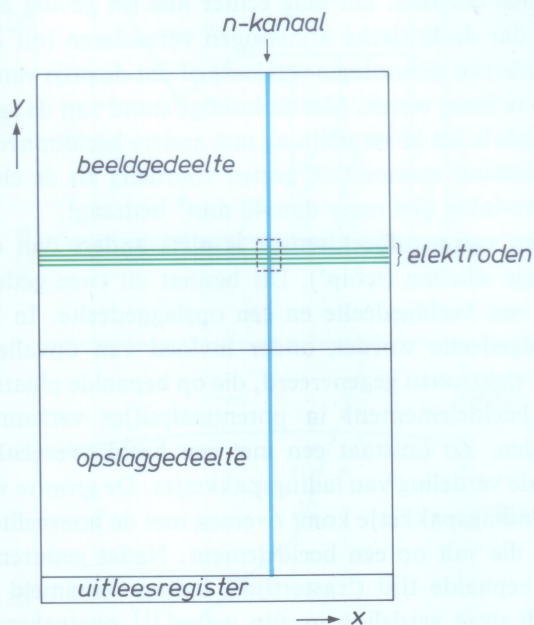


Fig. 1. Schematische voorstelling van een vaste-stofbeeldsensor. De sensor bestaat — van boven naar beneden gezien — uit drie delen: een beeldgedeelte, een opslaggedeelte en een uitleesregister. In het beeld- en het opslaggedeelte liggen de n-kanalen verticaal (y -richting). Voor de duidelijkheid is slechts één n-kanaal weergegeven. De elektroden lopen horizontaal, over de kanalen heen (x -richting). In de figuur zijn slechts vier elektroden voor het beeldelement aangegeven. De gestippelde rechthoek duidt een beeldelement in een vierfasige beeldsensor aan. Elk beeldelement bevat aan het einde van een rastertijd een ladingspakketje. Alle ladingspakketjes worden nadat een rastertijd verlopen is, tegelijkertijd naar het opslaggedeelte getransporteerd. Het opslaggedeelte bestaat uit evenveel elementen als het beeldgedeelte. Vanuit het opslaggedeelte worden de ladingspakketjes rij voor rij naar het uitleesregister geschoven. Een rij ladingspakketjes bevat informatie die overeenkomt met een lijn in een TV-beeld.

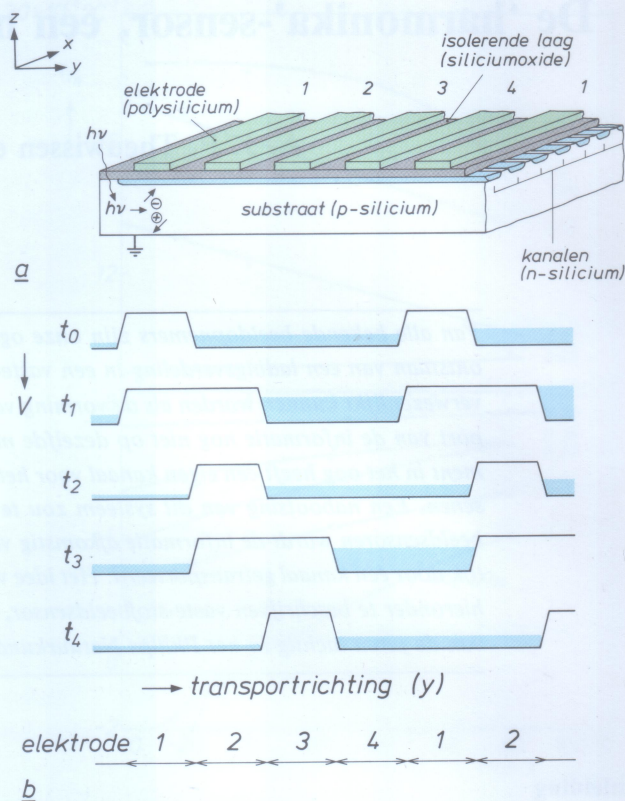


Fig. 2. a) Schematische voorstelling van een gedeelte van een vierfasige vaste-stofbeeldsensor. In een p-silicium-substraat liggen smalle kanalen n-silicium (in de y -richting). Op het oppervlak bevindt zich een laag siliciumoxide. Daar weer bovenop bevinden zich de elektroden van polysilicium (in de x -richting). Het siliciumoxide is nodig om geleiding tussen het substraat en de elektroden en tussen de elektroden onderling te voorkomen. Licht dat door de transparante elektroden en het siliciumoxide heen valt, maakt in het silicium elektronen en gaten vrij ($h\nu \rightarrow \oplus$ en $\ominus$). De gaten vloeien af naar aarde en de elektronen worden verzameld in potentiaalputjes in de n-kanalen die ontstaan door op de elektroden spanningen aan te brengen. b) Potentiaal (V) in het silicium op opeenvolgende tijdstippen. Het eerste signaal geeft de situatie weer gedurende een rastertijd. De elektronen worden verzameld in het potentiaalputje onder de elektroden 2 t.m. 4. Vanaf t_1 zorgen de veranderingen van de spanningen op de elektroden voor het (peristaltische) transport van de ladingspakketjes. In blauw is de inhoud van een potentiaalput weergegeven. Alle ladingspakketjes worden tegelijkertijd getransporteerd.

den (polykristallijn silicium). Licht dat door de elektroden en de isolerende laag heen valt, genereert in het silicium elektronen. Uiteraard ontstaan naast elektronen ook positieve ladingsdragers, gaten, die afvloeien naar aarde. De potentiaalputjes waarin de elektronen verzameld worden, ontstaan door op de elektroden 2 t.m. 4 een positieve spanning en op de elektroden 1 een negatieve spanning te zetten. Het eerste signaal (gemarkt met t_0) is een weergave van deze situatie, die een hele rastertijd van 20 ms onveranderd blijft. Daarna wordt de ladingsverdeling overgebracht naar het opslaggedeelte. In de beeldsensor van fig. 2 vindt dit transport plaats door op de elektroden een peristaltische 'potentiaalbeweging' te genereren op de maat van een kloksignaal. Daardoor worden de ladingspakketjes voorgestuw naar het opslaggedeelte.

In principe is het mogelijk om de peristaltische 'potentiaalbeweging' te bewerkstelligen met slechts drie elektroden. Om de bij TV-beelden gebruikelijke interliniëring te verkrijgen maken wij gebruik van vier elektroden. De spanningspatronen op de elektroden zijn gedurende opeenvolgende rastertijden symmetrisch ten opzichte van elkaar en over een geheel aantal elektroden verschoven. In de rastertijd volgend op het transport in fig. 2 doet elektrode 3 dienst als scheidingselektrode en de spanning op elektroden 1, 2 en 4 veroorzaakt de potentiaalputten.

Voor het verzamelen van de ladingspakketjes gedurende de rastertijd zijn twee elektroden per beeldelement voldoende. Om het transport van de ladingspakketjes op bovengenoemde, peristaltische wijze mogelijk te maken, bestaat een beeldelement uit meer dan twee elektroden. In fig. 2 zijn dat er vier. Door deze extra elektroden neemt een rij beeldelementen relatief veel plaats in op de chip. Dit heeft nadelige gevolgen voor het scheidend vermogen in verticale (y -)richting (dit wordt bepaald door het aantal beeldelementen per lengte-eenheid). Vandaar dat geprobeerd is een sensor te maken met kleinere beeldelementen. De voor de hand liggende manier om dit te verwezenlijken, is het smaller maken van de elektroden. Dit zou echter om een geheel nieuwe technologie voor de productie van deze sensoren vragen. Een andere mogelijkheid voor het verkleinen van de beeldelementen is het aantal elektroden per rij te verminderen. De gevolgen voor het productieproces zijn niet ingrijpend, maar uiteraard verandert het transportmechanisme dan wel. De manier waarop dit is opgelost in de nieuwe harmonika-sensor, wordt in dit artikel beschreven. Achtereenvolgens komen de werking van de harmonika-sensor, de technische verwezenlijking en de eigenschappen van deze nieuwe beeldsensor aan de orde.

De harmonika-werking

De nieuwe harmonika-sensor^[3] is een vaste-stof-beeldsensor met slechts twee elektroden per beeldelement, die in opeenvolgende rastertijden om de beurt als integratie- en scheidingselektrode fungeren. Ook het opslaggedeelte bestaat uit elementen met slechts twee elektroden. Het ladingstransport geschiedt nu als volgt. Na een rastertijd worden de potentiaalputten en -scheidingen één voor één tweemaal zo breed gemaakt. Dit proces begint aan de grens tussen het beeld- en het opslaggedeelte van de sensor. De ladingsverdeling wordt als het ware als een harmonika uitgerekt. Bij het bereiken van de onderrand van het opslaggedeelte worden de putten en scheidingen, weer één voor één, één elektrode breed gemaakt. De ladingsverdeling wordt nu als een harmonika ineengeschoven. Het resultaat van dit uitrekken en ineenschuiven is dat de

ladingsverdeling in zijn geheel van het beeld- naar het opslaggedeelte van de sensor verplaatst is. Het transport vanuit het opslaggedeelte naar het uitleesregister kan op dezelfde manier geschieden.

Het is duidelijk dat bij deze manier van transport de spanningen op de elektroden op een ingewikkelder wijze veranderen dan bij de vierfasige sensor. Maar de winst is groot: met dezelfde technologie als die gebruikt wordt voor het produceren van een vierfasige sensor is een even grote sensor met twee maal zoveel beeldelementen of een kleinere sensor met hetzelfde aantal beeldelementen te verwezenlijken. De harmonika-sensor bezit hetzelfde aantal beeldelementen als de vierfasige sensor maar beslaat een kleiner oppervlak.

Hoe het ladingstransport in de harmonika-sensor precies in zijn werk gaat, is in fig. 3 en fig. 4 geïllustreerd. Op tijdstip t_0 (fig. 3) bevindt de sensor zich in

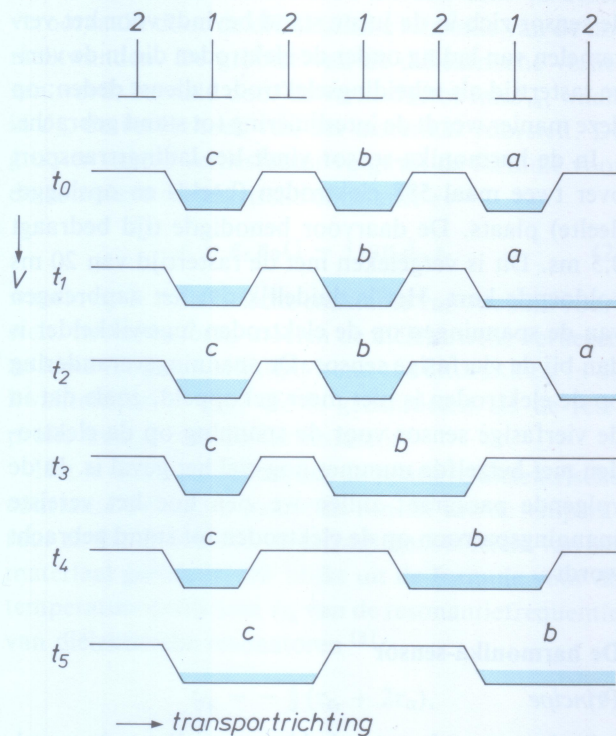


Fig. 3. Het principe van de harmonika. Uitgaande van een twee-fasig systeem, waarin gedurende de rastertijd lading wordt verzameld onder de elektroden 1 en waarin elektroden 2 een scheiding tussen de verschillende ladingspakketjes vormen, ontstaat stap voor stap een vierfasig systeem. De toestand op tijdstip t_0 treedt op aan het eind van een rastertijd, t_1 t.m. t_5 geven de daaropvolgende stappen van het uitrekken van de harmonika weer. Duidelijk is te zien hoe eerst ladingspakketje a , dan ladingspakketje b enz., naar de uitgang van de sensor getransporteerd wordt.

[2] F. L. J. Sangster en K. Teer, Bucket-brigade electronics — new possibilities for delay, time-axis conversion, and scanning, IEEE J. SC-4, 131-136, 1969.

[3] De ideeën waarop dit werk is gebaseerd, zijn aangedragen door A. J. J. Boudewijns, medewerker van de Philips produktdivisie NPB Consumer Electronics, destijds medewerker van het Natuurkundig Laboratorium, en M. G. Collet en L. J. M. Esser, medewerkers van dit laboratorium.

een van de twee toestanden waarin gedurende een periode van 20 ms, de rastertijd, lading verzameld wordt. Op tijdstip t_1 wordt het eerste ladingspakketje (a) uitgerekt. Op tijdstip t_2 wordt het verder naar de uitgang geduwd. De andere ladingspakketjes ($b, c, \dots$) blijven dan nog op hun plaats. Op tijdstip t_3 begint ook het tweede ladingspakketje (b) te bewegen, enz. Deze verandering van een statisch tweefasig naar een dynamisch vierfasig systeem gaat door tot elk ladingspakketje over twee elektroden verdeeld is. Bovendien bevindt zich dan tussen elke twee ladingspakketjes een twee-elektroden-brede scheiding. Op dat moment is het eerste pakketje aan de rand van het opslaggedeelte aangekomen en wordt de harmonika ineengeschoven. De potentiaalputjes en -scheidingen worden weer geleidelijk één elektrode breed gemaakt.

In fig. 4 is voor een sensor met een beeld- en opslaggedeelte met elk acht elektroden het gehele proces van het uitrekken en ineenschuiven van de harmonika weergegeven. Merk op dat aan het einde van de cyclus de sensor zich in de juiste stand bevindt voor het verzamelen van lading onder de elektroden die in de vorige rastertijd als scheidingselektroden dienst deden; op deze manier wordt de interliniëring tot stand gebracht.

In de harmonika-sensor vindt het ladingstransport over twee maal 588 elektroden (beeld- en opslaggedeelte) plaats. De daarvoor benodigde tijd bedraagt 0,5 ms. Dit is vergeleken met de rastertijd van 20 ms voldoende kort. Het is duidelijk dat het aanbrengen van de spanningen op de elektroden ingewikkelder is dan bij de vierfasige sensor. De spanningsverandering op de elektroden is niet meer gekoppeld, zoals dat in de vierfasige sensor voor de spanning op de elektroden met hetzelfde nummer nog wel het geval is. In de volgende paragraaf zullen we zien hoe het vereiste spanningspatroon op de elektroden tot stand gebracht wordt.

De harmonika-sensor

Principe

In het voorafgaande hebben we alleen de gevolgen van de veranderende spanningen op de elektroden voor het transport van de ladingspakketjes beschouwd. Hoe deze spanningsveranderingen tot stand gebracht worden, komt nu aan de orde.

De besturing van de beeldsensor gebeurt met twee schuifregisters, een voor het beeld- en een voor het opslaggedeelte, zie fig. 4. Deze schuifregisters bestaan uit cellen, waarvan elke over een klokingang beschikt. De uitgang van elke cel is verbonden met een elektrode van de beeldsensor en met de ingang van de volgende cel. Aan de ingang van de eerste cel wordt een signaal IM of ST (voor respectievelijk beeld- en opslaggedeelte

van de sensor) aangeboden. De kloksignalen ϕ_1 en ϕ_2 , die in elk schuifregister de klokingangen van respectievelijk de oneven en de even cellen sturen, zorgen ervoor dat dit ingangssignaal stap voor stap door het register opschuift, waarbij na iedere cel signaalinversie optreedt. Daardoor ontstaat op de elektroden het juiste spanningspatroon. Het signaal op de ingang van de eerste cel van het schuifregister (IM of ST) bewerkstelligt het uitrekken en ineenschuiven van de harmonika. Hoe dat precies in zijn werk gaat, is voor een klein gedeelte van de sensor (8 elektroden van het beeldgedeelte en 8 elektroden van het opslaggedeelte met de daarbij behorende schuifregisters) weergegeven in fig. 5.

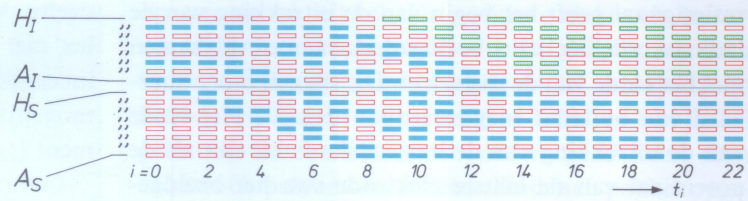
Op het moment dat de met een cel verbonden klok een puls genereert, neemt de uitgang van deze cel een waarde aan die tegengesteld is aan die van de ingang. Met ingangssignalen IM en ST , zoals in fig. 5a getekend, ontstaat op de elektroden $A_1, B_1, \dots$ het in fig. 5b weergegeven potentiaalverloop. Zolang het ingangssignaal IM verandert, zijn de potentiaalputten en -scheidingen twee elektroden breed en vindt transport van de ladingspakketjes plaats. Hoe de breedten van de potentiaalputten en -scheidingen in de tijd veranderen, is in fig. 5 te zien door op opeenvolgende tijdstippen de waarden van de uitgangen $A_1, B_1, \dots$ te beschouwen. We zien dat op de genummerde tijdstippen juist het gewenste potentiaalpatroon ontstaat, dat overeenkomt met de toestand van de sensor zoals die in fig. 4 getekend is.

Zodra het ingangssignaal IM (ST) constant blijft, blijven, zij het met enige vertraging, ook de spanningen op de elektroden van het beeldgedeelte (opslaggedeelte) constant. De harmonika wordt in de loop van de tijd ineengeschoven. Dit gaat door totdat de potentiaalverdeling alleen nog uit putten en scheidingen bestaat, die elk een breedte van één elektrode hebben. Deze potentiaalverdeling blijft bestaan zolang het signaal IM constant blijft. Door het ingangssignaal IM de ene rastertijd hoog en de andere rastertijd laag te houden, functioneren de elektroden afwisselend als scheidings- en integratie-elektrode (zie fig. 4 en fig. 5).

Voor het correct functioneren van de sensor zijn behalve de kloksignalen, ϕ_1 en ϕ_2 , en de stuursignalen, IM en ST , ook nog een aantal synchronisatiesignalen nodig die het begin en het einde van de uitrekking van de twee harmonika's (van beeld- en opslaggedeelte) aangeven. Deze signalen kunnen bepaald worden door b.v. het aantal klokpulsen te tellen. Een aantal ervan kan ook ontleend worden aan de toestand waarin het schuifregister zich bevindt ^[4]. Het eerste synchroni-

[4] A. J. P. Theuwissen, C. H. L. Weijtens en J. N. G. Cox, The accordion imager: more than just a CCD-sensor, Proc. Electronic Imaging 85, Boston 1985, blz. 87-90.

Fig. 4. Een hele cyclus van uittrekken en ineenschuiven van de harmonika van een uit 16 elektroden bestaande beeldsensor. A_1 t.m. H_1 duiden de elektroden van het beeldgedeelte van de sensor aan, A_S t.m. H_S die van het opslaggedeelte. Een blauwe rechthoek komt overeen met een integratie-elektrode waaronder een rij ladingspakketjes aanwezig is. Een rode rechthoek komt overeen met een scheidingselektrode en een groene rechthoek met een elektrode waaronder zich nog geen lading bevindt, maar waarop wel een positieve spanning staat. De eerste kolom geeft de potentiaalverdeling op t_0 , dat wil zeggen op het moment dat een volledige rastertijd verstreken is. Onder de elektroden A_1 , C_1 , E_1 en G_1 bevinden zich de rijen ladingspakketjes. Op t_1 begint de eerste rij ladingspakketjes te bewegen. Op t_3 het tweede, enz. Op tijdstip t_8 is de eerste rij ladingspakketjes aangekomen aan de onderrand van het opslaggedeelte, de harmonika van het opslaggedeelte kan dan ineengeschoven worden. Op t_9 is de eerste rij ladingspakketjes weer één elektrode breed. Merk op dat vanaf t_9 op de elektroden van het beeldgedeelte die geen rol



meer spelen in het transport van de huidige ladingsverdeling, een potentiaalverdeling gaat ontstaan die geschikt is voor het verzamelen van lading gedurende de volgende rastertijd. Nadat de ladingsverdeling in zijn geheel in het opslaggedeelte is aangekomen, moet er nog even doorgeklodt worden om de potentiaalverdeling in het beeldgedeelte van de gewenste, één-elektrode-brede putten en scheidingen te voorzien. Vanaf t_{21} kan onder de elektroden (B_1 , D_1 , F_1 en H_1) lading verzameld worden. Na het verstrijken van deze rastertijd zijn A_1 , C_1 , E_1 en G_1 weer aan de beurt, d.w.z. dat de totale beschreven cyclus van uittrekken en ineenschuiven opnieuw begint.

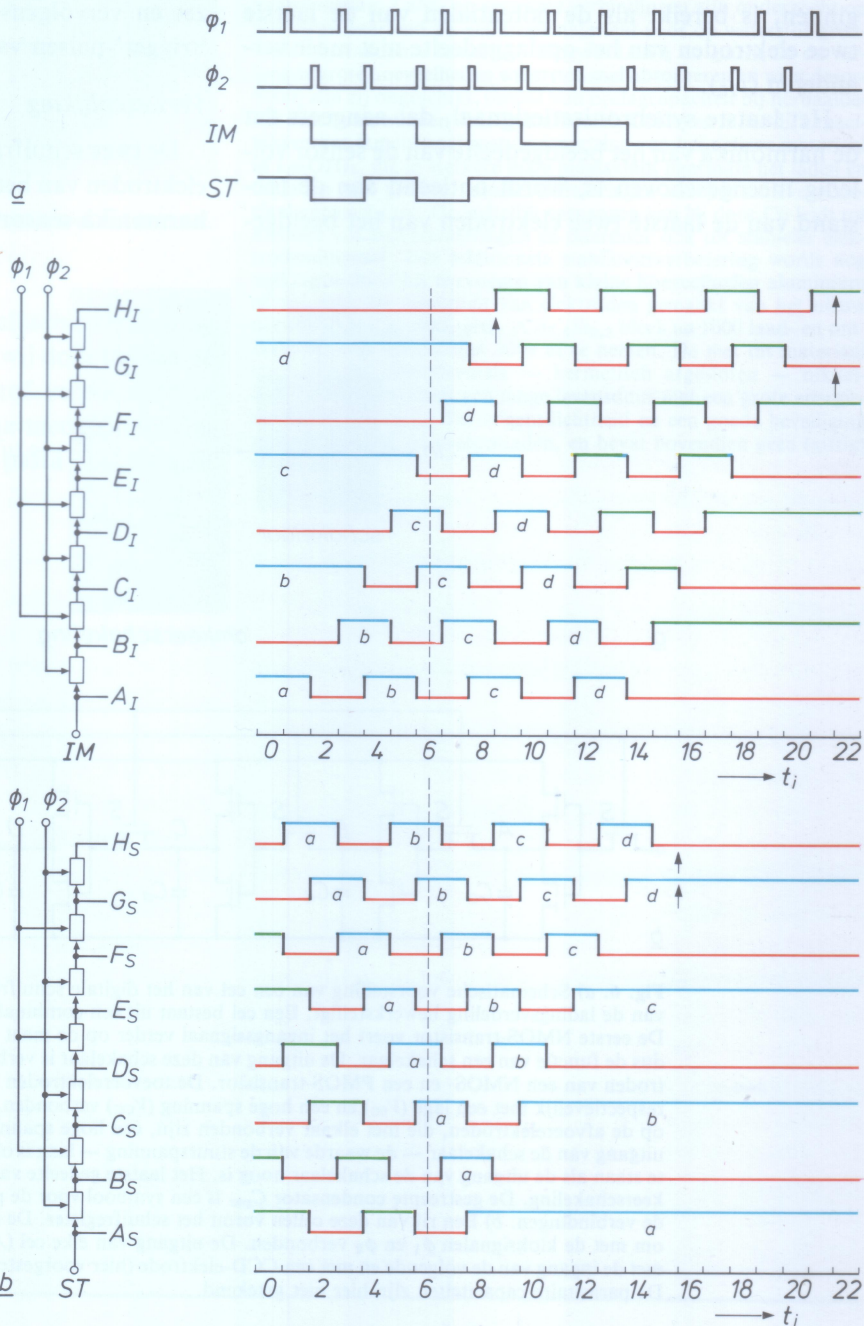


Fig. 5. a) Stuursignalen voor het transport van de ladingsverdeling van beeld- naar opslaggedeelte van de uit 16 elektroden bestaande beeldsensor van fig. 4. IM en ST zijn de ingangssignalen van de uit zeven cellen (weergegeven als rechthoeken) bestaande schuifregisters, die het in (b) geschetste potentiaalverloop op de elektroden A_S t.m. H_1 tot stand brengen. De kloksignalen ϕ_1 en ϕ_2 zijn nodig om het ingangssignaal door het schuifregister te klokken. Door dit potentiaalverloop worden de rijen ladingspakketjes (waarvan de plaats aangegeven is met a , b , c , ...) van beeld- naar opslaggedeelte getransporteerd. De getallen onder de tijdas en de aanduidingen van de elektroden komen overeen met die van fig. 4. Op het tijdstip t_6 b.v. (zie stippe lijn) komt het potentiaalpatroon op de elektroden overeen met dat van fig. 4 op t_6 . De pijltjes duiden de punten in het potentiaalverloop aan, waaruit de synchronisatiesignalen bepaald worden (zie tekst). Merk op dat na het transport de functies (scheiding en integratie) van de elektroden in het beeldgedeelte verwisseld zijn.

satiesignaal geeft het begin van de uitrekking van de ladingsverdeling in het beeldgedeelte aan en valt samen met het einde van de rastertijd. Dit signaal moet uiteraard van buitenaf toegevoerd worden^[5]. Het einde van de uitrekking van de harmonika is bereikt als de potentiaal van de laatste elektrode van het beeldgedeelte, elektrode H_1 in het voorbeeld van de figuren 4 en 5, voor het eerst verandert. In fig. 5 is met pijlen aangegeven aan welke toestand deze synchronisatiesignalen ontleend worden. Op dat moment, t_8 , begint de harmonika van het opslaggedeelte ineen te schuiven. Signaal ST mag dan niet meer veranderen.

Als de ladingsverdeling in het opslaggedeelte volledig ineengeschoven is, wordt signaal IM constant gehouden. Ook de potentiaalverdeling in het beeldgedeelte schuift ineen. Het tijdstip waarop dit moet beginnen, is bereikt als de potentialen van de laatste twee elektroden van het opslaggedeelte niet meer veranderen (t_{15}).

Het laatste synchronisatiesignaal, dat aangeeft dat de harmonika van het beeldgedeelte van de sensor volledig ineengeschoven is, wordt ontleend aan de toestand van de laatste twee elektroden van het beeldge-

deelte. Voor het correct functioneren van de sensor is het niet nodig te weten wanneer de harmonika weer ineengeschoven is. Echter om de dissipatie zo klein mogelijk te houden, worden de klokken op dat moment (t_{22}) uitgezet.

Gedurende de volgende rastertijd wordt de ladingsverdeling uit het opslaggedeelte lijn voor lijn uitgelezen (niet in fig. 5 aangegeven). Dit gebeurt eveneens volgens de harmonika-werking. Merk op dat na dit transport de harmonika van het opslaggedeelte niet ineengeschoven wordt, d.w.z. dat op tijdstip t_0 de potentiaalverdeling op de elektroden van het opslaggedeelte bestaat uit twee-elektroden-brede putten en scheidingen. Nadat deze rastertijd beëindigd is, is in het beeldgedeelte een nieuwe ladingsverdeling ontstaan. Op dat tijdstip worden de klokken weer aangezet en vervolgens de signalen IM en ST gestart na 'trigger'-pulsen van buitenaf.

Verwezenlijking

De twee schuifregisters die voor de besturing van de elektroden van het beeld- en het opslaggedeelte van de harmonika-sensor zorgen, moeten op dezelfde chip

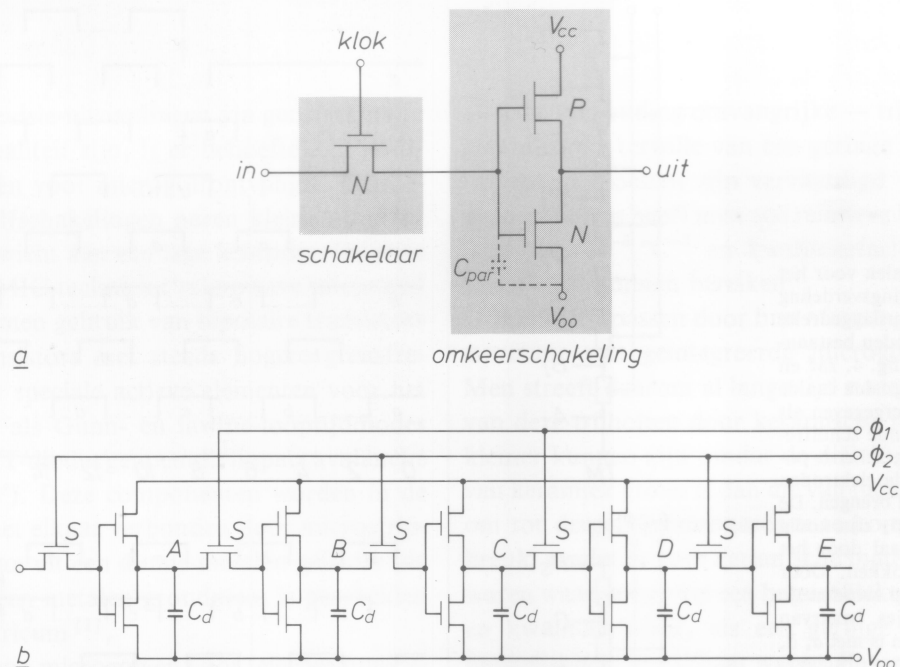


Fig. 6. a) Schematische voorstelling van een cel van het digitale schuifregister dat het transport van de ladingsverdeling bewerkstelligt. Een cel bestaat uit een combinatie van MOS-transistors. De eerste NMOS-transistor voert hetingangssignaal verder op de maat van de klok. Deze heeft dus de functie van een schakelaar. De uitgang van deze schakelaar is verbonden met de stuur-elektroden van een NMOS- en een PMOS-transistor. De toevoerelektroden van deze transistors zijn respectievelijk met een lage (V_{00}) en een hoge spanning (V_{CC}) verbonden. Dit heeft tot gevolg dat op de afvoerelektroden, die met elkaar verbonden zijn, een hoge spanning komt te staan als de uitgang van de schakelaar — de waarde van de stuurspanning — laag is of een lage spanning komt te staan als de uitgang van de schakelaar hoog is. Het laatste gedeelte van de cel fungeert als omkeerschakeling. De gestreepte condensator C_{par} is een symbool voor de parasitaire capaciteit van de verbindingen. b) Een rij van deze cellen vormt het schuifregister. De schakelaars S zijn om en om met de kloksignalen ϕ_1 en ϕ_2 verbonden. De uitgang van elke cel (A_1 , B_1 , ...) is verbonden met de ingang van de volgende en met een CCD-elektrode (hier voorgesteld als een capaciteit C_{cl}). De parasitaire capaciteiten zijn hier niet getekend.

als het CCD aangebracht worden. Voor de productie van het CCD en de schuifregisters gelden dezelfde ontwerpregels. Dit betekent dat de schuifregisters ook met de voor de CCD's gebruikelijke $3,5\mu\text{m}$ -technologie gemaakt moeten worden. Bovendien moeten de cellen waaruit het schuifregister bestaat, zo weinig mogelijk energie gebruiken en een zo klein mogelijke oppervlakte in beslag nemen. De eenvoudigste constructie die het gewenste signaal levert en bovendien aan bovengenoemde eisen voldoet, is een combinatie van drie MOS-transistors per cel: twee van het n-type en een van het p-type (zie fig. 6a). De uitgang van een dergelijke cel wordt gelijk aan de geïnverteerde ingang zodra de klok een puls geeft. Zolang de klok niet opnieuw actief is (de ingang mag wel veranderen), blijft de uitgang constant ten gevolge van de parasitaire capaciteit van de stuur elektrode van de omkeerschakeling.

Een schuifregister bestaat uit 587 (het aantal CCD-elektroden - 1) cellen. De ingangen van de schakelaars van deze cellen zijn om en om met een van beide kloksignalen verbonden. Deze twee kloksignalen mogen elkaar in de tijd niet overlappen. Anders zou het gevolg zijn dat het schuifregister zich gedurende de tijd dat beide klokken actief zijn, gedraagt als een rij omkeerschakelingen zonder synchronisatiemechanisme.

Elke CCD-elektrode wordt bestuurd door een cel van het schuifregister. Het ligt voor de hand het schuifregister naast de elektroden op de chip aan te brengen, wat echter niet zo eenvoudig is.

De minimale afmetingen van een lichtgevoelig element van de beeldsensor zijn $7\mu\text{m}$ in horizontale richting en $11\mu\text{m}$ in verticale richting^[6] (zie fig. 7). De elektroden, die gemaakt zijn van polysilicium, hebben een dusdanige vorm dat een gedeelte van het p-materiaal en van de n-kanalen vrij toegankelijk is voor opvallend licht. Dit komt de blauwgevoeligheid van de sensor ten goede (polysilicium is nauwelijks transparant voor blauw licht). In het opslaggedeelte van de sensor is het niet nodig een gedeelte van het siliciumoppervlak onbedekt te laten door de elektroden. De oppervlakte van het gedeelte van het kanaal onder de elektrode moet even groot zijn als in het beeldgedeelte om dezelfde ladingopslagcapaciteit te hebben. Dit betekent dat de afmeting in de y-richting van een beeld-element in het opslaggedeelte kleiner kan zijn dan in het beeldgedeelte. Deze verticale afmeting bedraagt $9\mu\text{m}$. In fig. 8 is inderdaad te zien dat het opslaggedeelte van de sensor kleiner is dan het beeldgedeelte.

Het is duidelijk dat niet naast elke horizontale elektrode een schuifregistercel geplaatst kan worden. Deze bestaat immers uit een aantal p-n-overgangen en is dus een aantal maal de minimale afmeting van $3,5\mu\text{m}$

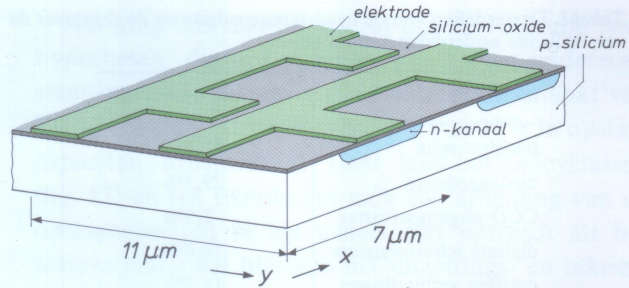


Fig. 7. Schematische voorstelling van de ligging van de CCD-elektroden over de n-kanalen in het beeldgedeelte van de harmonika-sensor. Door hun speciale vorm bedekken de elektroden niet het gehele oppervlak, maar laten een gedeelte van het p-materiaal en van de n-kanalen vrij toegankelijk voor opvallend licht. Dit heeft tot gevolg dat in het bijzonder de blauwgevoeligheid van de sensor toeneemt. De uit polysilicium bestaande elektroden absorberen veel licht in het blauwe golflengtegebied.

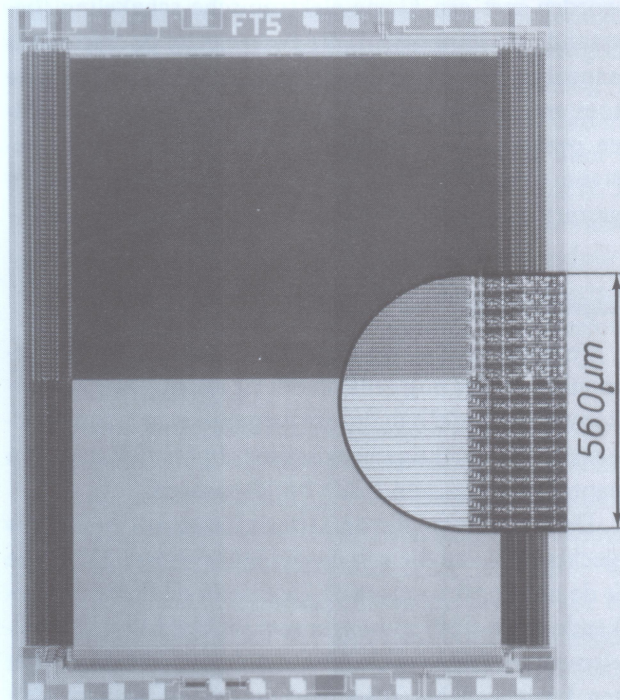


Fig. 8. De harmonika-sensor. Het opslaggedeelte (lichte deel) is kleiner dan het beeldgedeelte (donker). Het opslaggedeelte is voor licht afgeschermd door een aluminium laag. De n-kanalen lopen verticaal, de CCD-elektroden horizontaal. Links en rechts liggen de schuifregisters die voor de besturing van de spanningen op de CCD-elektroden zorgen. Inzet: vergroting op de overgang van beeld naar opslaggedeelte.

[5] Bij de totstandkoming van de daarvoor benodigde elektronica is een bijdrage geleverd door J. N. G. Cox.

[6] De minimale horizontale afmeting volgt uit de gebruikte ($3,5\mu\text{m}$)-technologie. Het transport in horizontale richting geschiedt in een driefasig schuifregister. De cellenlengte van dit register, dat eigenlijk uit drie schuifregisters onder elkaar bestaat, is $21\mu\text{m}$. Vandaar dat de minimale afmeting van een elektrode van het schuifregister en dus ook de minimale afmeting van een kanaal $7\mu\text{m}$ is. De matrix van de beeldelementen moet het gestandaardiseerde TV-formaat hebben. Dit betekent dat de verhouding tussen de horizontale en verticale afmetingen van het beeldgedeelte 4:3 moet zijn. Samen met de 604 beeldelementen per lijn en 294 lijnen leidt dit tot een verticale afmeting van een beeldelement van $11\mu\text{m}$.

Tabel I. De verdeling van de beschikbare ruimte op de chip over de verschillende onderdelen van de sensor.

onderdeel	relatieve oppervlakte
beeldgedeelte	35,8%
opslaggedeelte	29,3%
CCD-uitgangsregister	2,9%
digitale schuifregisters	16,8%
perifere verbindingen	15,2%

breed. Daarom worden een aantal (vier) van deze cellen naast elkaar geplaatst aan weerskanten van het CCD. Hoe de beschikbare ruimte op de chip verdeeld is over de verschillende onderdelen, is te zien in *tabel I*.

De synchronisatiesignalen die het begin en het einde van het uittrekken en ineenschuiven van de harmonika's aangeven (zie vorige paragraaf), kunnen bepaald worden met een kleine elektronische schakeling (bestaande uit 20 poorten), die eveneens op de chip zelf is aangebracht. Met behulp daarvan wordt de logische toestand van de twee laatste elektroden van het beeld- en opslaggedeelte bepaald. Afhankelijk van die toestand worden de kloksignalen en de ingangssignalen gestart of gestopt.

Eigenschappen van de sensor

Tenslotte willen we de eigenschappen van de harmonika-sensor nog eens op een rij zetten. Daarbij ontkomen we er niet aan deze te vergelijken met zijn voorganger, de vierfasige beeldsensor. In *tabel II* staat een aantal gegevens van beide beeldsensoren.

De oppervlakte die de harmonika-sensor beslaat, is slechts 56% van die van de vierfasige sensor. Daarmee is de harmonika-sensor de kleinste in de literatuur bekende vaste-stofbeeldsensor met dit hoge aantal beeld-elementen. Deze verkleining van de oppervlakte is niet ten koste van het scheidend vermogen gegaan. Een gunstig gevolg van het kleinere aantal elektroden is de vermindering van het gedissipeerde vermogen. De vermindering van het gedissipeerde vermogen per beeld-element heeft een verkleining van de donkerstroom tot gevolg, wat de beeldkwaliteit ten goede komt. Fluctuaties in de donkerstroom — die plaatsgebonden zijn —

Tabel II. Een aantal eigenschappen van de harmonika-sensor vergeleken met die van de vierfasige sensor.

	vierfasige sensor	harmonika-sensor
type ^[1]	'frame transfer'	'frame transfer'
chippoppervlak ($y \times x$)	$9,41 \times 7,01$ = 66 mm ²	$7,01 \times 5,45$ = 38,2 mm ²
aantal beeldelementen ($y \times x$)	588 × 604	588 × 604
grootte beeldelement ($y \times x$)	$15,6 \times 10 \mu\text{m}^2$	$11 \times 7 \mu\text{m}^2$
uitleesfrequentie	11,5 MHz	11,5 MHz
minimale afmetingen bij ontwerpregels	3,5 μm	3,5 μm
aantal elektroden per beeldelement	4	2

vormen een van de belangrijkste beperkingen voor het gebruik van een vaste-stofbeeldsensor. Deze fluctuaties kunnen tot gevolg hebben dat op bepaalde plaatsen heldere punten in het weergegeven beeld ontstaan.

De voor de besturing benodigde elektronica die niet op de chip zelf is aangebracht, is eenvoudiger en compacter geworden. Er is minder polysilicium op de chip nodig en dit komt de lichtgevoeligheid — met name voor het blauw — van de sensor ten goede. Het belangrijkste aspect van de harmonika-sensor is echter dat een aantal eigenschappen die samenhangen met de grootte van de chip en de beeldelementen (voornamelijk de kostprijs van de chip) verbeterd zijn in vergelijking met andere beeldsensoren, zonder dat daarvoor een geheel nieuwe produktiewijze ontworpen en er een geheel nieuw productieproces ontwikkeld hoeft te worden.

Samenvatting. De toepassing van vaste-stofbeeldsensoren — plaatjes silicium waarin onder invloed van opvallend licht een ladingsverdeling ontstaat — in videocamera's voor gebruik door consumenten zal in sterke mate bepaald worden door de prijs van de sensor. Zoals met alle chips het geval is, hangt de prijs nauw samen met de grootte van het oppervlak. Met een nieuw uitleesmechanisme, het als een harmonika uittrekken van de ladingsverdeling, is het mogelijk een beeldsensor met twee in plaats van de gebruikelijke vier elektroden per beeldlijn te verwezenlijken. De produktiewijze voor een vierfasige sensor kan gehandhaafd blijven. De elektronica die voor de besturing noodzakelijk is, kan samen met de sensor in één proces op de chip aangebracht worden.

Philips Technisch Tijdschrift 50 jaar geleden

OPTISCHE MODELLEN TER BESTUDEERING VAN DE ACOUSTIEK VAN TOONEELZALEN

FEBRUARI 1936

door R. VERMEULEN en J. DE BOER.

Samenvatting. Voor een tooneelzaal, waar het in de eerste plaats aankomt op een goede verstaanbaarheid van het gesproken woord, wordt een korte nagalmtijd geëischt, zonder dat echter hierdoor de „nuttige geluidsintensiteit” te zeer mag dalen. De verdeling van de nuttige geluidsintensiteit is hier met behulp van optische modelproeven nagegaan, waarbij de geluidsbron vervangen is door een lampje, en de zaalwanden in een ruimtelijk model nagebootst zijn als wanden met een passende reflectiecoëfficiënt. Deze methode is toegepast bij het ontwerp voor de verbouwing van de tooneelzaal in het Philips Ontspanningsgebouw te Eindhoven.

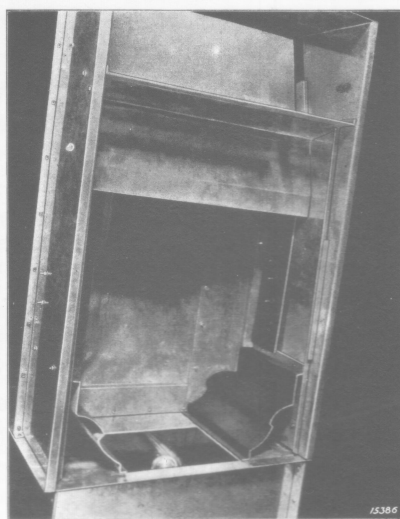
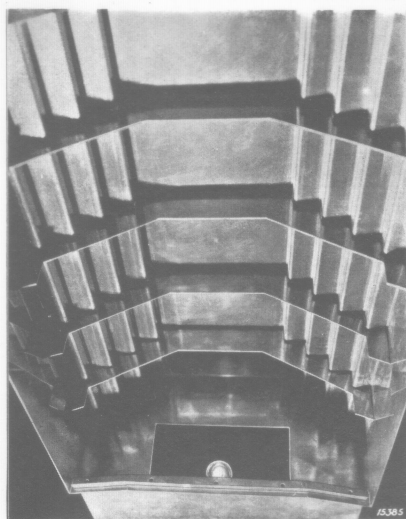


Fig. 1. Modellen voor het onderzoek van de „nuttige” geluidsintensiteit in een zaal. De geluidsbron is voorgesteld door een klein lampje (zie beneden op de foto's). De wanden van het model zijn van aluminium, waarvan de reflectiecoëfficiënt (voor licht) ongeveer 50% bedraagt, zoodat overeenkomstig met de definitie van de „nuttige” intensiteit een straal slechts na enkele reflecties nog bijdragen kan tot de verlichting van de matglazen plaat ter plaatse van het publiek (in de figuren is deze plaat weggenomen; in fig. 1b ziet men echter in de bovenste helft nog de matglazen plaat, die het balkon voorstelt). Geluid-absorberende vlakken in de zaal zijn in het model zwart gemaakt, bijv. fig. 1b op de rechter wand. De helderheid op de matglazen plaat (zie fig. 4, 8, 11) levert de verdeling van de nuttige geluidsintensiteit.

a) Model van de zaal in het Philips Ontspanningsgebouw vóór de verbouwing.
b) Model van dezelfde zaal volgens het, later ook uitgevoerde, verbouwings-ontwerp van Prof. Witzmann (Weenen).

PRACTISCHE TOEPASSINGEN VAN RÖNTGENOGRAFISCH MATERIAALONDERZOEK

II.

door W. G. BURGERS.

3. Het keuren van te bakken speksteen

Speksteen is een zacht materiaal, dat precies op maat bewerkt kan worden. Na de bewerking kan men het door bakken (verhitten op circa 1200 °C, waarbij omstreeks 6% water uittreedt) in een vaste, harde, hittebestendige steensoort omzetten. Bij het bakken gebeurt het echter soms, dat bepaalde plaatsen zwellen en dientengevolge scheuren, waardoor het werkstuk bedorven wordt. Men zou graag van te voren deze stukken kunnen afkeuren. Het leek waarschijnlijk, dat het al of niet scheuren met structuurverschillen in het materiaal samenhangt. Dus: Röntgenonderzoek.

Fig. 1a vertoont een opname van het ongegloeide materiaal op een plek, die achteraf bij het bakken niet bleek op te zwellen, fig. 1b een dergelijke opname van een plek, waar dit wel het geval was.

Uit een beschouwing der foto's blijkt, dat zij hetzelfde systeem van interferentieringen²⁾ vertoont. Er is echter dit verschil, dat de intensiteitsverdeling langs de omtrek van deze ringen op foto 1a gelijkmatig is, op foto 1b niet: hier zijn op de omtrek bepaalde intensiteitsmaxima

aanwezig. Hieruit kan afgeleid worden dat, terwijl er geen eenigszins belangrijk verschil in samenstelling tussen de niet- en de wel-zwellende plekken bestaat (gelijke ring-systemen!), er wel een verschil in textuur aanwezig is: de bij het bakken opzwellende plekken vertoonen een uitgesproken voorkeurs-oriëntatie der kristallieten („vezelstructuur”). Zonder in te gaan op de verklaring, waarom deze andere structuur tot het zwellen bij het bakken leidt, hebben wij hiermee een middel gevonden om de speksteen reeds vóór het bakken te keuren.

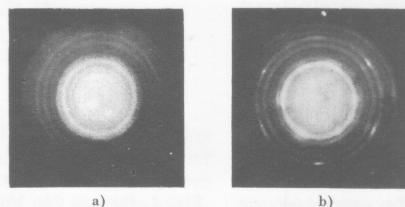


Fig. 1. Opnamen van speksteen vóór het bakken: a) een plek, die later bij het bakken niet opzwol; b) een plek, waar later bij het bakken een zwelling optrad.

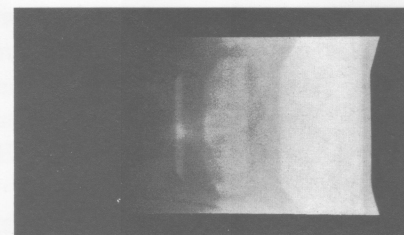


Fig. 4. Foto van de matglazen plaat in het model van de oude zaal (fig. 1a). De tooneel-opening ligt rechts. Men ziet de snelle afname van de verlichting naar links: achter in de zaal was de nuttige geluidsintensiteit veel te klein. De lichte trapeziumvormige plek in de nabijheid van het tooneel komt door de reflectie van het voorste gedeelte van het plafond, welke niet door de dwarswanden belemmerd wordt.

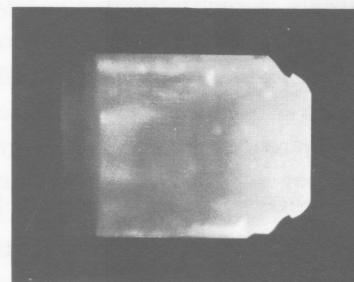


Fig. 8. Foto van de matglazen plaat in het model van de nieuwe zaal (fig. 1b). De tooneel-opening ligt weer rechts. De verdeling van de verlichting (nuttige geluidsintensiteit) is veel gelijkmatiger dan in fig. 4. Het achterste gedeelte van de benedenzaal (links) is nog wat donker (zie fig. 11).

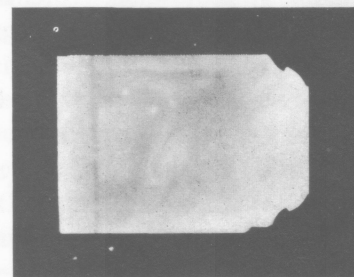


Fig. 11. Foto van de matglazen plaat in het model, zoals in fig. 8, doch met hellende achterwand onder het balkon. Nu ontvangt ook het onder het balkon gelegen gedeelte van de zaal een voldoende intensiteit.

Oppervlaktehelderheden, grooter dan die van de zon

Deze zijn kort geleden in het Philips laboratorium bereikt, door het vermogen van het door Bol (Eindhoven) beschreven watergekoelde superhoogedruk-kwiklampje (De Ingenieur 50, E 91, 1935) nog verder op te voeren. Theoretische overwegingen van Elenbaas deden vermoeden, dat een verkleining van de diameter een vooruitgang in oppervlaktehelderheid zou brengen. Een lampje met 1 mm binnen- en 3 1/2 mm buitendiameter werd geconstrueerd; dit bleek bij een elektrodenafstand van 10 mm en 805 volt spanning (op wisselstroom brandend), een vermogen van 1400 watt op te nemen, met een lichtsterkte van 11000 kaars. De druk bedroeg ongeveer 200 at. In de middellijn van de ontladingsbaan was de oppervlaktehelderheid 180000 kaars/cm² (gemeten door het lampje vergroot af te beelden en een fotocel met een smalle spleet, parallel aan het buisje, over de doorsnede van het beeld te verschuiven). De zon heeft, vanaf het aardoppervlak gezien, „slechts” een oppervlaktehelderheid van 165000 kaars/cm² (volgens International Critical Tables).

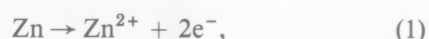
Onderzoek naar een nieuw type herlaadbare batterij, de nikkel-hydridecel

J. J. G. Willems

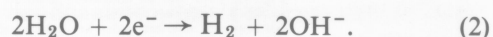
De auteur beschrijft het researchwerk dat verricht is voor een nieuw type herlaadbare batterij. Van het resultaat, een hermetisch afgesloten nikkel-hydridecel, mag verwacht worden dat het, dank zij de stabiliteit van de elektrode materialen en een goede beheersing van waterstof- en zuurstofstromen in het systeem, na duizend maal telkens binnen een uur te zijn geladen en ontladen nog een goed bruikbare stroombron is.

Korte schets van de historische achtergrond

De eerste galvanische cel — of juister: 'batterij' van galvanische cellen — is de zuil van Volta geweest (1800), die bestond uit een aantal op elkaar gestapelde schijven zink en zilver (of koper), van elkaar gescheiden door in zout water gedrenkte stukken karton (fig. 1)^[1]. De elektrische energie uit iedere afzonderlijke cel wordt geleverd, zoals men natuurlijk pas veel later begreep, enerzijds door de oxidatie van het zink tot zinkionen, waarbij elektronen vrijkomen:



en anderzijds door de reductie van water tot gasvormig H_2 , waarbij elektronen worden opgenomen:

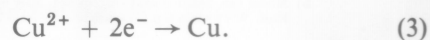


Waardoor juist deze materialen deze functies vervullen, kan men begrijpen uit de positie die ze ten opzichte van elkaar innemen in de spanningsreeks der elementen (fig. 2). Deze thermodynamisch bepaalde positie in de reeks is overigens niet de enige factor daarbij: ook de kinetiek dient hiervoor in rekening gebracht te worden.

Het zilver (of koper) wordt in de cel van Volta niet verbruikt, maar heeft een katalyserende functie bij de reductie van het water; het vervult voorts uitsluitend de rol van stroomgeleider (fig. 3). Zink wordt wegens zijn negatieve elektrodepotentiaal nog steeds als materiaal voor negatieve elektroden toegepast, bij voorbeeld in de zgn. droge batterijen, maar het gebruik

van water (elektrodepotentiaal nul in fig. 2) als oxidator aan de positieve elektrode is slechts tot deze eerste galvanische cel beperkt gebleven. De bronspanning (e.m.k.) van dit element bedraagt immers ook niet meer dan 0,5 V.

In 1836 ontwikkelde Daniell een galvanische cel, waarbij ditmaal aan een positieve elektrode van koper koperionen uit een kopersulfaatoplossing gereduceerd worden tot metallisch koper voor de nodige elektronenoverdracht:



De negatieve elektrode bestond uit een geamalgameerde zinken staaf, die gedompeld was in verdund zwavelzuur. De amalgamering voorkomt een te sterke

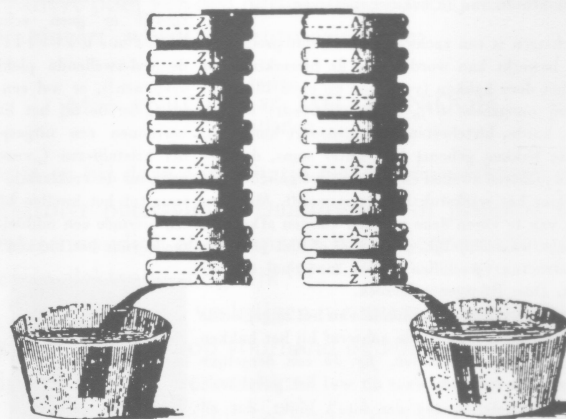


Fig. 1. De zuil van Volta, zoals weergegeven in de eerste publicatie erover (in Phil. Trans. R. Soc. 90, 403, 1800)^[1]. A staat voor zilver (argent) en Z voor zink.

Dr. ir. J. J. G. Willems, medewerker van de Philips produktdivisie Licht, Eindhoven, destijds medewerker van het Philips Natuurkundig Laboratorium te Eindhoven.

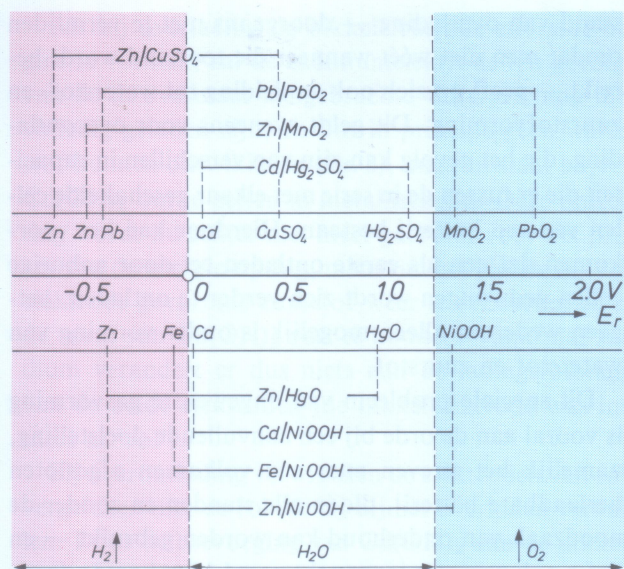


Fig. 2. De elektrodepotential E_r van een aantal der meest bekende elektrode materialen (steeds in combinatie met een elektrolyt), bepaald ten opzichte van een reversibele waterstofelektrode in hetzelfde elektrolyt. De volgorde van links naar rechts is die van een toenemende oxidatiepotential (van onedel naar edel in de spanningsreeks der elementen). Is de elektrodepotential kleiner dan 0 V (de elektrodepotential van het koppel water/waterstof), dan heeft het elektrode materiaal de neiging H_2O te reduceren tot H_2 (het rode gebied); is de elektrodepotential groter dan +1,23 V (de elektrodepotential van het koppel water/zuurstof), dan neigt het materiaal ertoe H_2O tot O_2 te oxideren (het blauwe gebied). Alléén het elektrodenpaar van de Weston-cel (Cd/Hg_2SO_4) vertoont, gezien de ligging der beide elektrodepotentialen, géén neiging om water te ontleiden. Boven de abscis zijn aangegeven de elektrodepotentialen van materialen die in combinatie met een zuur of neutraal elektrolyt gebruikt worden, beneden de abscis de potentialwaarden van materialen die in een alkalisch milieu worden toegepast.

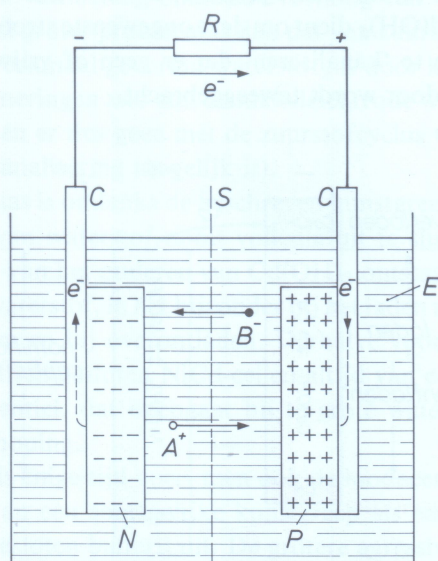


Fig. 3. Schema van een stroomleverende galvanische cel, zoals het zich al vrij vroeg in de historische ontwikkeling aftekende. P actief materiaal voor een positieve elektrode. N actief materiaal voor een negatieve elektrode. e^- elektronen. E elektrolyt. A^+ positieve ionen. B^- negatieve ionen. C stroomgeleiders. S separator. R uitwendige weerstand.

(neven)reactie tussen het zink en het zwavelzuur, waardoor anders ook bij het niet-functioneren van de cel waterstofgas wordt ontwikkeld en het zink wordt verbruikt (een proces dat ook de werking van de cel van Volta ongunstig beïnvloedt). Om te verhinderen dat de koperionen op het zink neerslaan, waartoe zij immers wegens hun positie in de spanningsreeks geneigd zijn, werden de beide elektroden in afzonderlijke compartimenten, ieder met hun eigen elektrolyt, ondergebracht. Een poreuze scheidingwand, oorspronkelijk van runderslokdarm, zorgde voor de noodzakelijke mogelijkheid van ionentransport tussen de elektroden.

De eerste herlaadbare batterij, de loodaccu, dateert reeds van 1860. Deze accu van Planté bestond uit twee in elkaar gewikkelde loden platen die van elkaar gescheiden waren door stroken flanel. Dit 'pakket' werd in een zwavelzuuroplossing gedompeld, waarna de elektroden 'geformeerd' werden door laden met niet-herlaadbare batterijen. (Stroomgeneratoren als de dynamo waren toen al uitgevonden, maar de toepassing ervan was nog niet wijd verbreid.)

Van ongeveer 1865 dateert ook de ontwikkeling van 'droge' cellen, waarbij de oxiderende substantie een vaste stof is (metaaloxiden) en het elektrolyt sterk is geïmmobiliseerd, waardoor de batterij 'lekdticht' kon worden uitgevoerd. Leclanché gebruikte als positieve elektrode een mengsel van mangaandioxide en koolstof, met daarin een koolstaaf als stroomgeleider. Het elektrolyt bestond aanvankelijk uit een verzadigde ammoniumchloride-oplossing, die bij een latere ontwikkeling gebonden (geïmmobiliseerd) zou worden met behulp van zetmeel en/of kalk. Het inmiddels bij de toenmalige fabricage van batterijen steeds meer toegepaste geamalgameerde zink deed wederom dienst voor de negatieve elektrode. Nu, meer dan een eeuw later, is de Leclanché-cel nog steeds de meest gebruikte droge batterij.

Behalve aan een batterij als stroombron ontstond al vroeg de behoefte aan een referentie-spanningsbron met een zo constant mogelijk voltage, de zgn. standaardcellen. In zulke cellen wordt gewerkt met fasen-evenwichten; gedurende het gebruik verschuift slechts

- [1] Zie voor de historische gegevens b.v. ook:
 G. W. Vinal, Primary batteries, Wiley, New York 1950; in het bijzonder het eerste hoofdstuk, blz. 1-24;
 G. W. Heise en N. C. Cahoon, The primary battery, Vol. 1, Wiley, New York 1971, eveneens het eerste hoofdstuk, blz. 1-58;
 S. U. Falk en A. J. Salkind, Alkaline storage batteries, Wiley, New York 1969, wederom het eerste hoofdstuk, blz. 1-41.
 Zie voor de hierbij aan de orde komende algemene principes van de batterij b.v.:
 V. S. Bagotskii en A. M. Skundin, Chemical power sources, Academic Press, New York 1980;
 J. O'M. Bockris e.a. (red.), Comprehensive treatise of electrochemistry, Vol. 3, Plenum, New York 1981.

de ligging ervan, in geringe mate overigens, terwijl de aard van de daaraan deelhebbende stoffen niet verandert. Bekend is de cel van Weston (1892), waarbij de positieve kwik/kwiksulfaat-elektrode en de negatieve cadmiumamalgaam/cadmiumsulfaat-elektrode zich bevinden in een met kristallen van genoemde zouten verzadigde oplossing. De bronspanning van de Weston-cel bedraagt 1,01463 V bij 25 °C en zijn temperatuurafhankelijkheid is slechts $-4,05 \times 10^{-5}$ V/°C.

Een belangrijke doelstelling bij de ontwikkeling van batterijen was — en is nog steeds — het zo efficiënt mogelijk gebruiken van de — vaak dure — elektrode-materialen, waartoe natuurlijk herlaadbare batterijen zich het best lenen. Aan zulke batterijen zal men om te beginnen de eis willen stellen dat er geen of weinig spontane nevenreacties optreden die tot een onproductief verlies van actief materiaal leiden, dus zo min mogelijk 'zelf-ontlading'. Dit streven heeft omstreeks de eeuwwisseling geleid tot de ontwikkeling van het type van de alkalische herlaadbare batterij, als de nikkel-cadmium- en de nikkel-ijzerceel (Junger en Edison). Alkalische reagentia zijn in het algemeen minder agressief ten opzichte van metalen en metaaloxiden dan zuren.

Overigens is de mogelijkheid van dergelijke, geen stroom leverende nevenreacties moeilijk principieel uit te sluiten, aangezien de meeste elektrode-materialen met waterige elektrolyten geen thermodynamisch stabiele combinatie vormen en zij altijd geneigd zijn om met water te reageren onder vorming van waterstof of zuurstof, afhankelijk van de ligging van hun elektrodepotentiaal. Zoals fig. 2 laat zien, is alleen bij het elektrodenpaar van de cel van Weston de ligging van de elektrodepotentiaal zodanig dat er zich geen spontane ontleding van water kan voordoen. Het spreekt vanzelf dat men een uitweg voor deze moeilijkheid kan zoeken in het werken met niet-waterige elektrolyten, maar in de praktijk wordt meestal genoeg genomen met elektroden die dan weliswaar niet thermodynamisch, maar in voldoende mate kinetisch stabiel zijn, dat wil zeggen dat men elektrode-materialen kiest of zodanig behandelt (bij voorbeeld door amalgameren) dat ze met een heel kleine snelheid met het elektrolyt reageren.

In hoeverre er dan toch ongewenste hoeveelheden waterstof of zuurstof worden geproduceerd, hangt dan vaak af van de ladingstoestand van de batterij en van de grootte van de laadsnelheid. De batterij zal men immers in de praktijk alleen volledig kunnen laden door een laadspanning te gebruiken die *groter* is dan de bronspanning, en daarmee begeeft men zich nog verder in het instabiele gebied (fig. 2). Deze laadspanning zal weer groter moeten zijn naarmate men de batterij sneller wil laden. Het bereiken van de toe-

stand van overlading — doorgaans niet te vermijden omdat men niet weet wanneer die toestand wordt bereikt — geeft op zich ook aanleiding tot waterstof- en zuurstofvorming. Dit geldt eveneens voor overontlading, die het gevolg kan zijn van verschillen in capaciteit die er tussen de in serie met elkaar geschakelde cellen van een batterij bestaan. Hierdoor kan het voorkomen dat een als eerste ontladen cel door naburige cellen gedwongen wordt zich verder te ontladen, hetgeen wederom alleen mogelijk is onder vorming van waterstof en zuurstof.

Dit speciale probleem van ongewenste gasvorming is vooral aan de orde bij een aanvullende doelstelling, namelijk het streven naar een volkomen afgesloten herlaadbare batterij, die in alle standen en zonder de noodzaak van onderhoud kan worden gebruikt — en liefst ook nog vele jaren achtereen! Men kan de droge batterij als een vroege oplossing in deze richting zien, maar daarbij is dan niet de wens gerealiseerd van de herlaadbaarheid. Bovendien is de daarbij gerealiseerde 'lektheid', zoals de vooroorlogse gebruikers van zo'n droge batterij wel eens tot hun ongenoegen zullen hebben ervaren, nog iets anders dan de uiteindelijk nagestreefde hermetische afsluiting van de batterij.

In deze richting zijn in het bijzonder goede resultaten geboekt met NiCd-cellen. Sinds 1950 past men bij deze cellen de kunstgreep toe van het aanbrengen van een overmaat cadmiumhydroxide, $\text{Cd}(\text{OH})_2$, aan beide elektroden (fig. 4). Bij overlading en overontlading zoekt de elektrische stroom zich een weg, die in een gesloten cel tot een hoge gasdruk kan leiden. De overmaat $\text{Cd}(\text{OH})_2$ dient om deze ongewenste stroomdoorgang zo te 'kanaliseren' dat er geen of vrijwel geen schade door wordt teweeggebracht.

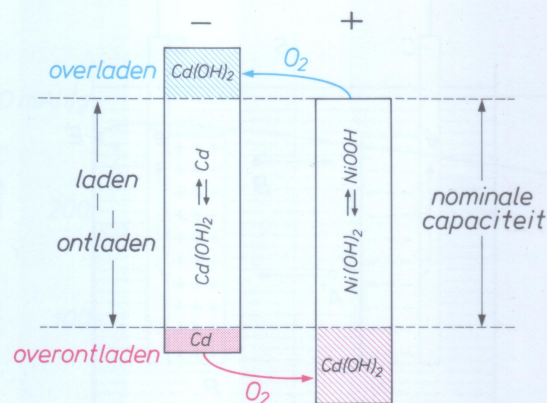


Fig. 4. Schematische voorstelling van de bescherming tegen overlading en overontlading die sinds ongeveer 1950 bij NiCd-cellen wordt toegepast. Door toevoeging van $\text{Cd}(\text{OH})_2$ aan beide elektroden wordt zowel bij overlading (het blauwe gebied) als overontlading (het rode gebied) een zuurstofcyclus bewerkstelligd. De met dit doel toegevoegde $\text{Cd}(\text{OH})_2$ is gearceerd aangegeven. Er is ook een overmaat cadmium (rood) aan de cadmiumelektrode toegevoegd, waarvan de functie op blz. 360 wordt uitgelegd.

Als bij overlading de nikkelelektrode zuurstof begint te vormen, zal de cadmiumelektrode ten gevolge van de in overmaat aangebrachte $\text{Cd}(\text{OH})_2$ nog niet volledig geladen zijn, en dus in principe geen waterstof kunnen ontwikkelen (fig. 2), maar in staat blijven $\text{Cd}(\text{OH})_2$ om te zetten in metallisch Cd. Deze omzetting wordt nu echter niet meer gebruikt voor het proces van de energie-opslag, maar om het aan de nikkel-elektrode gevormde zuurstof weer te reduceren en in de vorm van $\text{Cd}(\text{OH})_2$ vast te houden. Vanaf dat stadium verandert er dus niets aan de ladingstoestand van de beide elektroden (de nikkelelektrode was immers al 'vol').

Bij overontlading verwisselen de elektroden van rol, vergeleken met de rol die zij bij het overladen vervullen. Door de toevoeging van $\text{Cd}(\text{OH})_2$ aan de nikkel-elektrode zal deze elektrode in lege toestand de potentiaal van de cadmiumelektrode aannemen, en dus wederom de ontwikkeling van waterstof kunnen tegen gaan. De zuurstof die in het geval van overontlading aan de lege cadmiumelektrode wordt geproduceerd, wordt in een zelfde reactiecyclus aan de nikkelelektrode gereduceerd. Men zou kunnen spreken van een met opzet aangebrachte 'chemische kortsluiting', die beide vormen van ongewenste stroomdoorgang via een zuurstofcyclus kanaliseert.

Het in overmaat aangebrachte $\text{Cd}(\text{OH})_2$ is, als gezegd, door de ligging van zijn elektrodepotentiaal, in principe in staat *te voorkomen dat er zich waterstofgas vormt* (en wel bij overlading aan de cadmiumelektrode en bij overontlading aan de nikkelelektrode). Dit is daarom van belang omdat de vorming van waterstof een veel groter probleem is dan dat van zuurstof, aangezien eenmaal gevormd waterstofgas door kinetische belemmeringen *niet* aan de nikkelelektrode wordt omgezet (en er dus geen met de zuurstofcyclus vergelijkbare kanalisering mogelijk is).

Helaas is ondanks de beschreven kunstgreep de vorming van waterstof nooit volledig uit te sluiten. Als gevolg van het ouderen van $\text{Cd}(\text{OH})_2$ ontstaat er toch vaak waterstof, in het bijzonder bij het laden met grote stromen en bij overontladen. Derhalve voorziet men hermetisch gesloten NiCd-cellen altijd van een veiligheidsventiel, dat opengaat bij te grote waterstofgasoppeenhoping.

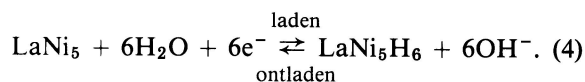
Sinds enige tijd voert men ook de loodaccu met behulp van een soortgelijke kunstgreep als een hermetisch gesloten batterij uit. De grotere agressiviteit van het zure elektrolyt maakt het in dit geval nog moeilijker gasoppeenhoping te kunnen uitsluiten, hetgeen in elk geval een speciaal aangepaste celconstructie nodig maakt, die ten koste gaat van de levensduur.

Het is tegen de hier geschetste achtergrond van het streven naar een hermetisch afgesloten, in alle standen

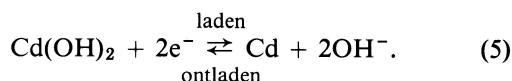
te gebruiken herlaadbare batterij met een zeer lange levensduur, die met grote snelheid kan worden geladen en ontladen en die een grote mate van overlading en overontlading verdraagt, dat men de thans te beschrijven onderzoeken in het Philips Natuurkundig Laboratorium moet bezien.

Oriënterend onderzoek aan LaNi_5 en LaNi_4Cu als elektrodemateriaal

Wat we in dit hoofdstuk willen beschouwen, is het gebruik van waterstof als 'brandstof' voor een herlaadbare batterij (en dus niet als produkt van een ongewenste nevenreactie, als in het voorgaande hoofdstuk veelvuldig aan de orde is geweest). Dat wil zeggen dat in de batterij tijdens het ontladen waterstof aan het oppervlak van een elektrode moet kunnen worden geoxideerd, en dat tijdens het laden van de batterij waterstof in deze elektrode moet kunnen worden opgeslagen. Als materiaal voor zulk een elektrode hebben wij in het Philips Natuurkundig Laboratorium vooral LaNi_5 en daaraan verwante verbindingen onderzocht. Dit materiaal stelt ons in staat om water, dat in het elektrolyt aanwezig is, elektrochemisch te reduceren, de gevormde waterstof in de vorm van een hydride te binden en de waterstof vervolgens weer tot water te laten oxideren:



De vorming van waterstof is hier dus, nogmaals gezegd, geen ongewenste nevenreactie, maar onderdeel van het chemische systeem dat de opslag van energie verzorgt. LaNi_5H_6 is daarbij te gebruiken als het actieve materiaal van de *negatieve* elektrode, dat bij het ontladen wordt omgezet in LaNi_5 , waarna het LaNi_5H_6 door laden weer wordt teruggevormd. Het metaalhydride is in dit opzicht te vergelijken met het cadmium aan de negatieve pool van de NiCd-cel:



Vergelijkt men de elektrode reacties van LaNi_5 evenwel met die in de cel van Volta — omdat bij beide een omzetting van water plaatsvindt — dan ziet men dat ze in dat geval juist een tegenovergestelde functie hebben. Bij de zuil van Volta geschiedt de omzetting van water in waterstof, en de daarmee gepaard gaande opneming van elektronen, bij het ontladen aan de positieve pool, en bij het LaNi_5 tijdens het laden aan de negatieve pool (waarna de omzetting in de omgekeerde richting bij het ontladen elektronen doet afgeven).

Van soortgelijke reacties wordt ook gebruik gemaakt bij de bekende reversibele waterstofelektrode,

waarbij platina het elektrodemateriaal is. Het verschil met LaNi_5 is in dit geval dat het waterstof als zodanig moet worden aangevoerd, daar waterstof niet door platina wordt geabsorbeerd. Met behulp van een dergelijke elektrode kan dus geen elektrische energie worden opgeslagen.

Ongeveer vijftien jaar geleden is ontdekt dat intermetallische verbindingen als LaNi_5 en TiFe grote hoeveelheden waterstofgas kunnen absorberen en weer desorberen bij drukken in de buurt van 1 atmosfeer en bij kamertemperatuur [2]. Fig. 5 geeft de absorptie- en desorptie-isothermen van $\text{LaNi}_5\text{-H}_2$ -systeem bij een aantal temperaturen [3]. Zoals de figuur illustreert, vertoont het systeem in een temperatuurgebied tot ongeveer 80 °C een fase-overgang tussen een waterstofarme en een waterstofrijke fase bij een constante evenwichtsdruk, de zgn. plateaudruk. Bij kamertemperatuur absorbeert LaNi_5 zes waterstofatomen bij een plateaudruk van 2 atmosfeer, terwijl het gevormde hydride bij een constante plateaudruk van 1,6 atm weer wordt omgezet in LaNi_5 onder afgifte van waterstofgas. De hoeveelheid waterstof die op deze wijze per volume-eenheid kan worden opgenomen (en weer afgegeven) is 40% groter dan de waterstofdichtheid in vloeibare waterstof bij 20 K! Zelfs bij een temperatuur van 80 °C kunnen er nog grote hoeveelheden waterstofgas reversibel in LaNi_5 worden opgeslagen bij een druk van nog geen 20 atmosfeer. De optredende absorptie-desorptiehysterese, die groter is bij hogere evenwichtsdruk, en die resulteert in energieverlies, is vanzelfsprekend een ongewenst effect. Vergeleken met TiFe vertoont LaNi_5 lagere evenwichtsdrukken bij dezelfde temperaturen en een veel geringere absorptie-desorptie-hysterese.

Bij herhaald absorberen en desorberen van waterstofgas valt LaNi_5 uiteen in kleine stukken (fig. 6) en vormt er zich een fijn poeder met een specifieke oppervlakte van 0,25 m²/g. Het poeder vertoont een grote katalytische activiteit, hetgeen in combinatie met de grote diffusiecoëfficiënt voor H-atomen in het metaalrooster tot grote sorptiesnelheden leidt. Bij 20 °C duurt een volledige waterstofdesorptie niet meer dan enkele minuten. Daar komt nog bij dat zowel LaNi_5 als LaNi_5H_6 goede elektrische geleiders zijn. Al met al lijkt LaNi_5 derhalve een veelbelovend elektrodemateriaal voor een herlaadbare batterij te zijn.

Hoe echter gedraagt zich LaNi_5 in aanwezigheid van het elektrolyt? Om dit vast te stellen hebben wij dit materiaal en verwante verbindingen in een zgn. halfcelopstelling beproefd. Deze materialen, die zeer hard en bros zijn, hebben wij in de vorm van een poeder, verkregen door het herhaald laten absorberen en desorberen van waterstofgas, gemengd met koperpoe-

der. Dit mengsel liet zich door koud-persen tot een poreuze 'pil' vormen, die, naar steeds is gebleken, aan alle aan een elektrode te stellen eisen voldeed [3]. In de halfcel gebruikten wij als elektrolyt 6 M KOH, als

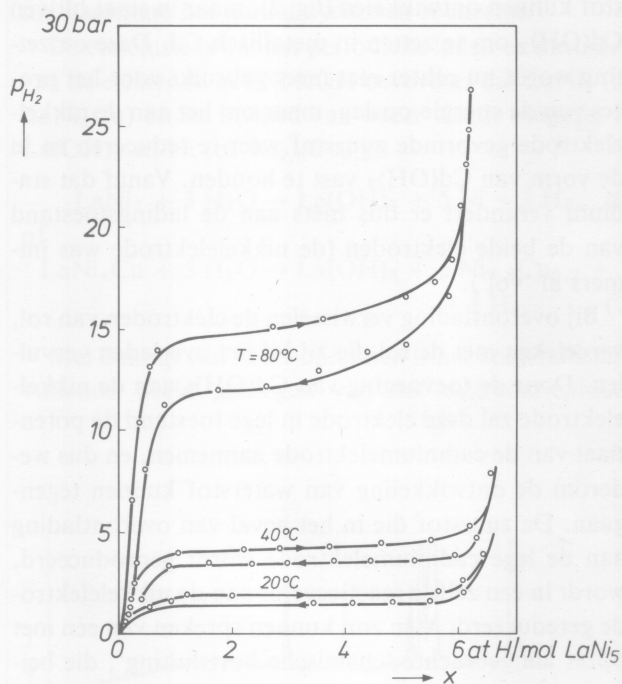


Fig. 5. Absorptie- en desorptie-isothermen (waterstofdruk p_{H_2} als functie van de concentratie x aan waterstofatomen) van het systeem $\text{LaNi}_5\text{-H}_2$ bij 20, 40 en 80 °C.

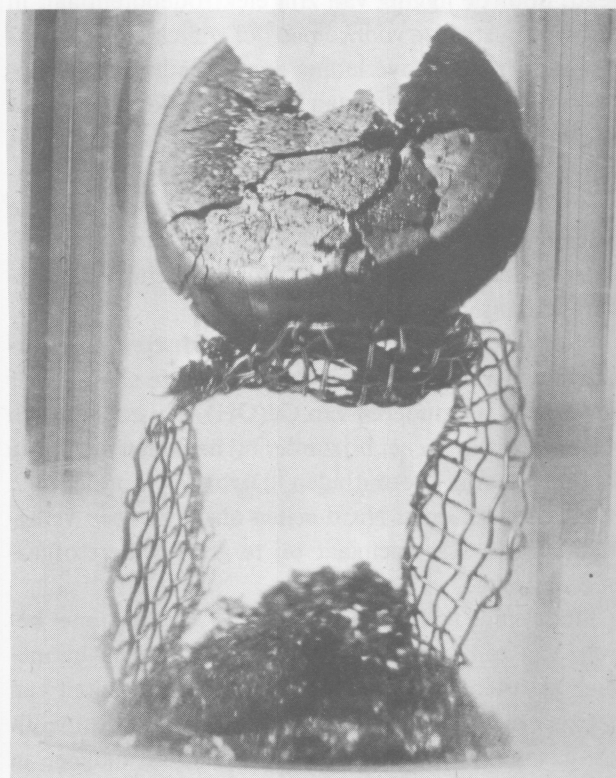


Fig. 6. Als men herhaaldelijk waterstof laat absorberen en desorberen door LaNi_5 valt dit materiaal geleidelijk uiteen in kleine korrels, die hier als een bergje onder het als zeef fungerende metaalgaasje te zien zijn. (Dit is al het effect van één waterstofabsorptie door een LaNi_5 -gieteling.)

tegenelektrode platina en als referentie-elektrode een Hg/HgO/6 M KOH-elektrode (fig. 7) [3]. Fig. 8 toont een in deze halfcel gemeten laad- en ontladcurve van een LaNi₅-elektrode. De curven corresponderen, zo-

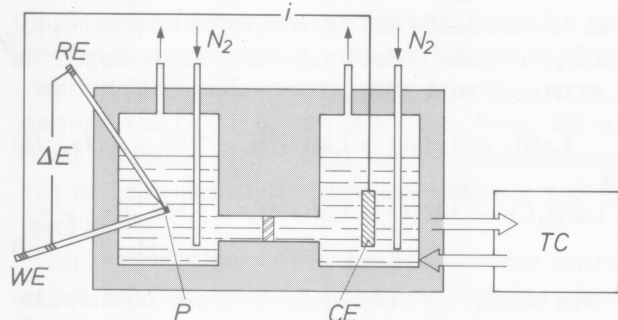


Fig. 7. Schema van de 'halfcel', waarmee vele elektrochemische metingen zijn verricht. WE de werkelektrode, die aan het uiteinde bestaat uit een poreuze pil *P* van het te onderzoeken actieve materiaal, b.v. LaNi₅. RE referentie-elektrode, doorgaans een Hg/HgO/6 M KOH-elektrode. CE tegenelektrode van platina. ΔE is het spanningsverschil tussen WE en RE bij een stroom *i*. Het elektrolyt wordt vrij van zuurstof gehouden door het doorvoeren van stikstof. De halfcellen zijn dubbelwandig uitgevoerd en worden op een temperatuur van 25 °C gehouden door de thermostaat TC.

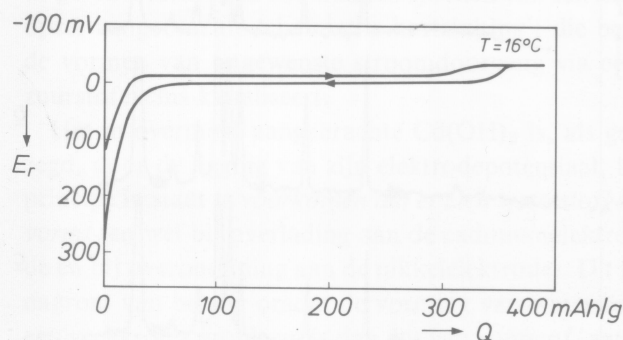


Fig. 8. Laad- en ontladcurve van een LaNi₅-elektrode ten opzichte van de reversibele waterstofelektrode (E_r als functie van de lading *Q*), gemeten in 6 M KOH en bij 16 °C.

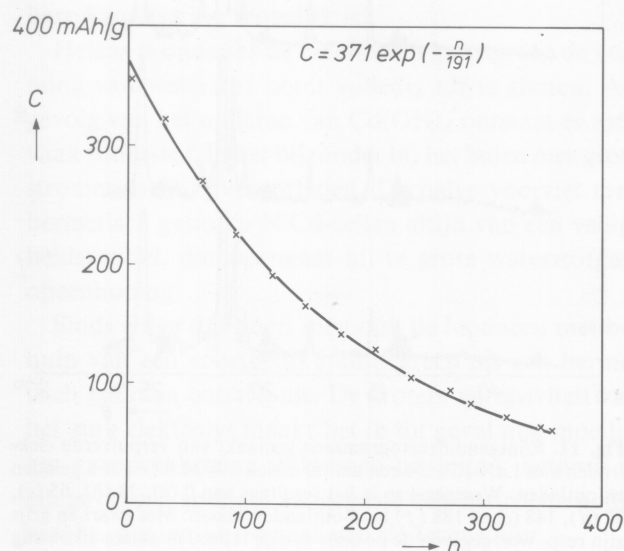


Fig. 9. De opslagcapaciteit *C* van een LaNi₅-elektrode als functie van het aantal laad-ontlaadcyclussen (*n*).

als men ziet, met de absorptie- en desorptiecurven uit fig. 5. Uitgaande van het feit dat de absorptie van één waterstofatoom gepaard gaat met de overdracht van één elektron (verg. 4), kan men berekenen dat de theoretische ladingsopslagcapaciteit voor de samenstelling LaNi₅H₆ 372 mAh/g bedraagt, hetgeen nog iets meer is dan de theoretische opslagcapaciteit voor een cadmiumelektrode (366 mAh/g). Dit is van belang omdat ons voor ogen stond de LaNi₅-elektrode als alternatief te gebruiken voor de cadmiumelektrode in een NiCd-batterij, om redenen die wij nog zullen geven.

Tegenover deze gunstige eigenschappen van LaNi₅ bleek echter een groot nadeel te staan. Bij de besproken elektrochemische metingen kwam al spoedig naar voren dat de opslagcapaciteit van LaNi₅-elektroden drastisch afneemt bij herhaald laden en ontladen. Zoals fig. 9 toont, neemt de opslagcapaciteit dan exponentieel af — na 100 cyclussen reeds met 40%. Dit maakt LaNi₅ zonder meer ongeschikt als elektrodemateriaal voor herlaadbare batterijen — althans indien men daaraan de hoge eisen wil stellen die in het vorige hoofdstuk zijn geformuleerd.

Wat wij bij ons onderzoek dan ook in de eerste plaats hebben nagestreefd, is te pogen de oorzaak van deze drastische afnemende van de opslagcapaciteit te vinden. Wij hebben bij dat onderzoek ook LaNi₄Cu betrokken, aan welk materiaal op ons laboratorium reeds werk was verricht. Dit materiaal absorbeert eveneens grote hoeveelheden waterstof, doet dit bij een voor de praktijk wat beter geschikte, lagere plateau-druk en blijkt dezelfde exponentiële afnemende van de opslagcapaciteit bij herhaald laden en ontladen te vertonen.

Dit oriënterende onderzoek is behalve met de elektrochemische methoden in hoofdzaak gedaan met behulp van röntgendiffractie en elektronenmicroscopie [3]. Fig. 10 geeft het resultaat van röntgendiffractie-opnamen aan poeders van LaNi₅, LaNi₄Cu en de hydriden

[2] Zie voor publicaties over de in de afgelopen 15 jaar ontdekte waterstofabsorberende verbindingen b.v.:

H. Zijlstra en F. F. Westendorp, *Solid State Commun.* 7, 857-859, 1969;

J. H. N. van Vucht, F. A. Kuijpers en H. C. A. M. Bruning, *Philips Res. Rep.* 25, 133-140, 1970;

J. J. Reilly en R. H. Wiswall Jr., *Inorg. Chem.* 13, 218-222, 1974;

F. A. Kuijpers, *Philips Res. Rep. Suppl.* 1973, No. 2;

H. H. van Mal, *Philips Res. Rep. Suppl.* 1976, No. 1;

K. H. J. Buschow, P. C. P. Bouten en A. R. Miedema, *Rep. Prog. Phys.* 45, 937-1039, 1982.

[3] Zie voor een meer uitvoerige en gedetailleerde beschrijving van deze onderzoeken het proefschrift van J. J. G. Willems, *Metal hydride electrodes; stability of LaNi₅-related compounds*, *Philips J. Res.* 39, Suppl. No. 1, 1984.

Aan deze onderzoeken hebben in belangrijke mate bijgedragen J. R. van Beek en H. C. Donkersloot, zie b.v.:

J. R. van Beek, H. C. Donkersloot en J. J. G. Willems, in: B. W. Baxter (red.), *Power Sources*, Vol. 10 (Proc. 14th Int. Power Sources Symp., Brighton 1984), Academic Press, Londen, hoofdstuk 21 (verschijnt binnenkort).

ervan die ontstaan door ze gedurende 24 uur aan waterstof van 150 atmosfeer bloot te stellen. De diagrammen *a* en *d* geven het patroon te zien van een uit hexagonale kristallen (ruimtegroep P6/mmm) bestaande fase. De diagrammen *c* en *e* vertonen hetzelfde patroon als *a* en *d*, met dit verschil dat alle pieken duidelijk zijn verschoven naar kleinere diffractiehoecken, hetgeen erop wijst dat bij behoud van dezelfde hexagonale kristalstructuur de roosterafstanden door het opnemen van waterstof zijn vergroot, en wel met 20% of meer.

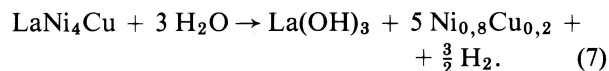
Wij hebben het effect van periodiek opnemen en afgeven van waterstof bestudeerd door elektroden van LaNi_5 en LaNi_4Cu een aantal malen achtereenvolgens in 6 M KOH te laden en te ontladen, en vervolgens diffractogrammen van poeders van het aldus behandeld elektrodemateriaal te maken (fig. 11). Na een aantal laad-ontlaadcyclussen verschijnen in de diagrammen — naast het diffractiepatroon van het uitgangsmateriaal en grote pieken bij $21,7^\circ$ en $25,3^\circ$, die aan het toegevoeg-

de koperpoeder moeten worden toegeschreven — kleine pieken en 'schouders' die respectievelijk afkomstig zijn van $\text{La}(\text{OH})_3$ en van vrij Ni (of van $\text{Ni}_{0,8}\text{Cu}_{0,2}$). De grootte van deze diffractiepieken neemt duidelijk toe naarmate het aantal cyclussen toeneemt.

De conclusie is dat het periodieke laden en ontladen van de elektrode in 6 M KOH bevordert dat LaNi_5 (of LaNi_4Cu) onder invloed van water wordt omgezet in $\text{La}(\text{OH})_3$ en Ni (of $\text{Ni}_{0,8}\text{Cu}_{0,2}$):



of



Met behulp van SEM-opnamen is het volgende aanvullende beeld gekregen van het degradatieproces

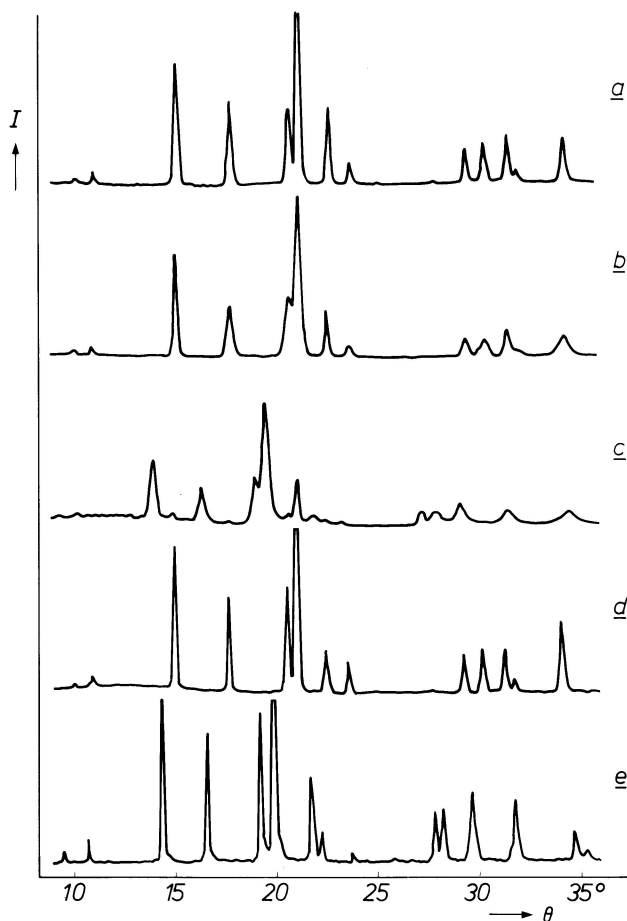


Fig. 10. Röntgendiffractogrammen (intensiteit I als functie van de reflectiehoek θ) van poeders van LaNi_5 en LaNi_4Cu vóór en na waterstofabsorptie (gedurende 24 uur bij 150 atmosfeer). *a*) Vermalen LaNi_5 . *b*) Verpulverd LaNi_5 door 100 maal absorberen en desorberen van waterstof. *c*) LaNi_5H_6 , gevormd door het materiaal van (*a*) waterstof te laten opnemen. *d*) Vermalen LaNi_4Cu . *e*) Hetzelfde materiaal als (*d*) na opname van waterstof.

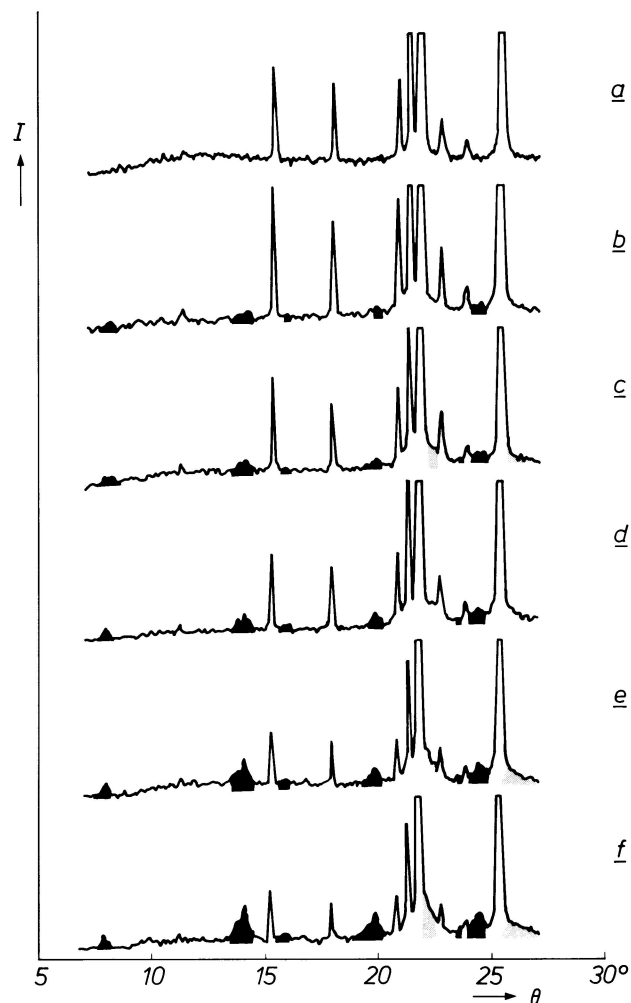


Fig. 11. Röntgendiffractogrammen gemaakt van verpulverde elektroden van LaNi_4Cu die een aantal malen in 6 M KOH zijn geladen en ontladen. Weergegeven is het resultaat van 0 (*a*), 23 (*b*), 65 (*c*), 87 (*d*), 148 (*e*) en 188 (*f*) laad-ontlaadcyclussen. Met zwart en grijs zijn resp. weergegeven de posities van de reflectiemaxima afkomstig van $\text{La}(\text{OH})_3$ en $\text{Ni}_{0,8}\text{Cu}_{0,2}$. De grote pieken bij $21,7^\circ$ en $25,3^\circ$ zijn toe te schrijven aan het aan het elektrodemateriaal toegevoegde koperpoeder. De overige pieken zijn afkomstig van LaNi_4Cu .

waaraan LaNi_5 bij periodiek elektrochemisch laden en ontladen blootstaat.

Fig. 12a toont de toestand van het materiaal in een nog niet gebruikte elektrode. De breuken die men ziet zijn bij het vervaardigen van de elektrode ontstaan, tijdens het verpulveren in een H_2 -atmosfeer (fig. 6). Na 12 laad-ontlaadcyclussen (fig. 12b) verschijnen aan het oppervlak de eerste naaldjes van $\text{La}(\text{OH})_3$, terwijl tevens het aantal breuken en scheuren is toegenomen.

van LaNi_5 vrijwel nul is. Ook is de snelheid van deze omzetting van LaNi_5 in $\text{La}(\text{OH})_3$ en Ni niet, zoals men zou verwachten, evenredig met de grootte van het oppervlak, maar, getuige de exponentiële afneming van de opslagcapaciteit, met de *hoeveelheid resterend actief materiaal* — dus evenredig met de hoeveelheid waterstof die wordt opgeslagen. Dit doet vermoeden dat de ontleding van LaNi_5 in verband staat met het absorptie- en desorptieproces.

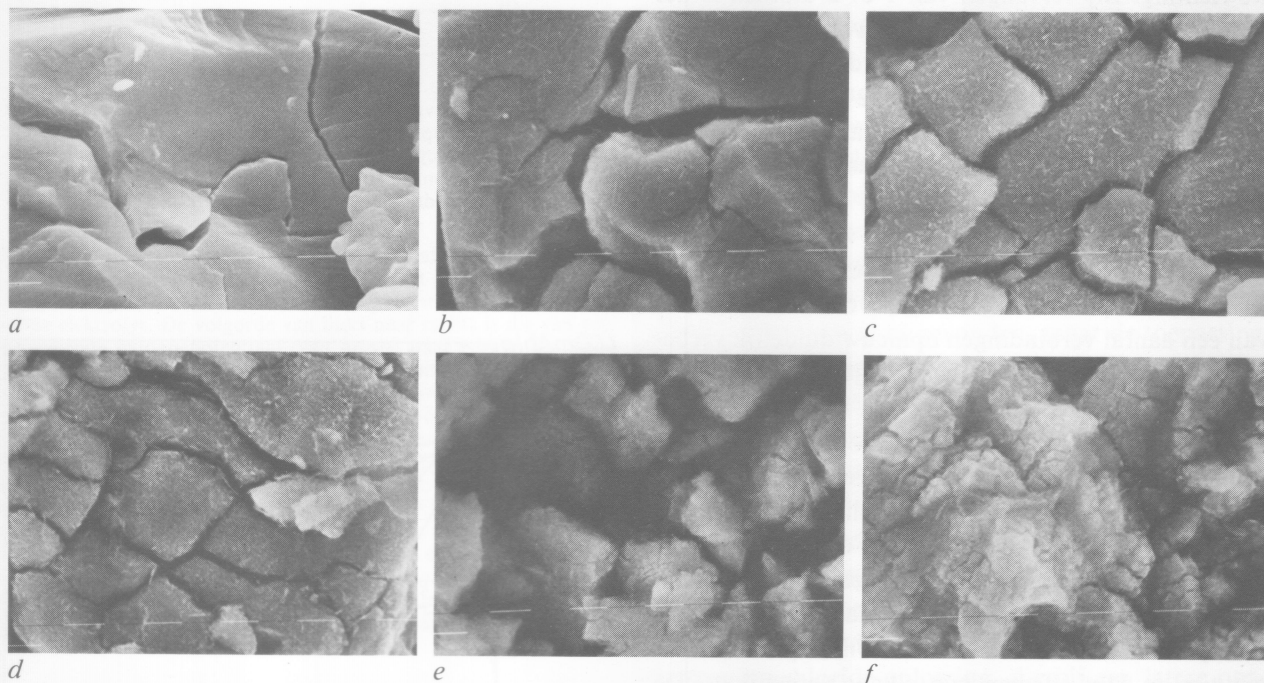


Fig. 12. SEM-opnamen van elektroden van LaNi_5 die herhaaldelijk zijn geladen en ontladen. Weergegeven is het resultaat na 0 (a), 12 (b), 25 (c), 63 (d), 176 (e) en 359 (f) laad-ontlaadcyclussen. Een streepje is $1\ \mu\text{m}$ groot. Naaldjes $\text{La}(\text{OH})_3$, die vanaf (b) reeds zichtbaar zijn, hebben in (f) het oorspronkelijke materiaal geheel overwoekerd.

In fig. 12c is, na 25 cyclussen, het aantal naaldjes aanzienlijk geworden, en is de korrelgrootte gemiddeld met een factor drie afgenomen. In fig. 12e is het preparaat volkomen overwoekerd met $\text{La}(\text{OH})_3$ en in fig. 12f (na 359 cyclussen) is de omzetting van LaNi_5 in $\text{La}(\text{OH})_3$ vrijwel volledig.

De drijvende kracht voor de ontleding van LaNi_5 in 6 M KOH is de sterke affiniteit van LaNi_5 voor water. De winst aan vrije energie voor deze oxidatiereactie is $472\ \text{kJ/mol}$ LaNi_5 — dat is bijna $4 \times$ de vormingswarmte van LaNi_5 !

De feitelijke oxidatiereactie zal totstandkomen aan het grensvlak tussen het metaal en het elektrolyt. Zoals we gezien hebben, blijft de omzetting echter niet beperkt tot het oppervlak, maar is vrijwel volledig. Dit is een merkwaardig feit, aangezien de beweeglijkheid van lanthaan bij kamertemperatuur in het rooster

Dit heeft ons gebracht tot de zienswijze dat het 'ademen' van het rooster een soort peristaltische beweging zou kunnen geven, die het lanthaan dat zich in het inwendige van het rooster bevindt, naar het oppervlak zou drijven.

De met het 'ademen' van het rooster gepaard gaande mechanische spanningen zijn natuurlijk groter naarmate de volumeveranderingen bij het opnemen en afgeven van waterstof groter zijn. In het geval van LaNi_5 kan de volumevergroting door opname van waterstof zelfs tot 24% van het uitgangsvolume bedragen.

Wij hebben derhalve gezocht naar verwante, eveneens waterstof absorberende, intermetallische verbindingen die bij deze absorptie minder sterk uitzetten dan LaNi_5 , en dus in mindere mate aanleiding geven tot diffusie en oxidatie van lanthaan.

Op zoek naar meer stabiel elektrodemateriaal

Uit het werk van Van Mal, Buschow en Kuijpers [2] op ons laboratorium was reeds bekend dat een gedeeltelijke vervanging van Ni door Co in LaNi_5 leidt tot een aanzienlijke vermindering van de volumevergroting bij hydrering. In totaal hebben wij zo'n twintigtal intermetallische AB_5 -verbindingen gemaakt waarbij La en Ni gedeeltelijk zijn vervangen door andere metalen. Zoals fig. 13 laat zien, heeft het vervangen van 3,3 Ni-atomen door Co het sterkste effect in de gewenste richting. Bij vervangen van 1 of 2 atomen is het effect veel minder groot, en bij vervangen van 4 of 5 atomen doen er zich zeer afwijkende, nog niet goed begrepen effecten voor [3]. Behalve een verminderde capaciteitsafnemening bij herhaald laden en ontladen zien we dat in alle gevallen ook de aanvangscapaciteit vermindert.

Als men bij het maken van deze verbindingen ook nog een kleine hoeveelheid aluminium aan de samenstellende componenten toevoegt, wordt de stabiliteit van een aantal verbindingen opnieuw duidelijk verbeterd, in het bijzonder de verbindingen met 2 à 3 atomen Co (fig. 14). De stabiliteit van LaNi_5 zelf wordt niet beïnvloed door deze kleine toevoeging. Een zelfde stabiliteitsverbetering wordt ook verkregen bij toevoeging van kleine hoeveelheden silicium. Van beide toevoegingen mag men verwachten dat ze de diffusie van lanthaan in het metaalrooster bemoeilijken of een beschermend huidje aan het oppervlak doen ontstaan.

Wij willen hier nu niet alle door ons beproefde substituties en hun effecten met elkaar vergelijken. De verbinding $\text{La}_{0,8}\text{Nd}_{0,2}\text{Ni}_{2,5}\text{Co}_{2,4}\text{Si}_{0,1}$ bleek bij uitstek geschikt voor ons doel te zijn. Dit elektrodemateriaal heeft een aanvangscapaciteit van 290 mAh/g en na duizend laad-ontlaadcyclussen is de resterende capaciteit nog 70% (fig. 15). De uitnemende eigenschappen van deze verbinding worden ook nog geïllustreerd door de SEM-opnamen, weergegeven in fig. 16. Men ziet hier dat er na 666 cyclussen nog maar betrekkelijk weinig $\text{La}(\text{OH})_3$ -naaldjes aanwezig zijn en dat de gevormde brokstukken nog steeds het hoekige karakter van niet gecorrodeerde kristallen vertonen (vergelijk met fig. 12).

De vraag bleef of de gerealiseerde stabiliteitsverbetering inderdaad samenhangt met een geringe volumevergroting bij hydrering. Om te beginnen hebben wij vastgesteld dat de capaciteitsvermindering van de elektroden alleen plaatsvindt bij herhaald laden en ontladen en niet het gevolg is van een loutere aanraking met 6 M KOH gedurende lange tijd. Voorts hebben wij de volumevergroting ΔV door H_2 -absorptie gemeeten met behulp van röntgendiffractiemethoden en uitgezet tegen de fractie S_{400} van de capaciteit die na 400 cyclussen resteert (fig. 17). De meetpunten groeperen

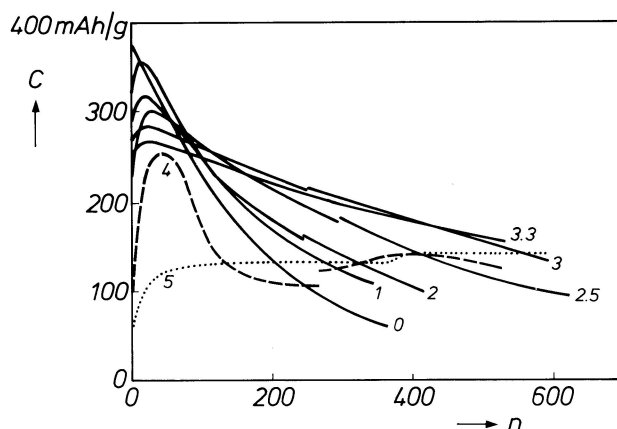


Fig. 13. Het effect van het vervangen van nikkel door kobalt in LaNi_5 op het verloop van de opslagcapaciteit C als functie van het aantal laad-ontlaadcyclussen n . Het aantal atomen nikkel dat is vervangen door atomen kobalt is bij de curven aangegeven. Het gunstigste effect treedt op bij een vervanging van 3,3 atomen nikkel.

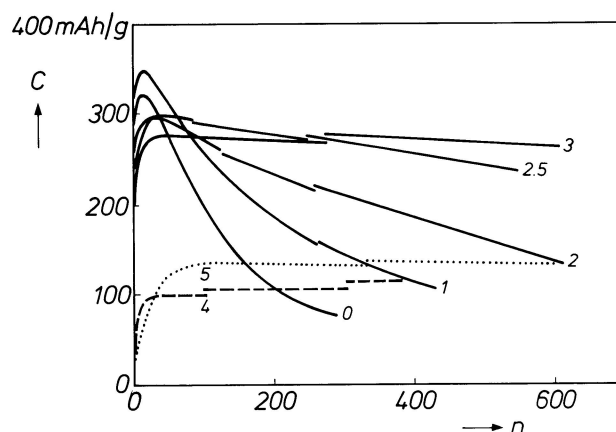


Fig. 14. Als fig. 13, maar steeds met toevoeging van 0,1% atoomfractie Al. Toevoegen van kleine hoeveelheden Si heeft hetzelfde effect.

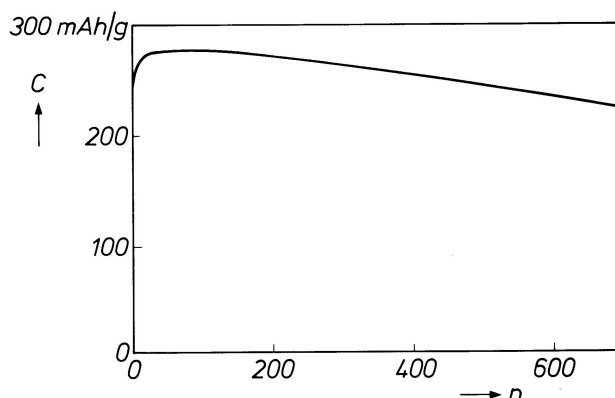


Fig. 15. De elektrochemische opslagcapaciteit C van een elektrode van $\text{La}_{0,8}\text{Nd}_{0,2}\text{Ni}_{2,5}\text{Co}_{2,4}\text{Si}_{0,1}$ als functie van het aantal laad-ontlaadcyclussen n . De verbetering van de stabiliteit ten opzichte van LaNi_5 blijkt duidelijk bij vergelijking met fig. 9.

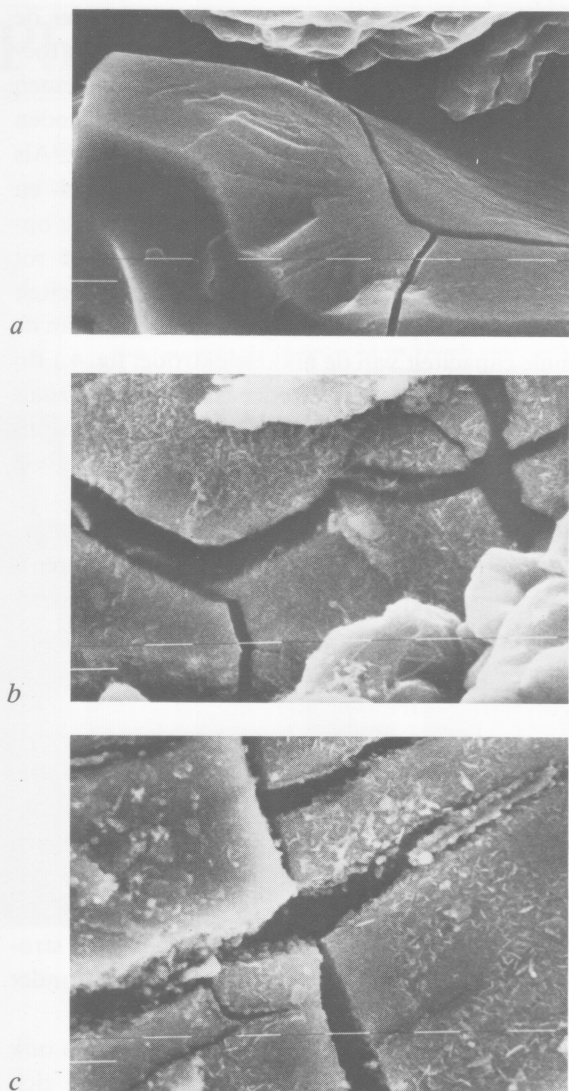


Fig. 16. SEM-opnamen van elektroden van $\text{La}_{0,8}\text{Nd}_{0,2}\text{Ni}_{2,5}\text{Co}_{0,4}\text{Si}_{0,1}$ na nul (a), 41 (b) en 666 keer (c) laden en ontladen. Een streepje is 1 μm lang.

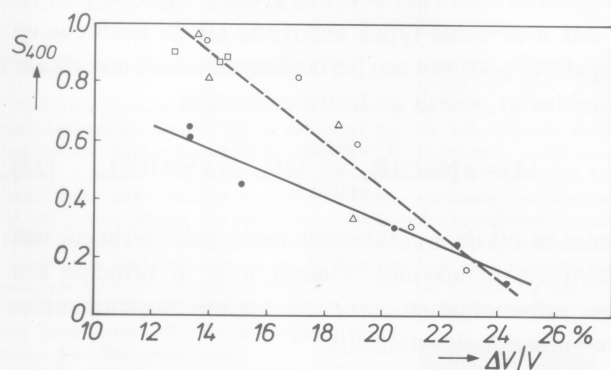


Fig. 17. De invloed van de relatieve volume-expansie $\Delta V/V$ ten gevolge van hydrering op de stabiliteit van de elektrode gemaakt van LaNi_5 en verwante verbindingen. De stabiliteit is uitgedrukt als de fractie S_{400} van de opslagcapaciteit die resteert na 400 laad-ontlaad-cyclussen. De gesloten meetpunten hebben betrekking op materialen van het type $\text{LaNi}_{5-x}\text{Co}_x$, de open meetpunten op materialen van hetzelfde type waaraan geringe hoeveelheden aluminium of silicium zijn toegevoegd. Bij kleine volumeveranderingen zijn deze laatste materialen duidelijk het stabielst.

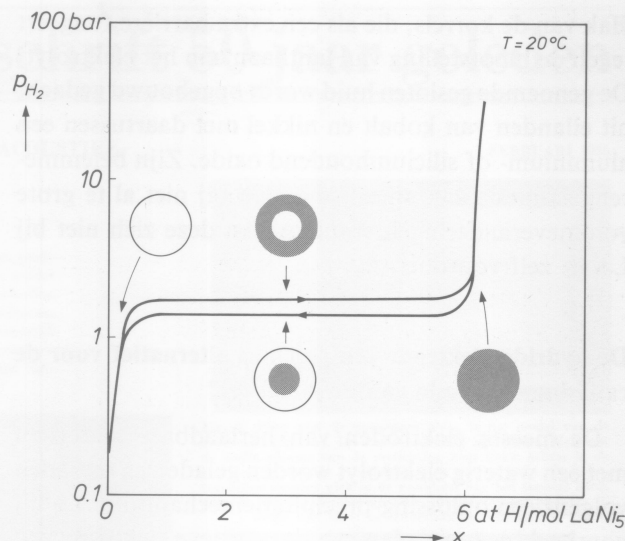


Fig. 18. Schematische voorstelling van het verschuiven van de fasegrens tussen de waterstofarme en waterstofrijke fase in korrels LaNi_5 bij laden en ontladen. De waterstofarme fase is wit, de waterstofrijke fase is grijs getekend.

zich dan volgens twee rechten in de figuur, waaruit blijkt dat inderdaad een afnemende volumevergroting tot een verbeterde stabiliteit voert, en dat dit het sterkst het geval is bij de verbindingen die kleine hoeveelheden Al of Si bevatten.

Zo vormde zich bij ons het volgende beeld ter verklaring van de corrosie van LaNi_5 -achtige verbindingen: De snelheidsbepalende stap in het corrosieproces is het transport van lanthaan naar het grensvlak van de elektrode en het elektrolyt. Onder normale omstandigheden is de beweeglijkheid van lanthaan in het metallische AB_5 -rooster vrijwel nul bij kamertemperatuur. Dat is anders aan de fasegrens die, zoals fig. 18 illustreert, gedurende het laden en ontladen altijd in de korrels van de intermetallische verbinding aanwezig is. Gedurende het laden en ontladen vindt een voortdurende 'rekristallisatie' plaats van een waterstofarme in een waterstofrijke fase, en omgekeerd. Doordat de waterstofrijke fase een grotere eenheidscel heeft (fig. 10 en 17) dan de waterstofarme fase, is het rooster aan de fasegrens vervormd, waardoor de beweeglijkheid van het lanthaan in deze zone grote waarden kan aannemen. Aangezien bij het laden en ontladen deze fasegrens, en daarmee dus ook de zone van verhoogde beweeglijkheid, zich door de korrels heen beweegt, kan het lanthaan zelfs bij kamertemperatuur uit het inwendige van de korrels naar het oppervlak verplaatst worden. Deze beweeglijkheid is natuurlijk het kleinst als de volumevergroting ten gevolge van de hydrering het kleinst is.

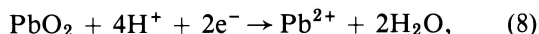
Kleine hoeveelheden aluminium of silicium leiden tot de vorming van een gesloten huid aan het opper-

vlak van de korrels, die als een extra barrière fungeert tegen de blootstelling van lanthaan aan het elektrolyt. De genoemde gesloten huid wordt opgebouwd gedacht uit eilanden van kobalt en nikkel met daartussen een aluminium- of siliciumhoudend oxide. Zijn belemmerende functie kan alleen optreden bij niet al te grote volumeveranderingen; vandaar dat deze zich niet bij LaNi_5 zelf voordoet (fig. 14).

De hydride-elektrode een geschikt alternatief voor de cadmiumelektrode van de NiCd-cel?

De meeste elektroden van herlaadbare batterijen met een waterig elektrolyt worden geladen en ontladen volgens een oplossing-precipitatiemechanisme. Zo bij voorbeeld het ontladen van de positieve elektrode van de loodaccu:

oplossen:

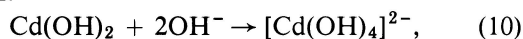


gevolgd door neerslaan:

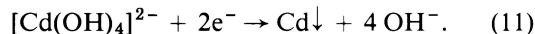


en het laden van de negatieve elektrode van de NiCd-cel:

oplossen:



gevolgd door neerslaan:



In het eerste geval treedt als oplosbaar tussenproduct een ion op, Pb^{2+} , en in het tweede geval een ionencomplex, $[\text{Cd}(\text{OH})_4]^{2-}$. Gezien de betrekkelijk lage concentraties van deze ionogene tussenprodukten zijn grote oppervlakten en kleine diffusielengten vereist om acceptabele laad- en ontladsnelheden te verkrijgen. Dit noodzaakt tot het toepassen van elektroden met een goed gekozen poreuze structuur. Een ongunstig kenmerk van dit laad- en ontladmechanisme zijn dan ook de morfologische veranderingen die gedurende het laden en ontladen optreden ten gevolge van de herverdeling van het actieve materiaal binnen de poreuze elektrode. Het betreft hier processen als:

- nucleatie en groei van het te precipiteren materiaal,
- passivering van actief materiaal doordat een dunne laag van niet-actief materiaal zich eromheen vormt, bij voorbeeld de sulfatering van de beide elektroden van de loodaccu,
- rekristallisatie, leidend tot grotere korrels of meer stabiele modificaties, hetgeen zich o.m. voordoet tijdens het ouderen van de cadmiumelektrode in de NiCd-batterij, en ten slotte
- dendrietvorming, die tot kortsluiting kan leiden.

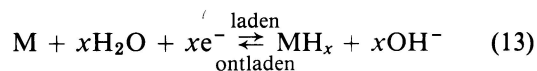
Door processen als deze wordt in het bijzonder de grootte van het actieve oppervlak en ook diens toegankelijkheid verkleind. De ongunstige effecten nemen sterker toe naarmate de laad- en ontladsnelheden groter zijn, en de batterij 'dieper' ontladen wordt. Als gevolg hiervan bedraagt bij een gemiddelde laad- en ontladtijd van 5 tot 20 uur het percentage van het optimaal te gebruiken actieve materiaal slechts 25 tot 45%. (Dit maakt dat b.v. in de NiCd-cel de capaciteit van de cadmiumelektrode veel groter moet zijn dan de nominale capaciteit van de nikkelelektrode; fig. 4.) Bij herhaaldelijk ontladen in minder dan een uur, zoals men in bepaalde gevallen toch zou wensen, is het optimaal te gebruiken percentage actief materiaal nóg veel minder dan het genoemde percentage.

Beperkingen als deze doen zich niet voor bij elektroden waarbij de lading en ontlading zonder oplosbare tussenprodukten, maar via een vastestofomzetting tot stand komen, zoals bij de nikkelelektrode:



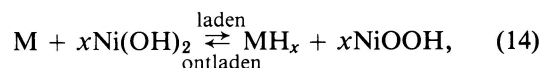
Door de afwezigheid van de beschreven degradatieverschijnselen, die verband houden met het oplossing-precipitatiemechanisme, heeft de nikkelelektrode zich kunnen ontwikkelen tot een van de meest gewaardeerde produkten van de huidige batterijtechnologie — met het vermogen duizenden keren met grote stromen te kunnen worden geladen en ontladen, zonder merkbaar in kwaliteit achteruit te gaan.

Zoals we hierboven gezien hebben, voltrekken ook het laden en ontladen van de hydride-elektrode zich als een vastestofomzetting:



(waarin M staat voor b.v. $\text{La}_{0,8}\text{Nd}_{0,2}\text{Ni}_{2,5}\text{Co}_{2,4}\text{Si}_{0,1}$).

Als men beide typen elektrode als de positieve en negatieve pool van een herlaadbare batterij met elkaar combineert, wordt de bruto celreactie:



zodat er bij deze combinatie netto géén verbruik van elektrolyt plaatsvindt. Daardoor is in principe een zeer eenvoudige en compacte batterijconstructie met weinig elektrolyt mogelijk ^[3].

Van het aldus te verkrijgen nieuwe type herlaadbare batterij mag men op voorhand de volgende vier gunstige kenmerken verwachten:

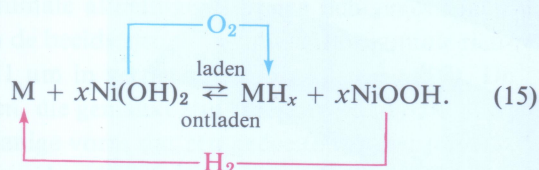
- Afwezigheid van giftige zware metalen (zoals cadmium).
- Een grote energiedichtheid, in het bijzonder bij toepassing van grote ontladsnelheden. Zowel de NiCd-

cel als de nikkel-hydridecel hebben een theoretische energiedichtheid van ongeveer 200 Wh/kg, maar bij de in de praktijk gebruikelijke ontladsnelheden is bij de NiCd-cel de feitelijke energiedichtheid, wegens o.m. het kleine percentage optimaal te gebruiken actieve materiaal, niet meer dan 40 à 50 Wh/kg. Het is tegen de achtergrond van deze sterke reductie van de theoretische energiedichtheid dat de nikkel-hydridecel, door de afwezigheid van het oplossing-precipitatie-mechanisme en ook door het niet-verbruiken van elektrolyt, veel gunstiger mogelijkheden heeft te bieden.

- Een grote vermogensdichtheid. Verg. (14) laat zien dat het laden en ontladen van een nikkel-hydridecel opgevat kan worden als het heen en weer pompen van waterstofatomen dan wel protonen van de ene elektrode naar de andere. Wegens de grote beweeglijkheid van het waterstofatoom en van het proton mag men verwachten dat het systeem grote stromen, met geringe inwendige weerstand, kan verwerken, zodat deze elektrodecombinatie een snel laad- en ontladbare batterij zal opleveren.

- De mogelijkheid van een effectieve beveiliging tegen overlading en overontlading. Bij overlading verloopt de chemische kortsluiting op dezelfde wijze als bij de NiCd-cel via een zuurstofcyclus. Bij overontladen kan bij de nikkel-hydridecel, anders dan bij de NiCd-cel, juist van de ontwikkeling van waterstof gebruik worden gemaakt, door hiermede een chemische kortsluiting in de vorm van een waterstofcyclus tot stand te brengen:

overladen



overontladen

Een experimentele nikkel-hydridecel

Bij de voorlopige afronding van dit researchonderzoek, waarbij tot dusver alleen aan halfcellen was gemeten, hebben wij ook nog enkele experimentele nikkel-hydridecellen vervaardigd. Wij hadden daarbij niet de bedoeling vast te stellen of zo'n batterij inderdaad alle gunstige eigenschappen heeft die wij in het voorgaande hoofdstuk waarschijnlijk achtten. Daartoe zou nodig geweest zijn te proberen de batterij optimaal te construeren, om zo bij voorbeeld de te verwachten hoge energiedichtheid en vermogensdichtheid tot uitdrukking te laten komen. Wij hebben ermee willen volstaan, aannemelijk te maken dat voorspellingen die op halfcelmetingen zijn gebaseerd, ook voor de complete batterij geldigheid hebben.

Het ging ons daarbij vooral om de volgende twee hypothesen, die in het eerder beschreven onderzoek steun vonden: ten eerste dat elektroden gemaakt van $\text{La}_{0,8}\text{Nd}_{0,2}\text{Ni}_{2,5}\text{Co}_{2,4}\text{Si}_{0,1}$ slechts met 30% in opslagcapaciteit afnemen na 1000 laad-ontlaadcyclussen (fig. 15) en ten tweede dat zulk een afneming van de opslagcapaciteit in het geheel niet optreedt als het actieve materiaal niet aan het uitzettings- en inkrimingsproces van de waterstofabsorptie- en desorptie deelneemt.

Wij hebben om deze twee hypothesen te toetsen de hydride-elektrode die wij met een nikkelelektrode combineerden, in sterke mate (met een factor 1,85) overgedimensioneerd, zodat wij te maken zouden hebben met actief materiaal dat wel zou uitzetten en inkrimpen en materiaal dat dit niet zou doen.

Overdimensionering is ook bij een 'echte' batterij nodig (maar doorgaans slechts met een veel geringere factor), als onderdeel van de beschreven kunstgreep die bescherming moet bieden tegen overlading en overontlading van een hermetisch afgesloten batterij. Op het moment dat de overdimensionering door de afnemende opslagcapaciteit niet meer aanwezig is, zal een sterke gasopeenhoping al spoedig het einde van de levensduur van de cel veroorzaken. (De levensduur is namelijk gedefinieerd als de tijd gedurende waarin de cel functioneert zonder dat de gasdruk in de gesloten cel boven een bepaalde waarde, bij voorbeeld 20 atmosfeer, uitstijgt.)

Welnu, op grond van de gemeten afneming van de opslagcapaciteit van actief materiaal dat voor 100% aan de waterstofabsorptie- en desorptie deelneemt (fig. 15), kunnen wij berekenen hoe lang de levensduur zal zijn bij een overdimensionering van 1,85. Wij kwamen zo voor deze experimentele batterij tot een berekende levensduur van 4000 laad-ontlaadcyclussen.

Fig. 19 toont het capaciteitsverloop van deze batterij, als functie van het aantal laad-ontlaadcyclussen. Na 4000 cyclussen bedroeg de opslagcapaciteit nog

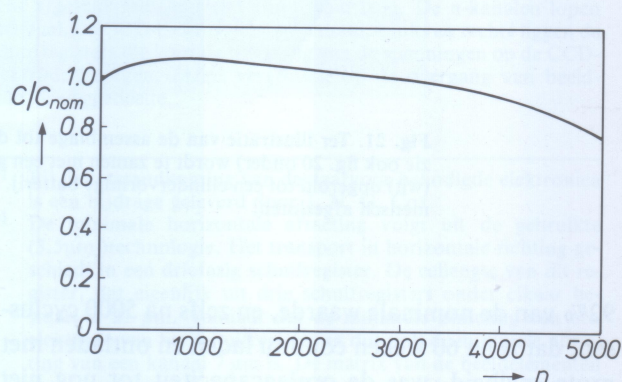


Fig. 19. De relatieve opslagcapaciteit C/C_{nom} van een experimentele nikkel-hydridecel als functie van het aantal laad-ontlaadcyclussen n . De hydride-elektrode is met een factor 1,85 overgedimensioneerd ten opzichte van de nikkelelektrode. C_{nom} is 300 mAh.

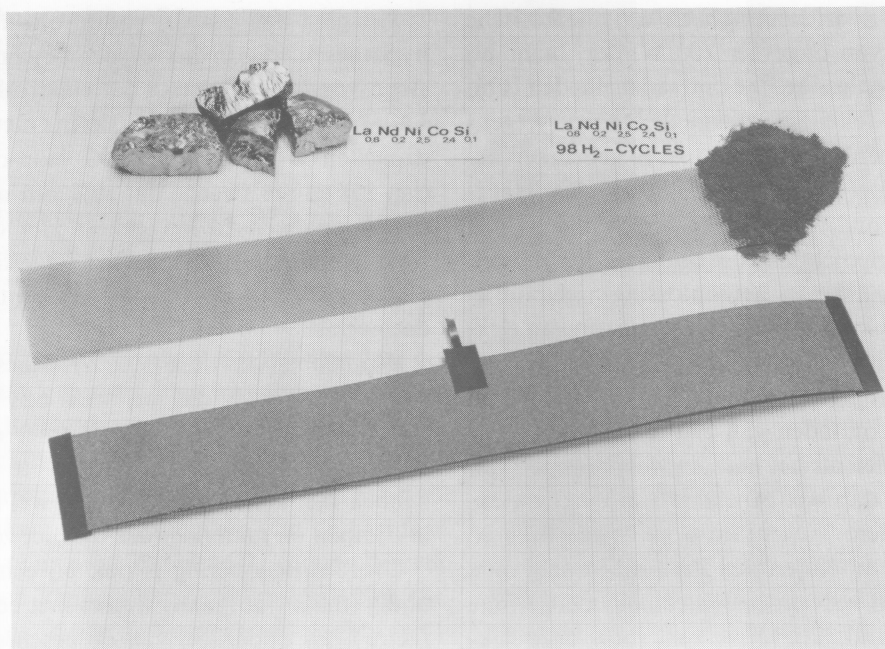


Fig. 20. Ter illustratie van één van onze methoden voor de vervaardiging van de hydride-elektrode. Enkele metalen brokstukken met de samenstelling $\text{La}_{0,8}\text{Nd}_{0,2}\text{Ni}_{2,5}\text{Co}_{2,4}\text{Si}_{0,1}$ (links boven) worden door herhaaldelijk absorberen en desorberen van waterstof verpulverd (rechts boven) en het ontstane poeder wordt vervolgens in de vorm van een pasta aangebracht op een strook nikkelgaas.

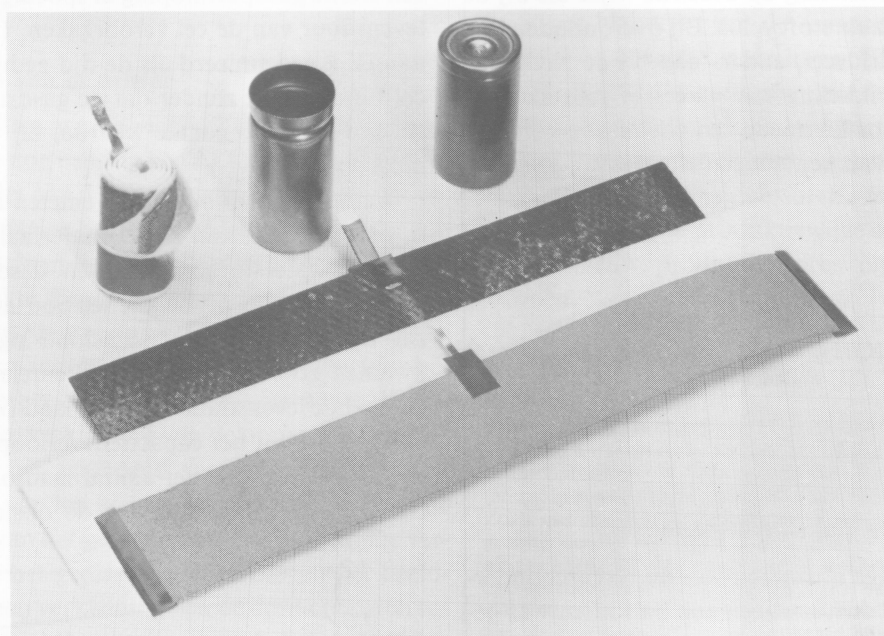


Fig. 21. Ter illustratie van de assemblage tot de nikkel-hydridecel. Een hydride-elektrode (grijs; zie ook fig. 20 onder) wordt te zamen met een gesinterde nikkelelektrode (zwart) en een separator (wit) opgerold tot een cilindervormige batterij. Na toevoegen van elektrolyt wordt de batterij hermetisch afgesloten.

92% van de nominale waarde, en zelfs na 5000 cyclussen, dat is na 60 weken continu laden en ontladen met grote snelheid, was de opslagcapaciteit tot nog niet minder dan 78% van de nominale waarde afgenomen. Na deze 5000 cyclussen bedroeg de druk in de cel ca. 10 atmosfeer.

We kunnen hieruit de conclusie trekken dat de capaciteitsafneming van het toegepaste nieuwe elektrode-materiaal in een complete cel in elk geval niet groter is dan blijkt uit de halfcelmetingen.

Fig. 20 en 21 illustreren een van de manieren waarop wij dergelijke experimentele nikkelhydride-cellen

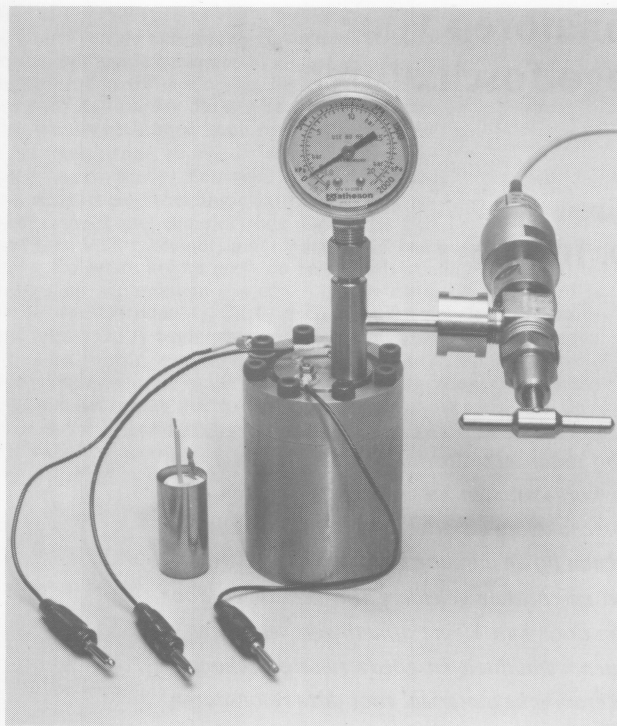


Fig. 22. Een complete experimentele nikkel-hydridecel met drukvat.

hebben vervaardigd. De intermetallische verbinding $\text{La}_{0,8}\text{Nd}_{0,2}\text{Ni}_{2,5}\text{Co}_{2,4}\text{Si}_{0,1}$ hebben wij door herhaalde absorptie en desorptie van waterstof verpulverd, en vervolgens het verkregen poeder na mengen met fijn nikkelpoeder in de vorm van een pasta aangebracht

op een strook nikkel. De positieve elektrode is vervaardigd door impregnatie van $\text{Ni}(\text{OH})_2$ in een door sinteren verkregen poreuze plaat nikkel. Als elektrolyt hebben wij een oplossing van 5 M KOH en 1 M LiOH gebruikt. Beide elektroden worden, gescheiden door een strook polyamide, tot een cilindrisch pakket opgerold en in een vernikkelde stalen bus geplaatst. Na toevoegingen van het elektrolyt kan de batterij hermetisch worden afgesloten of, zoals wij deden, in een drukvat worden geplaatst dat voorzien is van een drukmeter (fig. 22).

Samenvatting. LaNi_5 en verwante verbindingen zijn onderzocht op hun bruikbaarheid als elektrodemateriaal voor op waterstof gebaseerde herlaadbare batterijen. Hoewel LaNi_5 en LaNi_4Cu de verlangde grote hoeveelheden waterstof snel absorberen en weer desorberen zijn zij ongeschikt, omdat hun opslagcapaciteit bij herhaalbaar laden en ontladen drastisch afneemt. Gebleken is dat dit capaciteitsverlies samenhangt met de omzetting van het actieve materiaal in $\text{La}(\text{OH})_3$, die in sterkere mate plaatsvindt naarmate het laden en ontladen met grotere volumeveranderingen van het actieve materiaal gepaard gaat. Gedeeltelijk vervangen van Ni door Co leidt tot kleinere volumeveranderingen en daardoor ook tot stabielere elektrodemateriaal. Een additionele stabiliteitsverbetering wordt nog verkregen door het toevoegen van kleine hoeveelheden aluminium of silicium. De capaciteit van elektroden gemaakt van het nieuw ontwikkelde $\text{La}_{0,8}\text{Nd}_{0,2}\text{Ni}_{2,5}\text{Co}_{2,4}\text{Si}_{0,1}$ bleek na 1000 laad- en onlaadcyclussen slechts met 30% af te nemen. De met dit materiaal vervaardigde experimentele — hermetisch afgesloten — nikkel-hydridecel combineert een lange levensduur met een grote energiedichtheid, een grote vermogensdichtheid en een goede beveiliging tegen overladen en overontladen, en bevat bovendien geen (giftig) cadmium.

Diëlektrische resonatoren voor geïntegreerde microgolfoscillatoren

G. Lütteke en D. Hennings

Van microgolfoscillatoren die worden toegepast bij radar en telecommunicatie, verlangt men een constante frequentie en weinig ruis. Tot voor kort kon men hieraan alleen voldoen door het opnemen van een trilhaolte, die in de oscillatorschakeling als selectief filter fungeerde. De afmetingen van de trilhaolte sloten echter niet goed aan bij de miniaturisering in de zgn. geïntegreerde microgolfschakelingen, waarin golfpijpen en coaxiale geleiders zijn vervangen door microstriplijnen. Diëlektrische resonatoren passen door hun kleine afmetingen veel beter in dit soort microgolfschakelingen. Een hoge frequentiestabiliteit en goede ruiseigenschappen vragen dan wel om een afgewogen keuze van het keramische materiaal voor deze resonatoren.

Inleiding

Nu directe televisie-uitzendingen via geostationaire satellieten een realiteit zijn, is er behoefte aan goedkope schakelingen voor microgolfontvangst. Geïntegreerde microgolfschakelingen paren kleine afmetingen en gering gewicht aan een lage kostprijs. Bij deze schakelingen in MIC-techniek ('microwave integrated circuits') maakt men gebruik van bipolaire transistors en veldeffecttransistors met steeds hogere grensfrequenties, en van speciale actieve elementen voor het microgolfgebied als Gunn- en lawine-looptijd diodes (ook wel IMPATT-diodes genoemd: 'impact avalanche and transit time'). Deze componenten worden in de MIC-techniek met elkaar verbonden door microstriplijnen, die bestaan uit een dunne metalen geleider (de 'strip') die van een metalen grondplaat is gescheiden door een diëlektricum^[1].

Bij het gebruik van microgolven voor telecommunicatie via straalverbindingen en voor televisie via satellieten eist men dat de frequentie van de draaggolf zeer constant is. Bovendien wordt een hoge signaal/ruis-verhouding gevraagd. Aan deze eisen kan alleen worden voldaan door in de benodigde oscillatorschakelingen selectieve bandfilters op te nemen die de frequentie stabiliseren. Tot voor kort konden hiervoor alleen

— naar verhouding omvangrijke — trilhaolten worden gebruikt, die terwille van een geringe temperatuurgevoeligheid moesten zijn vervaardigd van Invar. Met deze trilhaolten heeft men een relatieve frequentiestabiliteit van $10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ en kwaliteitsfactoren van meer dan 10 000 kunnen bereiken.

Trilhaolten passen door hun afmetingen slecht bij de structuur van geïntegreerde microgolfschakelingen. Men streeft daarom al lange tijd naar een vervanging van deze trilhaolten door keramische resonatoren, die kleiner kunnen zijn omdat de diëlektrische constante van keramiek groter is dan die van lucht. Veel pogingen om tot dergelijke resonatoren te komen leden schipbreuk, omdat er geen keramische materialen te vinden waren waarmee zowel een hoge diëlektrische constante en kwaliteitsfactor, als een geringe temperatuurafhankelijkheid bereikbaar waren. Pas in de jaren zeventig ontdekte men dat barium-nonatitanaat ($\text{Ba}_2\text{Ti}_9\text{O}_{20}$) een geschikt materiaal is voor diëlektrische resonatoren voor het microgolfgebied. Bovendien bleek dit materiaal ook geschikt voor selectieve filters die bestaan uit een aantal gekoppelde diëlektrische resonatoren. Ook bij lage frequenties in het microgolfgebied kunnen de afmetingen van deze filters binnen de perken blijven. Het materiaal is door zijn hoge diëlektrische constante ook erg geschikt als diëlektricum voor geïntegreerde microgolfschakelingen voor relatief lage

Dr. G. Lütteke, medewerker van Philips GmbH Apparatefabrik Krefeld, destijds medewerker van Philips GmbH Forschungslaboratorium Aachen, Aken, en Dr. D. Hennings, medewerker van dit laboratorium.

frequenties. Bovendien kan men bij bepaalde afmetingen van een microstriplijn kleine karakteristieke impedanties bereiken. (De karakteristieke impedantie van een striplijn is ongeveer omgekeerd evenredig met de wortel uit de diëlektrische constante van het diëlektricum.)

De temperatuurafhankelijkheid van de frequentie f_R van staande elektromagnetische golven in een diëlektrische resonator wordt uitgedrukt door de temperatuurcoëfficiënt τ_{f_R} , die is gedefinieerd als:

$$\tau_{f_R} = \frac{1}{f_R} \frac{df_R}{dt}, \quad (1)$$

waarin t de temperatuur voorstelt. Deze temperatuurcoëfficiënt is een functie van de thermische uitzettingscoëfficiënt en van een — op gelijksoortige manier gedefinieerde — temperatuurcoëfficiënt voor de diëlektrische constante. Bij oscillatorschakelingen is het niet gewenst τ_{f_R} van de resonator precies gelijk aan nul te maken. In de temperatuurcoëfficiënt voor de resonantiefrequentie van de oscillator als geheel moet namelijk een — geringe — negatieve bijdrage afkomstig van de andere elementen in de schakeling worden gecompenseerd door een positieve bijdrage van de resonator.

Om de afmetingen van de resonator te beperken moet de relatieve diëlektrische constante ϵ_r van het materiaal dus groot zijn. (Als men de afmetingen van een trilholte en een diëlektrische resonator vergelijkt, blijkt de trilholte bij dezelfde frequentie en hoogte/diameter-verhouding $1/\epsilon_r$ -maal zo groot als de resonator te zijn ^[2].) Daarnaast moet de mogelijkheid bestaan de temperatuurcoëfficiënt voor de resonantiefrequentie binnen een klein gebied te beïnvloeden door het variëren van de samenstelling van het materiaal. Het gebied voor mengverhoudingen van de twee verbindingen BaTi_4O_9 en $\text{Ba}_2\text{Ti}_9\text{O}_{20}$ in het fasediagram van het systeem BaO-TiO_2 blijkt zeer geschikt voor het beïnvloeden van de temperatuurcoëfficiënt. Met resonatoren van $\text{Ba}_2\text{Ti}_9\text{O}_{20}$ met ongeveer 30% BaTi_4O_9 zijn oscillatorschakelingen voor 10 GHz verwezenlijkt met een frequentiestabiliteit die vergelijkbaar is met die van oscillatoren met trilholten van Invar. De afmetingen van de diëlektrische resonatoren zijn echter aanzienlijk kleiner.

In het volgende zullen we eerst enkele theoretische achtergronden van diëlektrische resonatoren behandelen, in samenhang met het meten van de materiaaleigenschappen. Vervolgens gaan we in op de samenstelling van de keramische materialen voor deze resonatoren. Daarna komen diverse soorten oscillatorschakelingen aan de orde. Tot slot geven we enkele toepassingen van stabiele oscillatorschakelingen voor microgolffrequenties.

De diëlektrische resonator en het meten van het materiaal

Een diëlektrische resonator is meestal een cilindervormig lichaam waarvan het materiaal een hoge diëlektrische constante bezit. In de resonator worden staande elektromagnetische golven opgewekt, waarvan de golflengte door de afmetingen en de diëlektrische constante wordt bepaald. Een deel van het wisselende elektromagnetische veld breidt zich daarbij buiten de resonator uit. Via dit strooiveld kan men de resonator aan de microgolfschakeling koppelen.

Er zijn reeds lang keramische materialen met een hoge diëlektrische constante bekend. Van bariumtitaanaat (BaTiO_3) kan ϵ_r zelfs een waarde van 10 000 bereiken. De meeste keramische materialen komen echter voor het gebruik in resonatoren niet in aanmerking, aangezien ze bij microgolffrequenties teveel diëlektrische verliezen vertonen. Bij ferro-elektrische materialen als bariumtitaanaat worden deze verliezen veroorzaakt door de diëlektrische relaxatie van de domeinwanden. De grootte van de diëlektrische verliezen wordt bepaald door de verliesfactor $\tan \delta_m$, waarin δ_m de verlieshoek van het materiaal voorstelt. De grootte van de verliesfactor volgt uit de formule voor de complexe diëlektrische constante ϵ :

$$\epsilon = \epsilon_r \epsilon_0 (1 - j \tan \delta_m), \quad (2)$$

waarin ϵ_0 de diëlektrische constante van vacuüm voorstelt. In resonatoren moeten de diëlektrische verliezen zo klein mogelijk zijn. Dit komt tot uitdrukking in de kwaliteitsfactor Q_m , die is gedefinieerd als de reciproke waarde van de verliesfactor.

Het is ook van belang dat de relatieve diëlektrische constante weinig verandert als functie van de temperatuur en dat de thermische uitzettingscoëfficiënt van het materiaal gering is. Dit blijkt uit de formule voor de temperatuurcoëfficiënt τ_{f_R} van de resonantiefrequentie van diëlektrische resonatoren ^[3]:

$$\tau_{f_R} = -\frac{1}{2} (\tau_{\epsilon_r} + 2\tau_\alpha), \quad (3)$$

met τ_{ϵ_r} de temperatuurcoëfficiënt van de diëlektrische constante en τ_α de thermische uitzettingscoëfficiënt. Men kan dus ook een geringe waarde van τ_{f_R} verkrijgen door een materiaal te kiezen waarin de grootheden τ_{ϵ_r} en τ_α elkaar voor een belangrijk deel compenseren. Een groot probleem is dat men de waarde van deze grootheden voor verschillende materialen meestal niet

^[1] J. H. C. van Heuven en A. G. van Nie, Geïntegreerde microgolfschakelingen, Philips Techn. T. 32, 161-173, 1971.

^[2] M. W. Pospieszalski, On the theory and application of the dielectric post resonator, IEEE Trans. MTT-25, 228-231, 1977.

^[3] D. Hennings en P. Schnabel, Dielectric characterization of $\text{Ba}_2\text{Ti}_9\text{O}_{20}$ type ceramics at microwave frequencies, Philips J. Res. 38, 295-311, 1983.

kan ontlelen aan de literatuur, zodat men is aangewezend op metingen.

Wij hebben voor deze metingen gebruik gemaakt van een meetopstelling die in fig. 1a schematisch is weergegeven [4]. In een cilindervormig materiaalmonster worden microgolffresonanties opgewekt waarvan de geometrie vergelijkbaar is met die van resonanties in een diëlektrische resonator. Het monster is daartoe tussen twee metalen platen gemonteerd. Een signaal uit een netwerkanalysator ('network analyser'), waarvan de frequentie variabel is, wekt via een coaxiale ge-

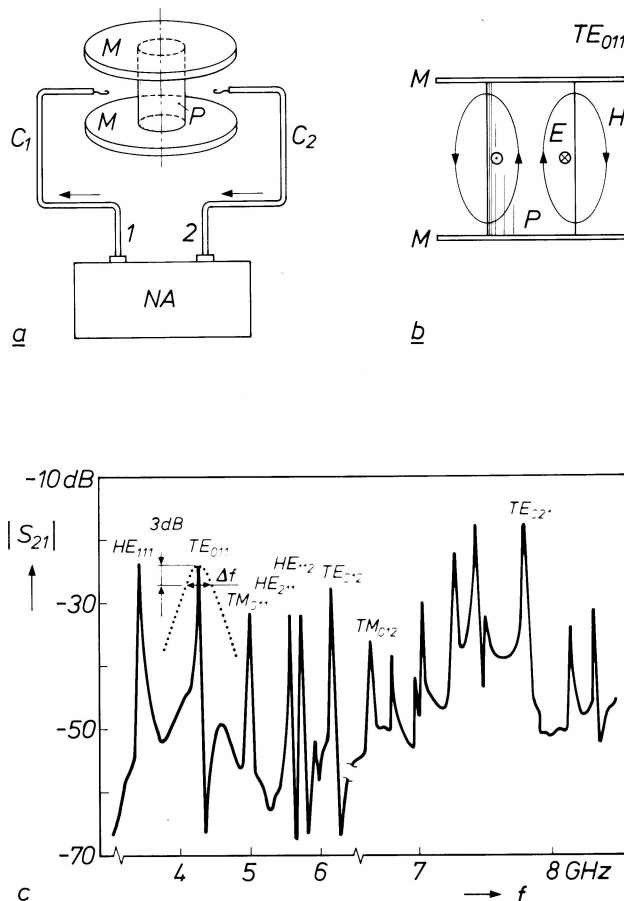


Fig. 1. Het meten van materialen voor diëlektrische resonatoren. a) Schema van de opstelling. Een cilindervormig materiaalmonster P is tussen twee metalen platen M gemonteerd. In het monster kunnen microgolffresonanties worden opgewekt. Daartoe wordt een signaal vanuit aansluitpunt 1 van een netwerkanalysator NA (Hewlett-Packard 8410) via een coaxiale kabel C_1 naar het monster geleid. Het signaal wordt via een tweede kabel C_2 naar aansluitpunt 2 van het apparaat teruggeleid. Beide coaxiale kabels hebben aan hun uiteinde een lus in een vlak loodrecht op de as van de resonator. b) Schematische aanduiding van de TE_{011} -modus in het materiaalmonster. E elektrische veldlijn. H magnetische veldlijn. c) Voorbeeld van een frequentiespectrum dat met de netwerkanalysator is gemeten. De absolute waarde van de verhouding S_{21} van de spanningen aan de aansluitpunten 2 en 1 is uitgezet in dB als functie van de frequentie f . Het spectrum is samengesteld uit twee meetresultaten met verschillende lineaire schalen voor de frequentie. Van een aantal pieken in het spectrum is de bijbehorende modus aangegeven. De piek van de TE_{011} -modus is in horizontale richting vergroot nog eens gestippeld weergegeven. Uit de breedte Δf van de piek op een afstand van 3 dB onder de top kan de kwaliteitsfactor van het materiaal worden bepaald.

leider een veld op in het monster. Via een tweede geleider wordt het signaal naar het apparaat teruggeleid. De metalen platen fungeren als een golfgeleider die onder zijn afsnijfrequentie ('cut-off frequency') wordt gebruikt. Daardoor neemt het hoogfrequente veld dat uit het monster treedt, met toenemende radiale afstand sterk in grootte af. Om weinig hinder te ondervinden van wervelstroomverliezen in de metalen platen kiest men voor het materiaalmonster een grote lengte/diameter-verhouding.

De trillingsmodi in een cilindervormige diëlektrische resonator hebben verwantschap met de modi in een trilholt. In een *trilholt* kunnen alleen transversale trillingsmodi, TE_{mnp} en TM_{mnp} genaamd, voorkomen. (De indices m , n en p geven het aantal perioden van het elektrische of magnetische veld in respectievelijk tangentiële, radiale en axiale richting aan.) Daarbij is of het elektrische veld (modus TE_{mnp} ; de indices hebben betrekking op het magnetische veld) of het magnetische veld (modus TM_{mnp} ; de indices hebben betrekking op het elektrische veld) zuiver transversaal, dus zonder component in axiale richting. Het niet-transversale magnetische of elektrische veld dat bij een transversaal respectievelijk elektrisch of magnetisch veld behoort, heeft dus wel een component in axiale richting. Bij een cilindervormige, niet-gemetaliseerde *diëlektrische resonator* treden alleen transversale modi op die rotatiesymmetrisch zijn ($m = 0$). In diëlektrische resonatoren kunnen echter ook niet-transversale modi voorkomen, die niet rotatiesymmetrisch zijn. Van deze modi, die als HE_{mnp} worden aangeduid en 'hybride' worden genoemd, heeft zowel het magnetische als het elektrische veld dus een component in axiale richting.

Van de vele trillingsmodi die in een cilindervormige resonator kunnen voorkomen, is alleen de transversale modus TE_{011} van praktisch belang. In fig. 1b zijn schematisch de elektrische en magnetische veldlijnen aangegeven die behoren bij de TE_{011} -modus in het monster in de meetopstelling. De (transversale) elektrische veldlijnen zijn cirkels waarvan het middelpunt in de as van het monster ligt. De magnetische veldlijnen hebben in het materiaal ongeveer de axiale richting en zijn vergelijkbaar met die van een magnetische dipool. Doordat iedere magnetische veldlijn zich in een vlak door de as bevindt en bovendien buiten het materiaal treedt, kan de TE_{011} -modus uitstekend via coaxiale kabels gekoppeld worden met de netwerkanalysator.

In fig. 1c is een frequentiespectrum weergegeven, dat is gemeten met de opstelling van fig. 1a. In een dergelijk spectrum kunnen dus alleen pieken van de transversale modi TE_{0np} en TM_{0np} en van de hybride trillingsmodi HE_{mnp} voorkomen. Het blijkt dat de modus met de laagste frequentie de HE_{111} -modus is. In de

figuur is bij de piek van de TE_{011} -modus aangegeven hoe de kwaliteitsfactor Q_m van het materiaal uit de vorm van de piek kan worden bepaald. Q_m is ongeveer gelijk aan de verhouding van de resonantiefrequentie en de breedte Δf van de resonantiepiek, gemeten op een afstand 3 dB onder de top. (Een waarde van 3 dB correspondeert met een vermogensverhouding 0,5.) De diëlektrische constante kan worden berekend uit de grootte van de resonantiefrequentie en de afmetingen van het materiaalmonster.

Een diëlektrische resonator die wordt gebruikt in oscillatorschakelingen, heeft de vorm van een schijf. Deze is niet opgesloten tussen metalen platen, maar met speelruimte in axiale en radiale richting in een metalen behuizing gemonteerd. Het magnetische veld kan daardoor ook in axiale richting buiten de resonator treden, zie fig. 2a. De hier aangegeven trillingswijze duidt men daarom aan als de $TE_{01\delta}$ -modus. De koppeling met de rest van de schakeling vindt plaats door middel van een microstriplijn, zie fig. 2b. Ten einde de verliezen in het diëlektricum van de microgolfschakeling te beperken is de resonator met behulp van een kwartsglazen ring op de bodem van de behuizing geplaatst, zie fig. 2c. De resonator heeft een hoogte/dia-

meter-verhouding van ongeveer 0,4, waardoor de verschillen in frequentie van de $TE_{01\delta}$ -modus en die van naburige modi verhoudingsgewijs groot zijn. De zijwanden van de behuizing zijn zo ver van de resonator verwijderd dat het wisselende magnetische veld hierin nagenoeg geen wervelstromen kan opwekken. De behuizing is desondanks klein, daar het veld in radiale richting snel afneemt, omdat de onder- en bovenplaat ook hier fungeren als radiale golfgeleider met een afstemming onder zijn afsnijfrequentie. De resonantiefrequentie die wordt verkregen, is moeilijk exact te voorspellen uit de afmetingen van de resonator en de behuizing. De juiste instelling van de frequentie moet daarom plaatsvinden door middel van een instelschroef. Met deze schroef kan de afstand waarover het magnetische veld van de $TE_{01\delta}$ -modus zich in axiale richting uitbreidt, worden gevarieerd. De bijbehorende resonantiefrequentie is daardoor heel precies in te stellen.

De materiaalkeuze

Al in de jaren vijftig is ontdekt dat barium-nonatitaat ($Ba_2Ti_9O_{20}$) door zijn verhoudingsgewijs hoge diëlektrische constante ϵ_r en zeer geringe temperatuurcoëfficiënt τ_{ϵ_r} een geschikt materiaal is voor stabiele keramische condensatoren [5]. Veel later bleek dat het materiaal door deze eigenschappen ook gebruikt kan worden in diëlektrische resonatoren voor frequenties tot 10 GHz [6].

In het fasediagram van het quasi-binaire systeem $BaO-TiO_2$, zie fig. 3a, liggen de lijnen van de verbinding $BaTi_4O_9$ (80 mol. % TiO_2) en van zuiver TiO_2 aan weerszijden van de lijn voor de verbinding $Ba_2Ti_9O_{20}$.

Tabel I. De diëlektrische constante ϵ_r , de temperatuurcoëfficiënt τ_{ϵ_r} en de verliesfactor $\tan \delta_m$, gemeten bij 4 GHz aan monsters van $BaTi_4O_9$, $Ba_2Ti_9O_{20}$ en TiO_2 .

	ϵ_r	τ_{ϵ_r} [°C ⁻¹]	$\tan \delta_m$
$BaTi_4O_9$	37,5	20×10^{-6}	$1,6 \times 10^{-4}$
$Ba_2Ti_9O_{20}$	39,3	≈ 0	$1,1 \times 10^{-4}$
TiO_2	100	1550×10^{-6}	2×10^{-4}

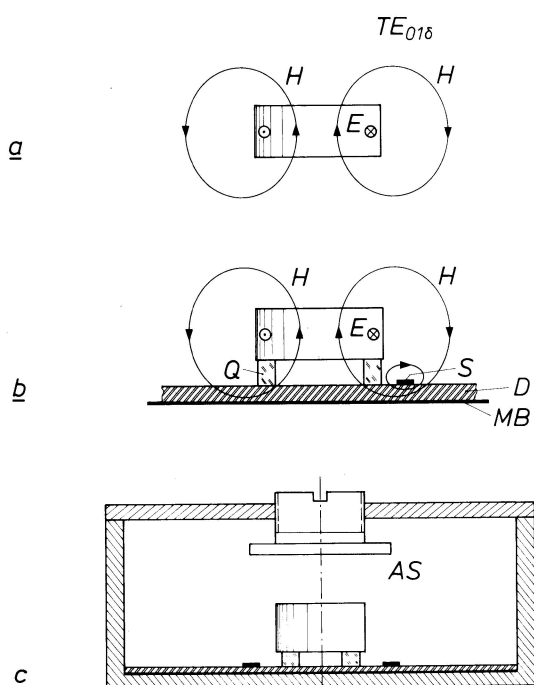


Fig. 2. a) Schematische voorstelling van de $TE_{01\delta}$ -modus in een diëlektrische resonator voor oscillatorschakelingen. (Strikt genomen zou men deze modus moeten aanduiden als $TE_{01\delta}$, aangezien het magnetische veld ook in radiale richting buiten de resonator treedt.) b) Het koppelen van de resonator aan een microstriplijn. Q kwartsglazen ring. S strip van de microstriplijn. D diëlektricum. MB metalen grondvlak. c) De diëlektrische resonator in zijn metalen behuizing, waarin ook de rest van de oscillatorschakeling (niet getekend) is opgenomen. AS schroef waarmee de resonantiefrequentie nauwkeurig kan worden ingesteld.

[4] B. W. Hakki en P. D. Coleman, A dielectric resonator method of measuring inductive capacities in the millimeter range, IRE Trans. **MTT-8**, 402-410, 1960;

W. E. Courtney, Analysis and evaluation of a method of measuring the complex permittivity and permeability of microwave insulators, IEEE Trans. **MTT-18**, 476-485, 1970.

[5] G. H. Jonker en W. Kwestroo, The ternary systems $BaO-TiO_2-SnO_2$ and $BaO-TiO_2-ZrO_2$, J. Am. Ceram. Soc. **41**, 390-394, 1958.

[6] H. M. O'Bryan, J. Thomson en J. K. Plourde, A new $BaO-TiO_2$ compound with temperature-stable high permittivity and low microwave loss, J. Am. Ceram. Soc. **57**, 450-453, 1974.

(81,818 mol.% TiO_2). De laatstgenoemde drie materialen hebben alle een grote diëlektrische constante (die van TiO_2 is zelfs zeer groot) en een lage verliesfactor, zie tabel I. Bij TiO_2 en BaTi_4O_9 is echter de temperatuurcoëfficiënt τ_{f_R} van de resonatoren die van dit materiaal zijn vervaardigd, relatief groot; bij $\text{Ba}_2\text{Ti}_9\text{O}_{20}$ is τ_{f_R} nagenoeg gelijk aan nul. De verbindingen BaTi_4O_9 , $\text{Ba}_2\text{Ti}_9\text{O}_{20}$ en TiO_2 zijn niet onderling mengbaar, maar laten zich wel door sinteren combineren tot een dichte keramieksoort met een porositeit kleiner dan 0,5%. Het ligt dus voor de hand de gewenste kleine, echter van nul verschillende waarde van de temperatuurcoëfficiënt τ_{f_R} te verwezenlijken door het samenstellen van tweefasige keramieken BaTi_4O_9 - $\text{Ba}_2\text{Ti}_9\text{O}_{20}$ of $\text{Ba}_2\text{Ti}_9\text{O}_{20}$ - TiO_2 .

Fig. 3b laat zien dat materiaalmonsters die van dergelijke tweefasige keramieken zijn vervaardigd, een diëlektrische constante hebben die een monotoon stij-

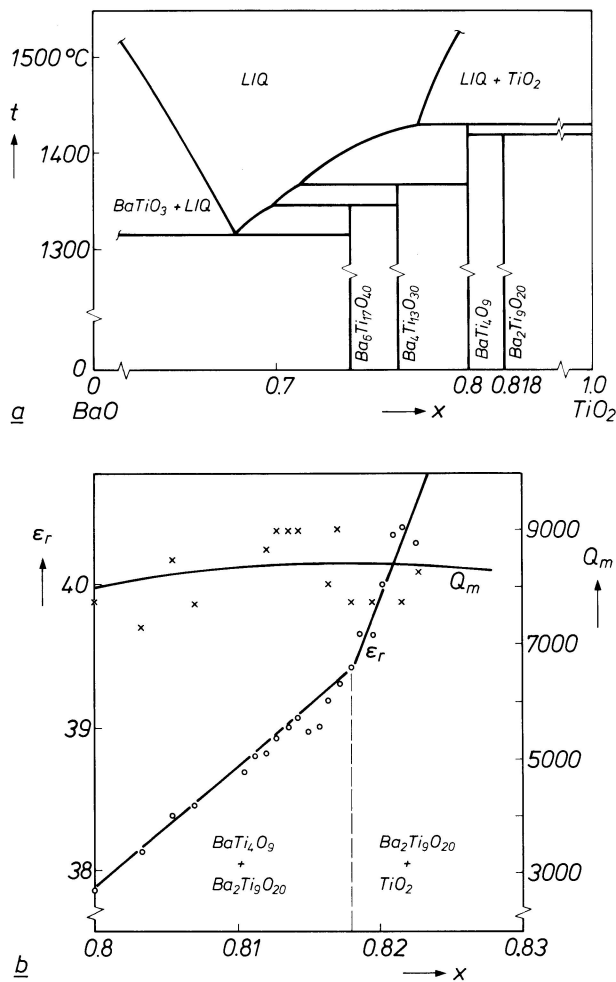


Fig. 3. a) Deel van het fasediagram van het quasi-binaire systeem BaO-TiO₂ [6], t temperatuur, x moleculaire hoeveelheid TiO₂. b) De relatieve diëlektrische constante ϵ_r en de kwaliteitsfactor Q_m als functie van x , als resultaat van een aantal metingen met de opstelling van fig. 1a. De gebieden van de tweefasige keramieken BaTi_4O_9 - $\text{Ba}_2\text{Ti}_9\text{O}_{20}$ en $\text{Ba}_2\text{Ti}_9\text{O}_{20}$ -TiO₂ zijn gescheiden door een streeplijn.

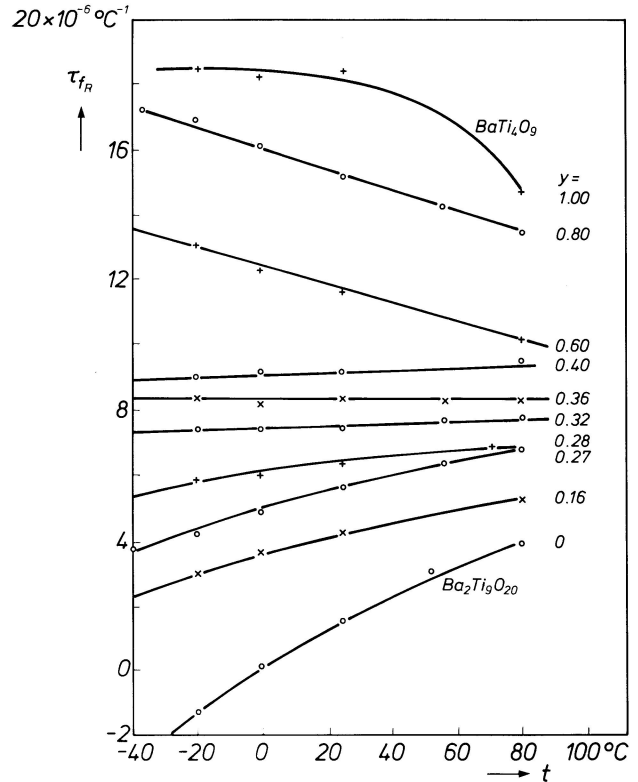


Fig. 4. De temperatuurcoëfficiënt τ_{f_R} voor de resonantiefrequentie f_R van materiaalmonsters als functie van de temperatuur t . Iedere kromme behoort bij een andere waarde van het moleculaire gehalte y aan BaTi_4O_9 in de keramiek $(\text{Ba}_2\text{Ti}_9\text{O}_{20})_{1-y}(\text{BaTi}_4\text{O}_9)_y$.

gende functie is van het moleculaire gehalte x aan TiO_2 . De kwaliteitsfactor $Q_m = 1/\tan \delta_m$ blijkt hoog te zijn en weinig te veranderen als functie van x . Fig. 4 toont voor monsters met verschillende mengverhoudingen y van de tweefasige keramiek $(\text{Ba}_2\text{Ti}_9\text{O}_{20})_{1-y}(\text{BaTi}_4\text{O}_9)_y$ de temperatuurcoëfficiënt τ_{f_R} als functie van de temperatuur. Voor zuiver $\text{Ba}_2\text{Ti}_9\text{O}_{20}$ is τ_{f_R} bij 0 °C — toevalligerwijs — precies gelijk aan nul. Er zouden dus van dit materiaal resonatoren gemaakt kunnen worden die bij 0 °C een breed minimum vertonen in de — in dit geval ongeveer paraboolvormige — kromme voor de resonantiefrequentie als functie van de temperatuur. We willen echter dat de temperatuurcoëfficiënt van de resonantiefrequentie onafhankelijk is van de temperatuur en een — geringe — positieve waarde heeft. Op deze manier kunnen negatieve temperatuurcoëfficiënten van andere elementen in de oscillatorschakeling worden gecompenseerd.

Fig. 4 laat zien dat materiaalmonsters uit keramiek van $\text{Ba}_2\text{Ti}_9\text{O}_{20}$ met ongeveer 30% BaTi_4O_9 aan deze voorwaarde voldoen. Met resonatoren van dit materiaal zijn oscillatorschakelingen gerealiseerd met een frequentiedrift van slechts 150 kHz bij 10 GHz in een

temperatuurgebied van -20 tot $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ [7]. Het produkt van de kwaliteitsfactor Q_m en de resonantiefrequentie f_R (in GHz) is in het gebied van 2 tot 15 GHz voor keramische resonatormaterialen doorgaans ongeveer constant en wordt daarom gebruikt als een kwaliteitscriterium. Met de beschreven nieuwe materialen zijn door ons waarden van circa 45 000 voor dit produkt bereikt.

De oscillatorschakeling

Het koppelen van de resonator

Er bestaan verschillende typen oscillatorschakelingen voor microgolven. Als daarin voor het stabiliseren van de resonantiefrequentie een diëlektrische resonator wordt toegepast, is deze steeds met het actieve element in de schakeling verbonden via een microstriplijn, die 'koppelleiding' wordt genoemd. De koppelleiding wordt afgesloten door een impedantie, waar-

voor doorgaans een weerstand gekozen wordt die even groot is als zijn karakteristieke impedantie Z_0 . Daardoor worden er tegen de afsluitimpedantie geen microgolven gereflecteerd. De afsluitimpedantie verbindt de strip van de koppelleiding met de grondplaat van de geïntegreerde microgolfschakeling, zie fig. 5a.

De resonator kan worden beschouwd als een kring waarin een weerstand, een spoel en een condensator parallel zijn geschakeld, zie fig. 5b. Deze kring heeft (onbelast) een kwaliteitsfactor Q_R en een resonantiehoekfrequentie ω_R en wordt met de rest van de schakeling gekoppeld gedacht door middel van een ideale transformator met transformatieverhouding n . Als men het geheel van kring en transformator vervangt door een andere fictieve kring die rechtstreeks in de schakeling is opgenomen, veranderen de waarden R , L en C in R_1 , L_1 en C_1 , zie fig. 5c, waarbij geldt:

$$R_1 = n^2 R.$$

De koppelfactor β is gedefinieerd als de verhouding van deze weerstand en de karakteristieke impedantie van de koppelleiding:

$$\beta = \frac{R_1}{Z_0} = \frac{n^2 R}{R_0}. \quad (4)$$

Hierin stelt R_0 de afsluitimpedantie voor. De grootte van de koppelfactor wordt voor een groot deel bepaald door de afstand tussen resonator en strip.

De impedantie Z_1 is gedefinieerd als de impedantie tussen de strip en de grondplaat ter plaatse van de resonator en gezien in de richting van de afsluitimpedantie. Deze impedantie is een functie van de hoekfrequentie ω van de microgolven en kan in de hierboven gedefinieerde grootheden worden uitgedrukt:

$$Z_1(\omega) = Z_0 \left\{ 1 + \frac{\beta}{1 + jQ_R(\omega/\omega_R - \omega_R/\omega)} \right\}. \quad (5)$$

Elke niet-variabele impedantie kan worden weergegeven als een punt in het zgn. Smith-diagram [8]; $Z_1(\omega)$ stelt in dit diagram een cirkel voor, zie fig. 6.

In een Smith-diagram kan voor een punt in een microgolfschakeling zowel de vectoriële reflectiecoëfficiënt, dat is de spanningsverhouding van de ingaande en gereflecteerde microgolven, als de reële en de imaginaire component van de impedantie in verhouding tot de karakteristieke impedantie worden weergegeven. Uit deze gegevens kan de staande-golfverhouding of VSWR ('voltage standing-wave ratio') worden afgelezen. Deze grootheid is de verhouding van de spanningen in de buiken en knopen in de staande golf die ontstaat uit de ingaande en gereflecteerde microgolf.

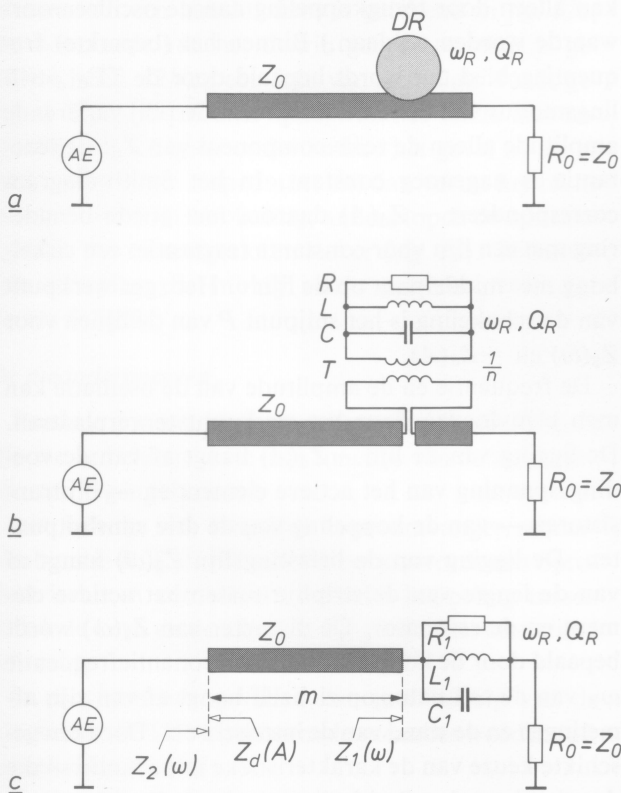


Fig. 5. Het koppelen van de diëlektrische resonator DR aan het actieve element AE. a) Schema waarin de koppelleiding, een microstriplijn met karakteristieke impedantie Z_0 , is aangegeven. De koppelleiding is afgesloten met een weerstand R_0 , die gelijk is aan Z_0 . ω_R resonantiehoekfrequentie en Q_R kwaliteitsfactor van de resonator. b) Schema waarin de resonator is vervangen door een parallelkring van R , L en C . De kring is via een transformator T met transformatieverhouding n met de koppelleiding verbonden. c) Schema waarin de kring en transformator zijn vervangen door een kring van R_1 , L_1 en C_1 . m lengte van de koppelleiding. $Z_1(\omega)$ de impedantie tussen strip en grondplaat bij de resonator, gezien in de richting van R_0 ; ω hoekfrequentie. $Z_2(\omega)$ idem aan het begin van de koppelleiding. $Z_d(A)$ ingangsimpedantie van het actieve element; A amplitude van de oscillatie.

[7] C. Tsironis en D. Hennings, Highly stable FET DROs using new linear dielectric resonator material, Electron. Lett. 19, 741-743, 1983.

[8] P. H. Smith, Transmission line calculator, Electronics 12, nr. 1 (januari), 29-31, 1939; L. V. Blake, Transmission lines and waveguides, Wiley, New York 1969.

De cirkel $Z_1(\omega)$ gaat voor $\omega = 0$ en $\omega = \infty$ door het centrum M van het Smith-diagram, aangezien Z_1 voor deze waarden van ω gelijk is aan de karakteristieke impedantie Z_0 . Het punt voor $\omega = \omega_R$, dus voor resonantie van de kring in fig. 5c, komt overeen met het rechter snijpunt van cirkel $Z_1(\omega)$ met de lijn h in het diagram, aangezien dan, volgens verg. (5), $Z_1 = Z_0 + R_1$. (De lijn h behoort bij impedanties die gelijk zijn aan zuivere weerstanden.) De diameter van de cirkel is gelijk aan $R_1 = \beta Z_0$; deze diameter wordt dus groter naarmate de koppeling van de resonator met de microstriplijn sterker is.

Het is een eigenschap van het Smith-diagram dat een punt in het diagram zich langs een cirkel met middelpunt M verplaatst als de plaats waar de impedantie wordt beschouwd, zich langs een microgolfgeleider (in ons geval dus de microstriplijn) beweegt. Beschouwen we de impedantie $Z_2(\omega)$ die het actieve element 'ziet' aan het begin van de koppelleiding — de impedantie van koppelleiding, resonator en afsluitimpedantie te

zamen — dan vinden we deze door de cirkel $Z_1(\omega)$ over een hoek θ rechtsom te verdraaien ten opzichte van M . Voor deze hoek geldt:

$$\theta = (2m/\lambda)360^\circ.$$

Hierin is m de lengte van de koppelleiding en λ de golflengte van de microgolven. De belastingslijn voor het actieve element komt nagenoeg overeen met de aldus verkregen cirkel $Z_2(\omega)$.

De oscilleervoorwaarde voor de gehele schakeling kunnen we uitdrukken als:

$$Z_d(A) + Z_2(\omega) = 0, \quad (6)$$

waarin de ingangsimpedantie Z_d van het actieve element een functie is van de amplitude A van de oscillatie. Er kan dus alleen oscillatie optreden als de (complexe) ingangsimpedantie van het actieve element een negatieve reële component bevat. (Dit is bij Gunn- en IMPATT-diodes het geval als de voedingsspanning aan bepaalde voorwaarden voldoet; bij transistoren kan alleen door terugkoppeling aan de oscilleervoorwaarde worden voldaan.) Binnen het (beperkte) frequentiegebied dat wordt bepaald door de $TE_{01\delta}$ -trillingsmodus van de resonator, verandert bij variërende amplitude alleen de reële component van Z_d : de reactantie is nagenoeg constant. In het Smith-diagram correspondeert $-Z_d(A)$ daarom met goede benadering met een lijn voor constante reactantie: een cirkelboog met middelpunt op de lijn v . Het zgn. werkpunt van de schakeling is het snijpunt P van de lijnen voor $Z_2(\omega)$ en $-Z_d(A)$.

De frequentie en de amplitude van de oscillatie kan men beïnvloeden door het werkpunt te verplaatsen. De ligging van de lijn $-Z_d(A)$ hangt af van de voedingsspanning van het actieve element en — bij transistoren — van de koppeling van de drie aansluitpunten. De ligging van de belastingslijn $Z_2(\omega)$ hangt af van de lengte van de striplijn tussen het actieve element en de resonator. De diameter van $Z_2(\omega)$ wordt bepaald door de koppelfactor. De resonantiefrequentie ω_R van de resonator op zichzelf hangt af van zijn afmetingen en de stand van de instelschroef. Door een geschikte keuze van de karakteristieke impedantie — die de schaal van het Smith-diagram bepaalt — kan men bewerkstelligen dat punt B , dat het punt $-Z_d(A = 0)$ voorstelt, binnen de belastingslijn ligt. Men kan gemakkelijk inzien dat het werkpunt dan altijd een stabiele ligging heeft.

Het afsluiten van de koppelleiding met een zuivere weerstand ter grootte van zijn karakteristieke impedantie heeft het voordeel dat componenten in het signaal met een van ω_R afwijkende frequentie worden gedempt. De resonator is namelijk 'elektrisch onwerkzaam' voor componenten met zulke frequenties. Men

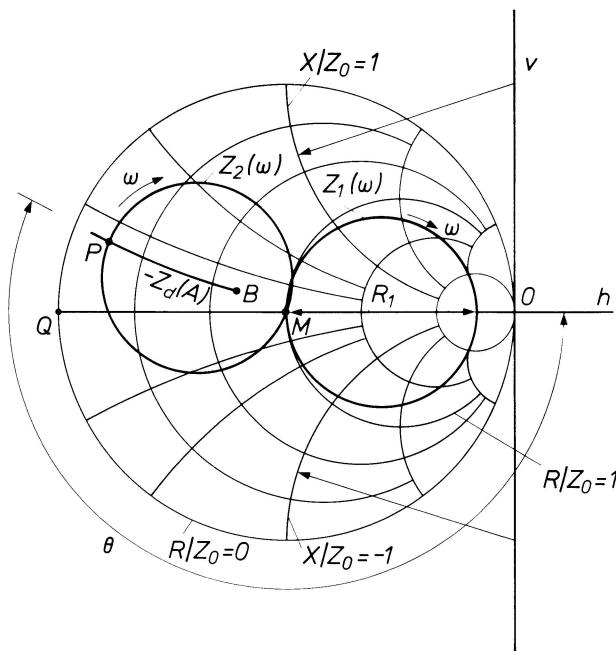


Fig. 6. Smith-diagram^[8] voor de koppeling van de resonator aan het actieve element. Ieder punt binnen de grote cirkel stelt een impedantie $Z = R + jX$ voor die is genormeerd t.o.v. de karakteristieke impedantie Z_0 . Cirkels door O met hun middelpunt op lijn v behoren bij een constante verhouding X/Z_0 . Boven lijn h is X positief, eronder negatief. Cirkels door O met hun middelpunt op lijn h behoren bij een constante verhouding R/Z_0 . Voor O geldt: $R = \infty$, $X = 0$. Voor M geldt: $R = Z_0$, $X = 0$. Voor Q geldt: $R = 0$, $X = 0$. In de figuur zijn cirkels voor de impedanties $Z_1(\omega)$ en $Z_2(\omega)$ getekend, zie fig. 5. De cirkel $Z_1(\omega)$ snijdt h in M voor $\omega = 0$ en $\omega = \infty$. Het tweede snijpunt van de cirkel met h behoort bij $Z_1(\omega_R) = Z_0 + R_1$. θ hoek waarover de cirkel voor $Z_1(\omega)$ moet worden verdraaid om $Z_2(\omega)$ te verkrijgen; voor $\theta = 360^\circ$ is m gelijk aan een halve golflengte. De lijn $-Z_d(A)$, zie fig. 5, blijkt overeen te komen met een lijn voor constante reactantie. Het punt B behoort bij $-Z_d(A = 0)$ en ligt binnen $Z_2(\omega)$. P , het snijpunt van de lijnen $-Z_d(A)$ en $Z_2(\omega)$, is het werkpunt, dat in dit geval een stabiele ligging heeft.

kan nagaan dat het afsluiten van de koppelleiding met een *reactantie* niet één (stabiel) werkpunt oplevert, maar drie verschillende werkpunten. Van deze drie werkpunten heeft er dan één een instabiele ligging. De andere twee werkpunten zijn weliswaar stabiel, maar corresponderen met frequenties die maar heel weinig van elkaar verschillen, zodat de uiteindelijke frequentie van de oscillatie niet voorspelbaar is. Het afsluiten van de striplijn met een reactantie levert dus geen praktisch bruikbare schakeling op.

De verschillende typen oscillatorschakelingen

Fig. 7 geeft een vijftal oscillatorschakelingen, waarin steeds een actief element met drie aansluitpunten is gebruikt [9]. Het actieve element kan in deze gevallen een bipolaire transistor of een veldeffecttransistor zijn. In de diverse schakelingen zijn de microstriplijnen afgesloten met impedanties die gelijk zijn aan hun karakteristieke impedantie Z_0 . De weerstand die in de weergegeven schakelingen als belasting fungeert, moet worden opgevat als een vervanging voor de eigenlijke zend- of ontvangelektronica. Het belangrijkste verschil tussen de schakelingen wordt gevormd door de plaatsing van de belastingsweerstand. De oscillatorschakelingen die hier zijn weergegeven, werden vroeger uitgevoerd met trilhouten.

Fig. 7a toont het eenvoudigste type oscillatorschakeling. De afsluitweerstand van de striplijn fungeert hier niet alleen als dempingsweerstand (R_D) maar ook als belastingsweerstand (R_L). De diëlektrische resonator wordt hier toegepast als zgn. reactieresonator ('reaction-type resonator').

Fig. 7b laat een schakeling met een transmissieresonator zien ('transmission-type resonator'). De belastingsweerstand is via een tweede striplijn met de resonator verbonden. De koppeling van de resonator met deze striplijn is minder sterk dan die met de eerste striplijn. Het signaal gaat van het actieve element via de resonator naar de belastingsweerstand, waarbij componenten met frequenties buiten het doorlaatgebied van de resonator dus sterk worden verzwakt.

In de schakeling van fig. 7c zijn de dempingsweerstand en de belastingsweerstand met verschillende aansluitpunten van de transistor verbonden. De belastingsweerstand is voorzien van een aanpassingsnetwerk. De resonator is zo aan de striplijn gekoppeld dat bij de resonantiefrequentie zoveel mogelijk energie wordt gereflecteerd. Tussen het actieve element en de resonator wordt dan in de striplijn een staande golf opgewekt. Men noemt deze schakeling daarom een oscillator met reflectieresonator ('reflection-type resonator').

In de schakeling van fig. 7d is er aan twee aansluitpunten van het actieve element een striplijn aangeslo-

ten die is gekoppeld aan de resonator. Deze striplijnen vormen met de resonator een terugkoppeltraject. Men spreekt daarom van een oscillator met terugkoppelresonator ('feedback-type resonator'). De belastings-

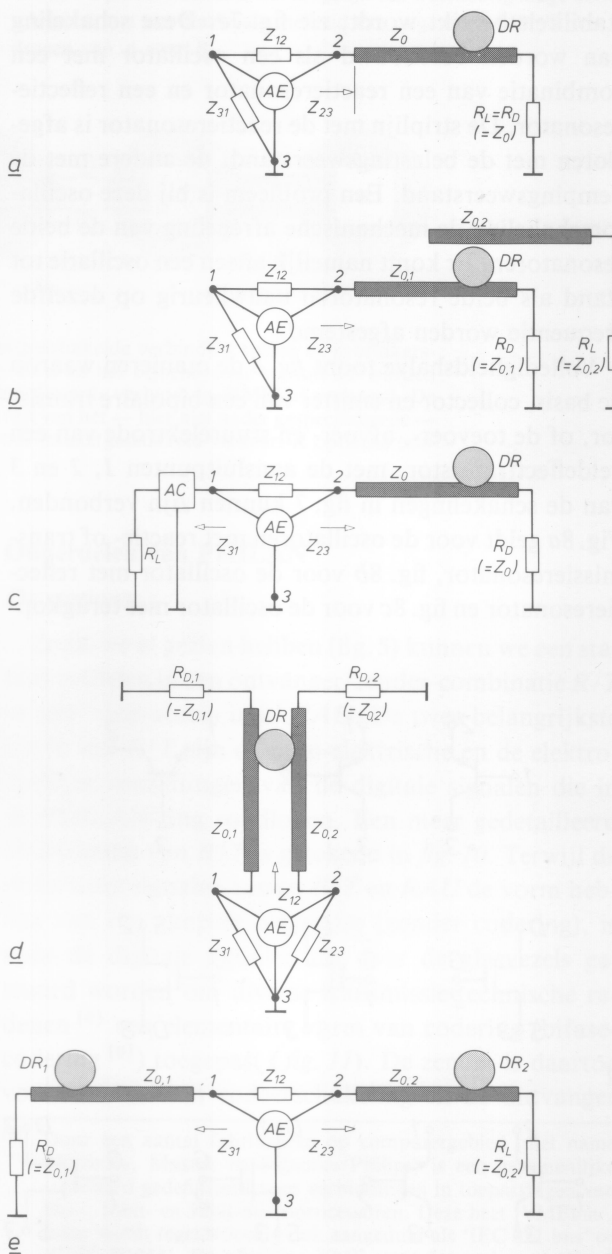


Fig. 7. De verschillende oscillatorschakelingen. a) Oscillator met reactieresonator. 1, 2, 3 aansluitpunten van het actieve element. Z_{12} , Z_{31} , Z_{23} impedanties tussen de aansluitpunten. R_L belastingsweerstand. R_D dempingsweerstand. R_L en R_D zijn hier gecombineerd tot één weerstand, die gelijk is aan de karakteristieke impedantie Z_0 van de koppelleiding. b) Oscillator met transmissieresonator. $Z_{0,1}$, $Z_{0,2}$ karakteristieke impedanties van de koppelleidingen. c) Oscillator met reflectieresonator. AC aanpassingsnetwerk voor de belastingsweerstand. d) Oscillator met terugkoppelresonator. $R_{D,1}$, $R_{D,2}$ dempingsweerstand van de koppelleidingen. e) Oscillator met twee resonatoren: DR_1 en DR_2 .

[9] I. M. Clarke en B. F. van der Heijden, Dielectric resonator oscillators, Proc. Military Microwaves '84, Londen 1984, blz. 591-595.

weerstand maakt deel uit van de impedanties Z_{31} of Z_{23} , die met het derde aansluitpunt van de transistor zijn verbonden.

De voorgaande schakelingen zijn steeds uitgevoerd met één resonator. Men kan echter ook twee resonatoren opnemen, waardoor een nog grotere frequentie-stabiliteit bereikt wordt, zie fig. 7e. Deze schakeling kan worden beschouwd als een oscillator met een combinatie van een reactieresonator en een reflectieresonator. De striplijn met de reactieresonator is afgesloten met de belastingsweerstand, de andere met de dempingsweerstand. Een probleem is bij deze oscillatorschakeling de mechanische afregeling van de beide resonatoren. Er komt namelijk alleen een oscillatie tot stand als beide resonatoren nauwkeurig op dezelfde frequentie worden afgestemd.

Volledigheidshalve toont fig. 8 de manieren waarop de basis, collector en emitter van een bipolaire transistor, of de toevoer-, afvoer- en stuur-elektrode van een veldeffecttransistor, met de aansluitpunten 1, 2 en 3 van de schakelingen in fig. 7 kunnen zijn verbonden. Fig. 8a geldt voor de oscillatoren met reactie- of transmissieresonator, fig. 8b voor de oscillator met reflectieresonator en fig. 8c voor de oscillator met terugkop-

pelresonator. Men kan in de eerste drie schakelingen van fig. 7 ook Gunn- of IMPATT-diodes opnemen. In fig. 7a en b moeten dan aansluitpunt 1 en de impedanties Z_{12} en Z_{31} worden weggelaten. In fig. 7c moet aansluitpunt 1 worden weggelaten en de impedanties Z_{12} en Z_{31} moeten worden samengevoegd.

De stabiliteit van de frequentie

De resonantiefrequentie van de oscillatorschakeling vertoont (geringe) variaties, die zijn te onderscheiden in variaties over lange tijd en variaties over korte tijd. De variaties over lange tijd zijn een gevolg van temperatuurfluctuaties; de grootte ervan wordt bepaald door de temperatuurcoëfficiënt τ_{f_0} voor de oscillatorresonantiefrequentie f_0 (op analoge wijze gedefinieerd als τ_{f_R} , zie verg. 1). De variaties over korte tijd hebben een toevallig karakter en worden faseruis genoemd.

De temperatuurcoëfficiënt τ_{f_0} hangt af van de thermische eigenschappen van het actieve element, de diëlektrische resonator, de microstriplijn en de behuizing waarin de microgolfschakeling is gemonteerd. Door het kiezen van een geschikte constructie kan men de invloed van de microstriplijn en de behuizing op τ_{f_0} klein maken vergeleken met de invloed van andere elementen. De coëfficiënt τ_{f_0} hangt dan nagenoeg alleen af van de eigenschappen van het actieve element en de resonator.

De temperatuurcoëfficiënt van de oscillatorschakeling kan men als volgt splitsen ^[10]:

$$\tau_{f_0} = \frac{F(\beta)}{Q_R} \frac{d\varphi_d}{dt} + \tau_{f_R}, \quad (7)$$

met $F(\beta)$ een functie van de koppelfactor en φ_d het argument dat behoort bij de ingangsimpedantie Z_d van het actieve element (zie fig. 5c). De eerste term in (7) is voor alle (halfgeleidende) actieve elementen negatief en heeft een waarde die ligt in het gebied van -2×10^{-6} tot $-10 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$. Aangezien $|\tau_{f_0}|$ zo klein mogelijk moet zijn, dient τ_{f_R} een geringe positieve waarde te hebben. De juiste waarde van τ_{f_R} kan, zoals gezegd, bereikt worden door voor het resonator-materiaal een mengkeramiek met een bepaalde verhouding van $\text{Ba}_2\text{Ti}_9\text{O}_{20}$ en BaTi_4O_9 te kiezen, maar ook door de resonator als zgn. sandwich-resonator op te bouwen uit twee verschillende materialen ^[11].

De (eenzijdige) vermogensdichtheid van de faseruis (dat is het ruisvermogen in een bandbreedte van 1 Hz) wordt doorgaans gerelateerd aan het uitgaande vermogen P_0 van de oscillator. Deze relatieve vermogensdichtheid $L(f - f_0)$ van de faseruis op een afstand $f - f_0$ van de oscillatorfrequentie is evenredig met f_0^2 en de absolute temperatuur en omgekeerd evenredig met het kwadraat van de kwaliteitsfactor Q_0 van de oscillator ^[12]. Indien men twee spectra van de faseruis

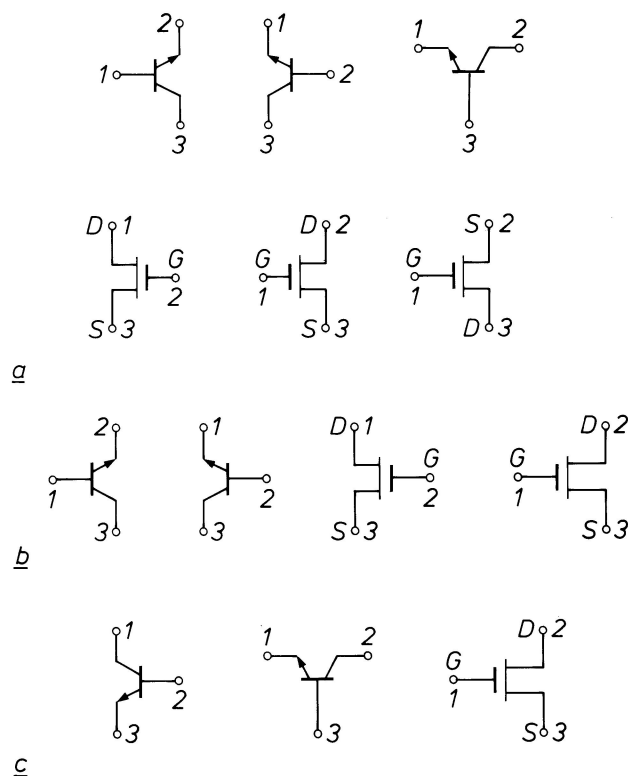


Fig. 8. De verschillende manieren waarop een bipolaire transistor of een veldeffecttransistor in de schakelingen van fig. 7 kan worden opgenomen. De nummering van de aansluitpunten correspondeert met die van fig. 7. a) De actieve elementen voor de in fig. 7a en b getekende oscillatoren. b) Idem voor de in fig. 7c getekende oscillator. c) Idem voor de in fig. 7d getekende oscillator.

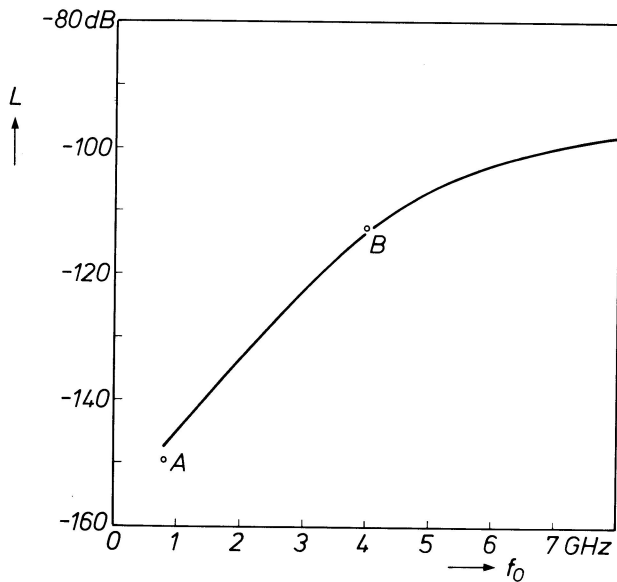


Fig. 9. De vermogensdichtheid van de faseruis van microgolfoscillatoren met diëlektrische resonatoren als functie van de oscillatiefrequentie f_0 . De kromme is het resultaat van een extrapolatie met behulp van vergelijking (9) van gegevens uit de literatuur^[13] (A) en eigen metingen (B). Langs de verticale as is de verhouding L in dB uitgezet van de vermogensdichtheid in W/Hz van het (eenzijdige) vermogensdichtheidsspectrum van de faseruis op een afstand van 10 kHz van f_0 , en het uitgaande vermogen van de oscillator.

bij verschillende frequenties f_0 en f_0' , verschillende uitgaande vermogens P_0 en P_0' en verschillende kwaliteitsfactoren Q_0 en Q_0' bij gelijke temperatuur met elkaar vergelijkt, verkrijgt men de volgende formule voor de verhouding der relatieve vermogensdichtheden:

$$\frac{L(f - f_0)}{L'(f - f_0)} = \frac{f_0^2 Q_0'^2 P_0'}{f_0'^2 Q_0^2 P_0} \quad (8)$$

Indien ook de koppelfactoren van de resonatoren gelijk zijn, kan men in (8) de kwaliteitsfactoren van de oscillatoren vervangen door die van de resonatoren. Bovendien is bekend dat het maximale uitgaande vermogen van microgolfoscillatoren omgekeerd evenredig is met het kwadraat van de oscillatorfrequentie. Vergelijking (8) kan dan worden geschreven als:

$$\frac{L(f - f_0)}{L'(f - f_0)} = \frac{f_0^4 Q_R'^2}{f_0'^4 Q_R^2} \quad (9)$$

Met behulp van deze vergelijking kan inzicht worden verkregen in de faseruis die bij hoge frequenties is te verwachten, zie fig. 9. In deze figuur is behalve van verg. (9) ook gebruik gemaakt van gegevens uit de literatuur^[13] (punt A) en van door ons gemeten relatieve vermogensdichtheden van de faseruis bij 4 GHz (punt B). De kwaliteitsfactoren Q_R zijn vergelijkbaar, aangezien in beide gevallen resonatoren van zuiver $\text{Ba}_2\text{Ti}_9\text{O}_{20}$ zijn gebruikt. Fig. 9 en verg. (9) laten zien dat bij hoge frequenties de faseruis sterk toeneemt.

Daarnaast is gebleken dat bipolaire transistoren zeer geschikt zijn om te worden toegepast in oscillator-schakelingen met weinig faseruis.

Toepassingen

Diëlektrische resonatoren zullen vooral de nu gebruikelijke trilholten vervangen bij het stabiliseren van microgolfoscillatoren, bij voorbeeld in microgolf-ontvangers voor televisieomroep via satellieten^[14]. Daarnaast zijn er een aantal toepassingen ontstaan die zonder diëlektrische resonatoren ondenkbaar zouden zijn. Wij zullen er hiervan twee behandelen.

Een oscillator voor een transponder in een weerballon

Een transponder is een combinatie van een zender en een ontvanger. Weerballons worden tegenwoordig ten behoeve van de plaatsbepaling ervan met een transponder voor microgolven uitgerust, zie fig. 10. Een dergelijke transponder moet niet alleen klein en licht maar ook nog goedkoop zijn. Dit laatste omdat de transponder doorgaans niet meer wordt teruggevonden.

De transponder reageert op het signaal van een zender op de grond. Indien de frequentie en een kenmerkende modulatie van het signaal overeenstemmen met tevoren ingebrachte gegevens, antwoordt de transponder door een signaal met dezelfde frequentie en modulatie uit te zenden. Uit het tijdsverloop tussen het zenden van het zoeksignaal en het ontvangen van het antwoordsignaal en uit de hoeken waaronder dit laatste signaal wordt ontvangen, kan de positie van de weerballon worden bepaald.

Het signaal in de transponder, dat een frequentie van 9,2 GHz heeft, wordt verkregen door het uitgaande signaal van 4,6 GHz van een oscillator in frequentie te verdubbelen en vervolgens te versterken. De modulatie van het signaal komt tot stand door het in- en uitschakelen van de oscillator volgens een vast patroon. Er zijn drie verschillende schakelingen voor de oscillator ontwikkeld, die respectievelijk zijn uitgerust met een reactie-, transmissie- of reflectieresonator, zie

- [10] T. Makino en A. Hashima, A highly stabilized MIC Gunn oscillator using a dielectric resonator, IEEE Trans. **MTT-27**, 633-638, 1979;
- C. Tsironis en V. Pauker, Temperature stabilization of GaAs MESFET oscillators using dielectric resonators, IEEE Trans. **MTT-31**, 312-314, 1983.
- [11] C. Tsironis en P. Lesartre, Temperature stabilization of GaAs FET oscillators using dielectric resonators, Proc. 12th Eur. Microwave Conf., Helsinki 1982, blz. 181-186.
- [12] K. Kurokawa, Injection locking of microwave solid-state oscillators, Proc. IEEE **61**, 1386-1410, 1973.
- [13] G. D. Alley en H.-C. Wang, An ultra-low noise microwave synthesizer, IEEE Trans. **MTT-27**, 969-974, 1979.
- [14] P. Harrop, P. Lesartre en T. H. A. M. Vlek, Ruisarme 12GHz-ontvangers voor televisieomroep via satelliet, Philips Techn. T. **39**, 237-249, 1980.

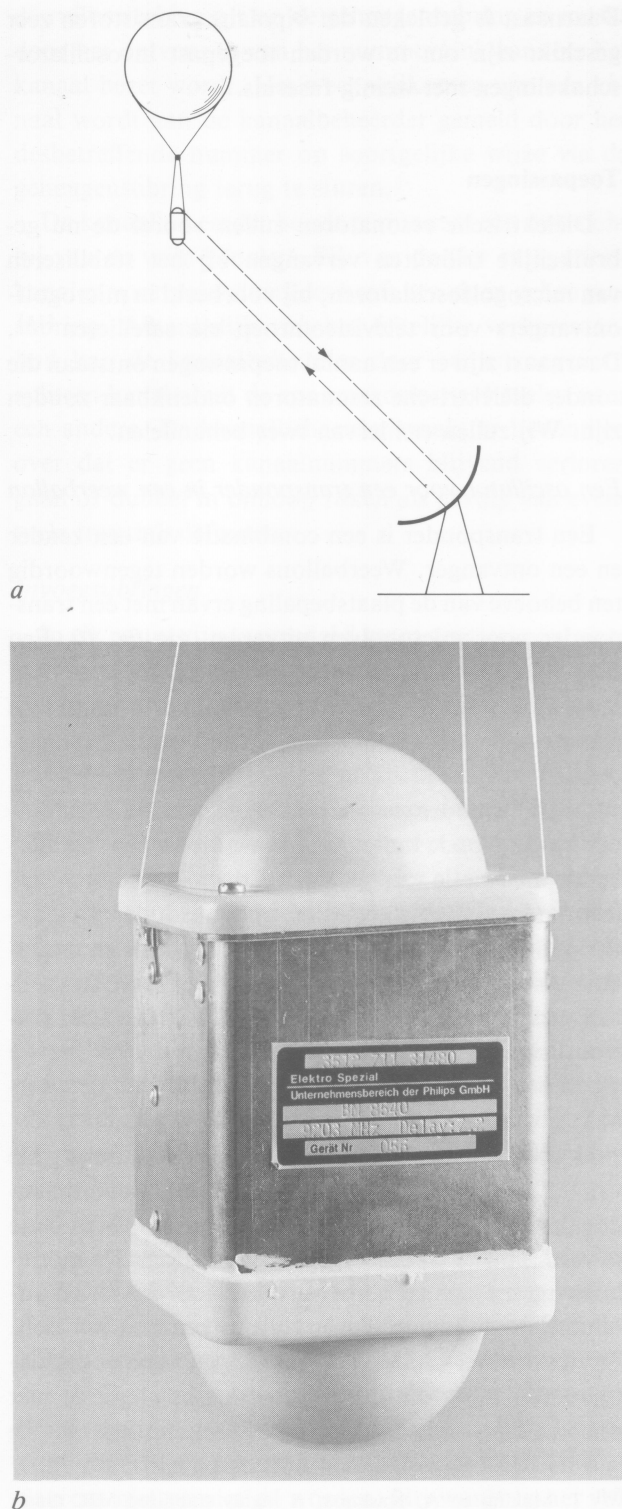


Fig. 10. *a)* Het principe van de bepaling van de plaats van een weerballon door middel van een transponder, een combinatie van een zender en een ontvanger. De transponder, die is opgehangen aan de ballon, reageert op een signaal dat wordt uitgezonden via een parabolische antenne op de grond. De plaats van de weerballon volgt uit de hoeken waaronder het grondstation het signaal van de transponder ontvangt en uit de tijd tussen het zenden en ontvangen van het signaal. *b)* De transponder, compleet met antennes, die zich onder de afschermkappen aan onder- en bovenzijde bevinden. Het zendvermogen bedraagt 200 mW en is voldoende om een afstand van 50 km te overbruggen. De transponder bevat een microgolfoscillator met diëlektrische resonator en wordt vervaardigd door het Philips GmbH bedrijfssonderdeel Systeme und Sondertechnik te Bremen.

fig. 7a-c. Het actieve element van de oscillatorschakelingen is een bipolaire transistor, die is aangesloten volgens het tweede schema van fig. 8a of b. De schakelingen zijn zo uitgevoerd dat de punten 1 en 2 niet verbonden zijn ($Z_{12} = \infty$). Bij de schakelingen met reactie- of transmissieresonator (fig. 7a en b) is Z_{31} een zuiver capacatieve terugkoppelimpedantie. Bij de schakeling met reflectieresonator (fig. 7c) dient het aanpasnetwerk AC om de belastingsweerstand van 50 Ω te transformeren in een grote weerstand tussen de collector en de emitter. Ook bij deze schakeling is een capacatieve terugkoppelimpedantie aanwezig tussen de aansluitpunten 1 en 3.

Het is noodzakelijk dat de waarde van de terugkoppelimpedantie zeer precies wordt ingesteld, daar anders de oscillatorschakeling gaat resoneren in de $HE_{11\delta}$ - of $TM_{01\delta}$ -modus, waarvan de resonantiepieken in het frequentiespectrum naast die van de gewenste $TE_{01\delta}$ -modus liggen, zie fig. 1c. Doordat bij het in- en uitschakelen van de oscillator deingangsimpedantie Z_d van het actieve element door aanloopverschijnselen verandert, is deze instelling erg moeilijk.

In fig. 11 zijn de drie verschillende oscillatorschakelingen afgebeeld. Men kan het type schakeling herkennen aan de loop van de sporen op het keramische substraat. De diëlektrische resonator van zuiver $Ba_2Ti_9O_{20}$ is direct op het substraat geplaatst en heeft een diameter van 14 mm en een hoogte van 5 mm. De hoogte van de aluminium behuizing is daardoor slechts 14 mm; de lengte en breedte zijn beide 50 mm. De gehele oscillator weegt niet meer dan 80 g. Met behulp van een schroef in het deksel kan de oscillatiefrequentie binnen een gebied van ± 30 MHz worden ingesteld.

In de schakelingen wordt gebruik gemaakt van transistoren zonder uitlopers ('transistorchips') in een speciale uitvoering voor microgolf frequenties. Bij een voedingsspanning van 9 V en een ingaande stroom van 32 mA is het uitgaande vermogen van de oscillatoren 30 mW. Fig. 12a toont voor de oscillator met transmissieresonator het verloop van de frequentie als functie van de temperatuur. Dit verloop komt overeen met een temperatuurcoëfficiënt van $-5,1 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$. Als de resonatoren zouden zijn vervaardigd van $Ba_2Ti_9O_{20}$ met ongeveer 30% $BaTi_4O_9$, zou de absolute waarde van de temperatuurcoëfficiënt nog kleiner zijn en $10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ niet overschrijden. Fig. 12b toont voor de schakeling met reactieresonator het resultaat van metingen van het ruisspectrum. Het is gebleken dat het spectrum naast faseruis ook enige amplitude-ruis bevat. De ruis van de oscillator is zo gering dat het meetresultaat bijna overeenkomt met het eigen ruisspectrum van de — zeer gevoelige — spectrum-analysator (Hewlett-Packard 8566 A).

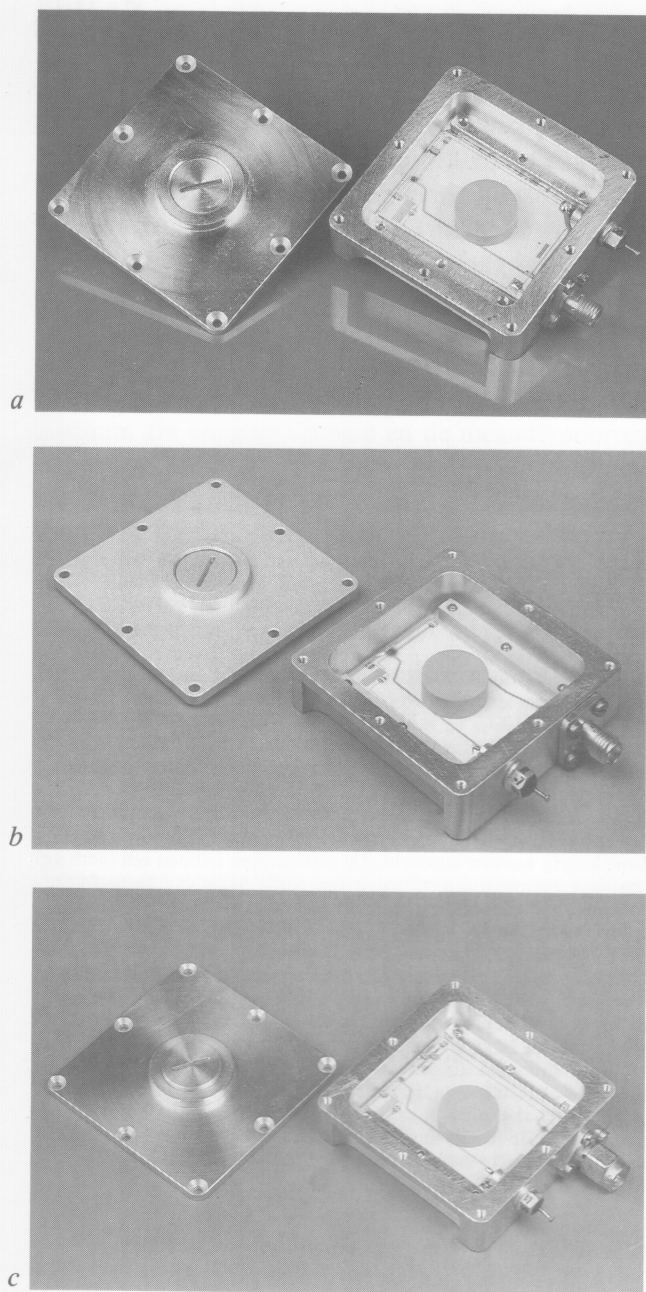


Fig. 11. De verschillende oscillatoren voor de transponder van fig. 10, die zijn geconstrueerd en beproefd. a) Oscillator met reactieresonator. b) Oscillator met transmissieresonator. c) Oscillator met reflectieresonator. Duidelijk is bij de drie oscillatoren de instelschroef in de deksel van de behuizing te onderkennen. Met deze schroef kan de oscillatiefrequentie nauwkeurig worden ingesteld, zie fig. 2c.

De kant en klare transponder van fig. 10b bevat, naast de oscillatorschakeling, ook batterijen en de zend- en ontvangtschakeling met de bijbehorende antennes. De antennes bevinden zich onder de afschermkappen aan de onder- en bovenzijde. Het zendvermogen bedraagt 200 mW, waardoor een afstand van 50 km kan worden overbrugd. De transponder wordt vervaardigd door het Philips GmbH bedrijfsonderdeel Systeme und Sondertechnik te Bremen.

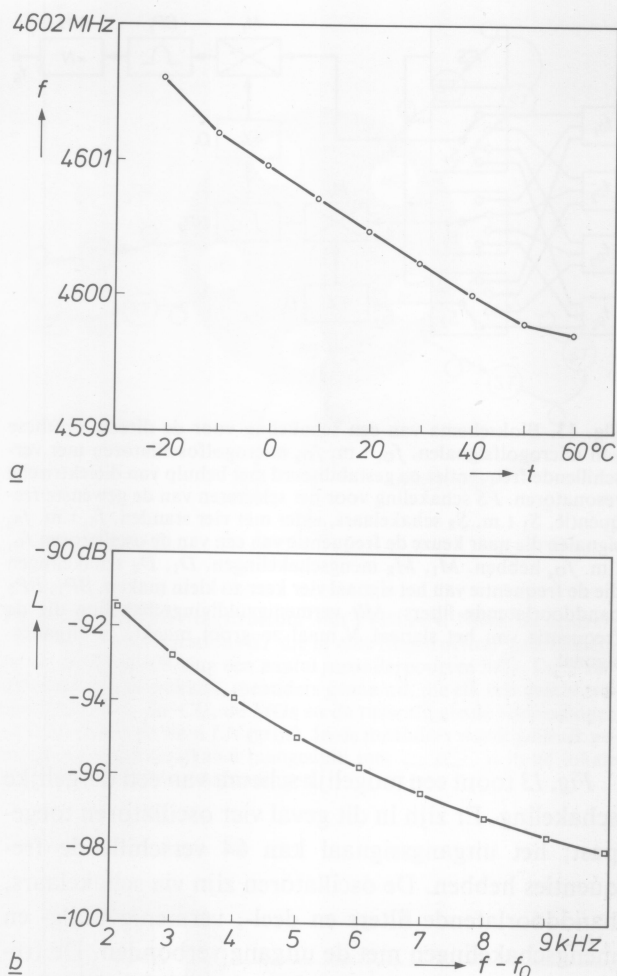


Fig. 12. a) Het verloop van de frequentie f als functie van de temperatuur t voor de oscillator met transmissieresonator van fig. 11b. (De bijbehorende temperatuurcoëfficiënt van $-5,1 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ kan nog worden verbeterd door het kiezen van een iets andere samenstelling van het materiaal van de resonator.) b) Het (eenzijdige) vermogensdichtheidspectrum van de faseruis van de oscillator met reactieresonator van fig. 11a. Zie ook het onderschrift van fig. 9.

Oscillatoren voor directe frequentiesynthese

Doorgaans werken schakelingen voor de synthese van signalen met frequenties in het microgolfsgebied volgens de *indirecte* methode. Dat wil zeggen dat de stabiliteit van de frequentie van het uitgangssignaal is gewaarborgd door het opnemen van een faselus (PLL: phase-locked loop) in de schakeling. Synthèse van microgolfsignalen volgens de *directe* methode is gebaseerd op het direct mengen van zeer stabiele referentiesignalen. Als de referentiesignalen worden gegenereerd door oscillatoren die zijn gestabiliseerd met trilhouten, wordt de schakeling tamelijk omvangrijk. Met oscillatoren met diëlektrische resonatoren wordt daarentegen een handzame schakeling met een stabiel uitgangssignaal verkregen^[15].

[15] G. Lütke, Dielectric resonator stabilised reference oscillators, IEE Colloq. on Microwave programmable sources and frequency synthesis, Londen 1981, blz. 3/1-3/4.

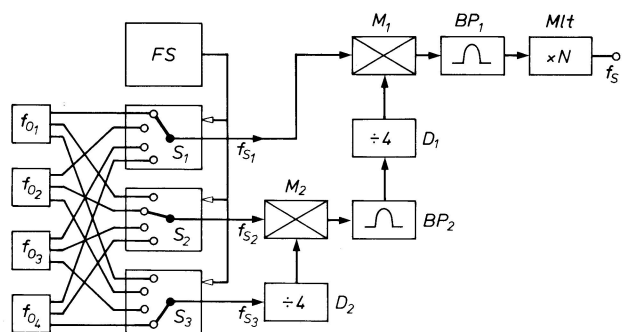


Fig. 13. Blokschema van een schakeling voor de directe synthese van microgolfsignalen. f_{01} t.m. f_{04} microgolfsignalen met verschillende frequenties en gestabiliseerd met behulp van diëlektrische resonatoren. FS schakeling voor het selecteren van de gewenste frequentie. S_1 t.m. S_3 schakelaars, ieder met vier standen. f_{s1} t.m. f_{s3} signalen die naar keuze de frequentie van een van de oscillatoren f_{01} t.m. f_{04} hebben. M_1 , M_2 mengschakelingen. D_1 , D_2 schakelingen die de frequentie van het signaal vier keer zo klein maken. BP_1 , BP_2 banddoorlatende filters. Mlt vermenigvuldigingschakeling die de frequentie van het signaal N maal zo groot maakt. f_s uitgangssignaal.

Fig. 13 toont een mogelijk schema van een dergelijke schakeling. Er zijn in dit geval vier oscillatoren toegepast; het uitgangssignaal kan 64 verschillende frequenties hebben. De oscillatoren zijn via schakelaars, banddoorlatende filters en deel-, vermenigvuldig- en mengschakelingen met de uitgang verbonden. De frequentie f_s van het uitgangssignaal wordt bepaald door de formule:

$$f_s = N \left(f_{s1} + \frac{f_{s2} + f_{s3}/4}{4} \right).$$

Hierin zijn f_{s1} , f_{s2} en f_{s3} naar keuze gelijk aan een der

frequenties f_{01} , f_{02} , f_{03} of f_{04} van de oscillatoren. De factor N van de vermenigvuldigingschakeling kan bij het gebruik van diëlektrische resonatoren klein zijn. Als men gebruik maakt van oscillatoren die zijn gestabiliseerd met kwartskristallen, moet N groot zijn, aangezien deze oscillatoren werken bij een frequentie van ongeveer 100 MHz. Een grote waarde van N verhoogt de bijdrage van de ruis in het uitgangssignaal. De schakeling met microgolfsignalen die zijn gestabiliseerd met diëlektrische resonatoren, kan dus een uitgangssignaal leveren dat niet alleen stabiel maar ook zeer ruisarm is.

Samenvatting. Diëlektrische resonatoren maken het mogelijk de frequentie van het uitgangssignaal van geïntegreerde microgolfsignalen te stabiliseren. Dit soort oscillatoren zal in de nabije toekomst veel worden toegepast in microgolfontvangers voor televisieomroep via satellieten. De gewenste hoge kwaliteitsfactor, geringe temperatuurafhankelijkheid en kleine afmetingen van diëlektrische resonatoren konden pas worden bereikt toen mengkeramieken van $Ba_2Ti_9O_{20}$ en $BaTi_4O_9$ of TiO_2 ter beschikking kwamen. Deze materialen kunnen op hun toepasbaarheid worden beoordeeld door in cilindervormige materiaalmonsters microgolfresonanties op te wekken en daarvan de frequentiespectra te meten. In de praktijk zijn diëlektrische resonatoren schijfvormig. Ze zijn gemonteerd in een metalen behuizing en de resonantiefrequentie kan mechanisch nauwkeurig worden ingesteld. De resonatoren hebben een (geringe) positieve temperatuurcoëfficiënt ten einde negatieve temperatuurcoëfficiënten van andere elementen in de oscillatorschakeling te compenseren. In het Smith-diagram kan voor het actieve element in de oscillatorschakeling de belastingslijn, die de impedantie van koppelleiding en resonator als functie van de oscillatiefrequentie weergeeft, worden getekend. Het snijpunt van de belastingslijn met de lijn voor de ingangsimpedantie van het actieve element vormt het werkpunt. De ligging van het werkpunt kan al dan niet stabiel zijn. De oscillatorschakelingen kunnen met een reactie-, transmissie-, reflectie- of terugkoppelresonator zijn uitgevoerd. Er zijn stabiele oscillatorschakelingen voor transponders voor weerballons ontworpen. Ook is de toepassing van diëlektrische resonatoren in oscillatoren voor directe frequentiesynthese onderzocht.

Wetenschappelijke publikaties

Deze publikaties zijn afkomstig van medewerkers van laboratoria en fabrieken, behorende tot of samenwerkende met ondernemingen van het Philips-concern, in het bijzonder van medewerkers van de hieronder genoemde research-laboratoria. De publikaties zijn alfabetisch naar tijdschrift gerangschikt.

Philips GmbH Forschungslaboratorium Aachen, Weißhausstraße, 5100 Aachen, Duitsland	A
Philips Research Laboratory Brussels, 2 avenue Van Becelaere, 1170 Brussel, België	B
Philips Natuurkundig Laboratorium, Postbus 80 000, 5600 JA Eindhoven	E
Philips GmbH Forschungslaboratorium Hamburg, Vogt-Kölln-Straße 30, 2000 Hamburg 54, Duitsland	H
Laboratoires d'Electronique et de Physique Appliquée, 3 avenue Descartes, 94450 Limeil-Brévannes, Frankrijk	L
Philips Laboratories, N.A.P.C., 345 Scarborough Road, Briarcliff Manor, N.Y. 10510, U.S.A.	N
Philips Research Laboratories, Cross Oak Lane, Redhill, Surrey RH1 5HA, Engeland	R
Philips Research Laboratories Sunnyvale P.O. Box 9052, Sunnyvale, CA 94086, U.S.A.	S

E. Roaux, J. C. Richard & C. Piaget L	Third-generation image intensifier	Adv. Electron. & Electron Phys. 64A	71-75	1985
J. P. Boutot (<i>Hyperlec, Brive</i>), R. Goret, M. Jatteau, J. Paulin & J. C. Richard L	Diode intensifier tube with fast phosphor screen	Adv. Electron. & Electron Phys. 64A	113-122	1985
M. Lemonier, C. Piaget & M. Petit L	Thinned backside-bombarded RGS-CCD for electron imaging	Adv. Electron. & Electron Phys. 64A	257-265	1985
B. Jean*, J. P. Boutot* (* <i>Hyperlec, Brive</i>), V. Duchenois & R. Polaert L	High-resolution and large size wafer microchannel image intensifier	Adv. Electron. & Electron Phys. 64B	315-322	1985
V. Duchenois, M. Fouassier & C. Piaget L	High-resolution luminescent screens for image intensifier tubes	Adv. Electron. & Electron Phys. 64B	365-371	1985
W. Schreiner & T. Fawcett (<i>Dow Chemical, Midland, MI</i>) N	Results of a round robin study of systematic errors found in routine X-ray diffraction raw data	Adv. X-ray Anal., Vol. 28, C. S. Barret <i>et al.</i> (eds), Plenum, New York	309-314	1985
A. Giakoumis*, J. Michel* (* <i>RTC, Limeil-Brévannes</i>), V. Pauker & M. Binet L	Amplificateurs GaAs monolithiques à large bande et gain élevé	Ann. Télécommun. 40	127-134	1985
A. J. Fox R	Acoustooptic figure of merit for single crystal germanium at 10.6- μ m wavelength	Appl. Opt. 24	2040-2041	1985
P. H. Joosten, P. Heller, H. J. P. Nabben, H. A. M. van Hal, T. J. A. Popma & J. Haisma E	Optical thin layers of MgF ₂ produced by decomposition of organic magnesium-fluoro compounds	Appl. Opt. 24	2674-2678	1985
J. Haisma, J. H. T. Pasman, J. M. M. Pasmans & P. van der Werf E	Wide-spectrum tint-free reflection reduction of viewing screens	Appl. Opt. 24	2679-2686	1985
J. Hasker & N. C. J. van Hijningen E	Cathode and scaling properties related to the shape of current-voltage characteristics	Appl. Surf. Sci. 24	318-329	1985
J. Hasker & H. J. H. Stoffelen E	'Alternative' Auger analysis reveals important properties of M-type and scandate cathodes	Appl. Surf. Sci. 24	330-339	1985
P.-J. Courtois B	On time and space decomposition of complex structures	Commun. ACM 28	590-603	1985
P. Delsarte & P. Piret B	An extension of an inequality by Ahlswede, El Gamal and Pang for pairs of binary codes	Discrete Math. 55	313-315	1985
A. F. Dadds R	Miranda — a mobile ESM laboratory	IEE Proc. F 132	280-282	1985
P. D. White, M. K. Gurcan & R. J. G. MacNamee R	900 MHz digital cordless telephone	IEE Proc. F 132	425-432	1985

R. S. Soin & P. J. Rankin	R	Efficient tolerance analysis using control variates	IEE Proc. G 132	131-142	1985
T. N. Saadawi & M. Schwartz	N	Distributed switching for data transmission over two-way CATV	IEEE J. SAC-3	323-329	1985
P. A. Gough & J. A. Slatter	R	A model for the GTO thyristor during switch-off	IEEE Trans. ED-31	1796-1803	1984
P. F. Fewster	R	Alignment of double-crystal diffractometers	J. Appl. Cryst. 18	334-338	1985
P. A. Breddels & H. A. van Sprang	E	An analytical expression for the optical threshold in highly twisted nematic systems with nonzero tilt angles at the boundaries	J. Appl. Phys. 58	2162-2166	1985
P. Blood	R	Measurement of optical absorption in epitaxial semiconductor layers by a photovoltage method	J. Appl. Phys. 58	2288-2295	1985
A. A. van Gorkum & M. H. L. M. van den Broek	E	Spot reduction in electron guns using a selective pre-focusing lens	J. Appl. Phys. 58	2902-2908	1985
J. W. D. Martens & W. F. Godlieb	E	Magneto-optical properties of 100-keV Ne ⁺ -implanted epitaxial Y ₃ Fe ₅ O ₁₂ thin films	J. Appl. Phys. 58	3180-3184	1985
K. A. Schouhamer Immink & J. J. M. Braat	E	Experiments toward an erasable Compact Disc digital audio system	J. Audio Eng. Soc. 32	531-538	1984
C. Ronse	B	An isomorphism for digital images	J. Comb. Theory A 39	132-159	1985
K. H. J. Buschow	E	Amorphous alloys	J. Less-Common Met. 110	205-223	1985
P. Schobinger-Papamantellos (ETH, Zürich) & K. H. J. Buschow	E	Incommensurate magnetic structure of ErGe studied by neutron diffraction and magnetic measurements	J. Less-Common Met. 111	117-124	1985
P. Schobinger-Papamantellos (ETH, Zürich) & K. H. J. Buschow	E	Ferromagnetism of NdGe and PrGe studied by neutron diffraction and magnetic measurements	J. Less-Common Met. 111	125-138	1985
G. Duggan	R	A critical review of heterojunction band offsets	J. Vac. Sci. & Technol. B 3	1224-1230	1985
H. Baumgart & F. Philipp (Max Planck Inst., Stuttgart)	N	High-voltage electron microscopy investigation of subgrain boundaries in recrystallized silicon-on-insulator structures	Mater. Res. Soc. Symp. Proc. 35	593-598	1985
J. B. Theeten, S. Gourrier, P. Friedel, M. Taillepié, D. Arnoult & D. Benarroche	L	Plasma passivation scheme for III-V compound semiconductor surfaces	Mater. Res. Soc. Symp. Proc. 38	499-510	1985
M. H. L. M. van den Broek	E	Simulation of 3D electron beams with a fitting technique	Optik 71	27-30	1985
A. A. van Gorkum	E	The cup model for the cathode lens in triode electron guns	Optik 71	93-104	1985
E. H. L. Aarts & P. J. M. van Laarhoven	E	Statistical cooling: a general approach to combinatorial optimization problems	Philips J. Res. 40	193-226	1985
K. H. J. Buschow, D. B. de Mooij & H. M. van Noort	E	The Fe-rich isothermal section of Nd-Fe-B at 900 °C	Philips J. Res. 40	227-238	1985
J. M. Shannon	R	A comparison between bulk unipolar diodes and Schottky barriers	Philips J. Res. 40	239-258	1985
T. Krol & W. J. van Gils	E	The input/output architecture of the (4,2) concept fault-tolerant computer	Proc. 15th Ann. Int. Symp. on Fault-tolerant computing (FTCS 15), Ann Arbor, MI, 1985	254-259	1985
P. J. M. van Laarhoven, E. H. L. Aarts & M. Davio	E, B	PHIPLA — a new algorithm for logic minimization	Proc. 22nd Design Automation Conf., Las Vegas 1985	739-743	1985
R. S. Soin, J. B. Hughes & N. C. Bird	R	A novel approach to the time domain simulation of switched capacitor systems	Proc. Eur. Conf. on Circuit theory and design, Prague 1985	713-716	1985
P. Huguet, P. Baudet, J. Maluenda, J. Bellaiche & M. Pertus	L	A fully implanted 1 W, 18 GHz FET	Proc. 15th Eur. Microwave Conf., Paris 1985	251-255	1985
P. Gamand	L	A 0.1 to 25 GHz HMIC distributed amplifier on Al ₂ O ₃ substrate	Proc. 15th Eur. Microwave Conf., Paris 1985	541-546	1985
M. Soulard, M. Levent-Villegas, C. Tsironis, A. Blanchard* & G. Floury* (* TRT, Brive-la-Gaillarde)	L	Linear phase modulator for digital microwave links using dual gate FETs	Proc. 15th Eur. Microwave Conf., Paris 1985	955-960	1985

M. Rocchi	L	N-Off GaAs digital MESFET IC's	Proc. GaAs I.C. Seminar, London 1985	7 pp.	1985
N. M. Marinovic & G. Eichmann (City Univ. New York)	N	An expansion of Wigner distribution and its applications	Proc. ICASSP 85, Tampa, FL, 1985	1021-1024	1985
G.-M. Martin, M. Duseaux & J. Maluenda	L	The preparation of active layers for GaAs ICs: is there any problem left?	Proc. Int. Symp. GaAs and related compounds, Biarritz 1984	13-21	1985
S. Martin, M. Duseaux & M. Erman	L	Distribution of EL2 concentration in dislocated and dislocation-free GaAs substrates before and after annealing	Proc. Int. Symp. GaAs and related compounds, Biarritz 1984	53-58	1985
J.-P. Cornier, M. Duseaux & J.-P. Chevalier (C.E.C.M.-C.N.R.S., Vitry)	L	Evidence for polycrystalline insulators in dislocated undoped GaAs single crystals; comparison with near dislocation free crystals	Proc. Int. Symp. GaAs and related compounds, Biarritz 1984	95-100	1985
N. Vojdani, M. Erman, J. B. Theeten & M. Ketata	L	Growth and optical assessment of low loss GaAs waveguides fabricated by localized vapor phase epitaxy	Proc. Int. Symp. GaAs and related compounds, Biarritz 1984	151-156	1985
P. Langlade & S. Makram-Ebeid	L	Defect clustering phenomena and related hopping type conduction in GaAs and near its surface	Proc. Int. Symp. GaAs and related compounds, Biarritz 1984	281-286	1985
M. Erman, P. Frijlink, J. B. Theeten, C. Alibert* & S. Gaillard* (* USTL, Montpellier)	L	Electronic properties of MOVPE grown GaAs/GaAlAs heterostructures and quantum wells using electro-reflectance and spectroscopic ellipsometry	Proc. Int. Symp. GaAs and related compounds, Biarritz 1984	327-332	1985
J. N. Patillon, S. Makram-Ebeid, J. P. Chane, B. G. Martin & G. M. Martin	L	Analysis of electrical performance of GaInAs PIN photodiodes for telecommunication applications	Proc. Int. Symp. GaAs and related compounds, Biarritz 1984	475-478	1985
C. Tsironis, J. Graffeuil*, F. Henze (Univ. Branschweig) & Z. Hadjoub* (* Univ. Paul Sabatier, Toulouse)	L	Low frequency noise in GaAs MESFETs	Proc. Int. Symp. GaAs and related compounds, Biarritz 1984	611-616	1985
T. Ducourant, D. Meignant & M. Binet	L	N-on versus N-off GaAs MESFETs for an ultra high speed comparator	Proc. Int. Symp. GaAs and related compounds, Biarritz 1984	659-664	1985
M. Rocchi, B. Chantepie, B. Gabilard, G. Haldemann, J. P. Debost*, J. C. Andrieux* & F. Robert* (* TRT, Le Plessis-Robinson)	L	A 1.2GHz frequency synthesizer using a GaAs 20/21/22/23/24 modulus divider	Proc. ISSCC 85, New York 1985	3 pp.	1985
C. W. T. Bulle-Lieuwma, P. C. Zalm & M. P. A. Viegars	E	Characterization of MBE grown Si on (001) GaAs by transmission electron microscopy	Proc. Microscopy of Semiconductor Materials Conf., Oxford 1985	123-128	1985
M. J. Powell & J. W. Orton	R	Bulk and interface densities of states from measurements on amorphous silicon thin film transistors	Proc. MRS Conf., Strasbourg 1984	539-543	1984
A. Girard, C. Loty, J. P. Roux, J. Noel*, J. C. Rebuffie* & J. L. Allamargot* (* Hyperelec, Brive)	L	P 700: a new high speed streak tube with lamellar electron optics	Proc. SPIE 491	58-62	1985
M. Lemonier, J. C. Richard, C. Cavailler*, A. Mens* & G. Raze* (* Centre d'Etudes de Limeil-Valenton, Villeneuve-Saint-Georges)	L	Lecture d'images de caméras à balayage de fente picosecondes par D.T.C.	Proc. SPIE 491	706-712	1985
J. L. Bernatets & J. Pergrale	L	New capabilities of ultrasonic imaging for tissue characterization and medical diagnosis	Proc. SPIE 535	230-239	1985
W. A. Smith, A. A. Shaulov & B. M. Singer	N	Properties of composite piezoelectric materials for ultrasonic transducers	Proc. Ultrasonics Symp., Dallas 1984	539-544	1984
A. A. Shaulov, W. A. Smith & B. M. Singer	N	Performance of ultrasonic transducers made from composite piezoelectric materials	Proc. Ultrasonics Symp., Dallas 1984	545-548	1984
N. M. Marinovic & W. A. Smith	N	Use of the Wigner distribution to analyze the time-frequency response of ultrasonic transducers	Proc. Ultrasonics Symp., Dallas 1984	1023-1028	1984
M. Duseaux & S. Martin	L	Growth and characterization of large dislocation-free GaAs crystals for integrated circuits applications	Semi-insulating III-V materials (Kah-nee-ta, OR, 1984), D. C. Look & J. S. Blakemore (eds), Shiva, Nantwich	118-125	1984

- S. Makram-Ebeid, P. Langlade & G. M. Martin *L* Nature of EL2: the main native midgap electron trap in VPE and bulk GaAs Semi-insulating III-V materials (Kah-nee-ta, OR, 1984), D. C. Look & J. S. Blakemore (eds), Shiva, Nantwich 184-203 1984
- D. Washington, J. R. Mansell, D. L. Lamport, A. G. Knapp & A. W. Woodhead *R* Progress of the flat channel multiplier CRT SID 85 Digest, Orlando, FL, 1985 166-169 1985
- G. Duggan, H. I. Ralph & R. J. Elliot (*Dept Theor. Phys., Oxford*) *R* Interface recombination in p-type GaAs-(AlGa)As quantum well heterostructures Solid State Commun. **56** 17-20 1985
- F. J. C. M. Toolenaar *E* Effects of presintering on densification phenomena of ferrites Solid State Ionics **16** 267-274 1985
- P. W. J. M. Boumans & J. J. A. M. Vrakking *E* Spectral interferences in inductively coupled plasma atomic emission spectrometry — I. A theoretical and experimental study of the effect of spectral bandwidth on selectivity, limits of determination, limits of detection and detection power Spectrochim. Acta **40B** 1085-1105 1985
- P. W. J. M. Boumans & J. J. A. M. Vrakking *E* Spectral interferences in inductively coupled plasma atomic emission spectrometry — II. An experimental study of the effect of spectral bandwidth on the inaccuracy in net signals originating from wavelength positioning errors in a slew-scan spectrometer Spectrochim. Acta **40B** 1107-1125 1985
- P. K. Larsen, B. A. Joyce & P. J. Dobson *E, R* RHEED and photoemission studies of semiconductors grown in-situ by MBE Springer Ser. Surf. Sci., Vol. 3, F. Nizzoli *et al.* (eds), Springer, Berlin 196-219 1984
- P. N. T. van Velzen & M. C. Raas *E* An IETS study of the silylation of plasma aluminium oxide with four trimethylsilylamines and hexamethyldisiloxane Surf. Sci. **161** L605-L613 1985
- J. J. Harris *R* III-V microwave devices The technology and physics of molecular beam epitaxy, E. H. C. Parker (ed.), Plenum, New York 425-465 1985
- J. W. Smits & F. J. A. den Broeder *E* Magnetic and structural properties of ion-beam-sputtered thin films of $(\text{Co}_{90}\text{Cr}_{10})_{100-x}\text{TM}_x$ where TM denotes vanadium, niobium, molybdenum or tantalum Thin Solid Films **127** 1-8 1985

Contents of Philips Telecommunication Review 43, No. 4, 1985

- J. van Gelder & R. J. Mulder: Private networking with SOPHO-TBX and SOPHO S systems (pp. 237-252)
- A. A. J. M. van Heck: Economising a private voice/data network (pp. 253-261)
- G. Toes: A new public message switching system for the Dutch PTT (pp. 262-274)
- J. M. Preston: New Media Systems and the computer (pp. 275-282)

Contents of Valvo Berichte, October 1985

- K. Ruschmeyer: Permanentmagnete und ihre Weiterentwicklung (pp. 1-12)
- H. J. H. van Heffen: Keramische Permanentmagnete für Gleichstrommotoren (pp. 13-28)
- J. Koch: Dimensionierung permanentmagnetisch erregter Gleichstrommotoren unter Berücksichtigung der Ankerrückwirkung (pp. 29-36)
- G. Kramp & H. J. Plaumann: Einfache, überschlägige Dimensionierung von Gleichstrom-Kollektormotoren mit permanentmagnetischer Erregung durch Ferroxdure-Magnetsegmente (pp. 37-48)

J. R. Brandsma: PHILAN, een glasvezelnetwerk voor bedrijfscommunicatie,

Philips Techn. T. 42, nr. 11/12, 329-340, mrt. 1986.

PHILAN (Philips Integrated Local-Area Network) is een systeem voor bedrijfscommunicatie, waarin digitale informatie met een bitsnelheid van ongeveer 20 Mbit/s wordt overgedragen op basis van tijdmultiplex. Dit systeem heeft een ringvormige netwerkstructuur, waarvan delen — meanders genaamd — kunnen worden afgesneden bij het optreden van plaatselijke storingen. In de meanders wordt gebruik gemaakt van glasvezelkabel als transmissiemedium. In PHILAN kan gelijktijdig circuitgeschakeld verkeer en pakketgeschakeld verkeer plaatsvinden. Voor het pakketverkeer is dank zij het gebruik van bepaalde protocollen praktisch 100% betrouwbaarheid ('safe-message service') verkregen. Voor het maken van aansluitingen op de meanders worden aansluitdozen gebruikt, waarin een dubbele optische stekerverbinding tot stand wordt gebracht. In elke aansluitdoos bevindt zich ook een speciaal ontwikkeld relais, waarmee langs elektromechanische weg twee glasvezelkabels kunnen worden omgeschakeld. Naast een tamelijk eenvoudige basisconfiguratie kent het PHILAN-systeem ook uitgebreidere versies met geavanceerde voorzieningen voor foutendiagnose en beheer. In het Projectencentrum van het Philips Natuurkundig Laboratorium is een PHILAN-proefopstelling voor demonstratiedoeleinden gerealiseerd.

A. J. P. Theuwissen en C. H. L. Weijtens: De 'harmonika'-sensor, een nieuwe vaste-stofbeeldopnemer,

Philips Techn. T. 42, nr. 11/12, 341-348, mrt. 1986.

De toepassing van vaste-stofbeeldsensoren — plaatjes silicium waarin onder invloed van opvallend licht een ladingsverdeling ontstaat — in videocamera's voor gebruik door consumenten zal in sterke mate bepaald worden door de prijs van de sensor. Zoals met alle chips het geval is, hangt de prijs nauw samen met de grootte van het oppervlak. Met een nieuw uitleesmechanisme, het als een harmonika uitrekken van de ladingsverdeling, is het mogelijk een beeldsensor met twee in plaats van de gebruikelijke vier elektroden per beeldlijn te vervaardigen. De productiewijze voor een vierfasige sensor kan gehandhaafd blijven. De elektronica die voor de besturing noodzakelijk is, kan samen met de sensor in één proces op de chip aangebracht worden.

J. J. G. Willems: Onderzoek naar een nieuw type herlaadbare batterij, de nikkel-hydridecel,

Philips Techn. T. 42, nr. 11/12, 350-363, mrt. 1986.

LaNi_5 en verwante verbindingen zijn onderzocht op hun bruikbaarheid als elektrodemateriaal voor op waterstof gebaseerde herlaadbare batterijen. Hoewel LaNi_5 en LaNi_4Cu de verlangde grote hoeveelheden waterstof snel absorberen en weer desorberen zijn zij ongeschikt, omdat hun opslagcapaciteit bij herhaalbaar laden en ontladen drastisch afneemt. Gebleken is dat dit capaciteitsverlies samenhangt met de omzetting van het actieve materiaal in $\text{La}(\text{OH})_3$, die in sterkere mate plaatsvindt naarmate het laden en ontladen met grotere volumeveranderingen van het actieve materiaal gepaard gaat. Gedeeltelijk vervangen van Ni door Co leidt tot kleinere volumeveranderingen en daardoor ook tot stabielere elektrodemateriaal. Een additionele stabiliteitsverbetering wordt nog verkregen door het toevoegen van kleine hoeveelheden aluminium of silicium. De capaciteit van elektroden gemaakt van het nieuw ontwikkelde $\text{La}_{0,8}\text{Nd}_{0,2}\text{Ni}_{2,5}\text{Co}_{2,4}\text{Si}_{0,1}$ bleek na 1000 laad- en ontladcyclussen slechts met 30% af te nemen. De met dit materiaal vervaardigde experimentele — hermetisch afgesloten — nikkel-hydridecel combineert een lange levensduur met een grote energiedichtheid, een grote vermogensdichtheid en een goede beveiliging tegen overladen en overontladen, en bevat bovendien geen (giftig) cadmium.

G. Lütteke en D. Hennings: Dielektrische resonatoren voor geïntegreerde microgolfoscillatoren,

Philips Techn. T. 42, nr. 11/12, 364-376, mrt. 1986.

Dielektrische resonatoren maken het mogelijk de frequentie van het uitgangssignaal van geïntegreerde microgolfoscillatoren te stabiliseren. Dit soort oscillatoren zal in de nabije toekomst veel worden toegepast in microgolfontvangers voor televisieomroep via satellieten. De gewenste hoge kwaliteitsfactor, geringe temperatuurafhankelijkheid en kleine afmetingen van dielektrische resonatoren konden pas worden bereikt toen mengkeramieken van $\text{Ba}_2\text{Ti}_9\text{O}_{20}$ en BaTi_4O_9 of TiO_2 ter beschikking kwamen. Deze materialen kunnen worden beoordeeld door de frequentiespectra van microgolfresonanties in cilindervormige materiaalmonsters te meten. In de praktijk zijn dielektrische resonatoren schijfvormig en gemonteerd in een metalen behuizing. De resonatoren hebben een (geringe) positieve temperatuurcoëfficiënt ten einde negatieve temperatuurcoëfficiënten van andere elementen in de oscillatorschakeling te compenseren. In het Smith-diagram kan de ligging van het werkpunt, dat is het snijpunt van de belastinglijn met de lijn voor de ingangsimpedantie van het actieve element, al dan niet stabiel zijn. De oscillatorschakelingen kunnen met een reactie-, transmissie-, reflectie- of terugkoppelresonator zijn uitgevoerd. Er zijn stabiele oscillatorschakelingen voor transponders voor weerballons ontworpen. Ook is de toepassing van dielektrische resonatoren in oscillatoren voor directe frequentiesynthese onderzocht.

Hiermede geef ik mij op als abonnee van

PHILIPS TECHNISCH TIJDSCHRIFT

Bestelkaart

Geldig tot 1 juni 1986

PHILIPS TECHNISCH TIJDSCHRIFT

Hiermee bestel ik band(en) à f 10,— voor jaargang 42 (1984/86).

datum

handtekening

Abonnementsprijs f 80,— per jaargang

☐ *)

Prijs incl. verzendkosten
Levering vanaf jaargang 43, nr. 1
Betaling na ontvangst van factuur

Prijs studentenabonnement f 32,— per jaargang

☐ *)

Kopie van collegekaart of van vergelijkbaar document meesturen;
geldig voor twee jaarabonnementen

*) aankruisen wat van toepassing is

Naam:

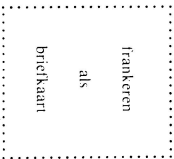
Adres:

Postcode en woonplaats:

Het verschuldigde bedrag is hierbij ingesloten
(girobetaalkaart, bankcheque, contant)

(handtekening)

BESTELKAART
(in envelop, samen met het
verschuldigde bedrag opsturen)



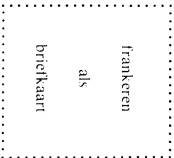
Naam

Voorletters

Titel

Adres

Administratie
Philips Technisch Tijdschrift
Nederlandse Philips Bedrijven B.V.
Natuurkundig Laboratorium
Gebouw WBp, kamer 42
Postbus 80 000
5600 JA Eindhoven
(Nederland)



Administratie
Philips Technisch Tijdschrift
Nederlandse Philips Bedrijven B.V.
Natuurkundig Laboratorium
Gebouw WBp, kamer 42
Postbus 80 000
5600 JA Eindhoven
(Nederland)

ANDERE PHILIPS - TIJDSCHRIFTEN

Philips Journal of Research

Een uitgave in het Engels, die artikelen bevat over onderzoeken in de Philips-laboratoria. Zes nummers per jaargang, ongeveer 100 bladzijden per nummer, formaat $15\frac{1}{2} \times 23\frac{1}{2}$ cm.

Philips Telecommunication Review

Een uitgave in het Engels, die vraagstukken behandelt uit de techniek van radio, televisie, radar, telefoon- en telegraaftransmissie en automatische centrales. Vier nummers per jaargang, ongeveer 40 bladzijden per nummer, formaat $20\frac{1}{2} \times 28\frac{1}{2}$ cm.

Electronic Components and Applications

Een uitgave in het Engels, die artikelen bevat op het gebied van elektronische onderdelen en materialen en hun toepassingen. Vier nummers per jaargang, ongeveer 60 bladzijden per nummer, formaat $21 \times 29\frac{1}{2}$ cm.

Medicamundi

Een uitgave in het Engels op het gebied van radiologie, isotopendiagnostiek en medische elektronica. Drie nummers per jaargang, ongeveer 60 bladzijden per nummer, formaat $21 \times 29\frac{1}{2}$ cm.

In de volgende nummers van Philips Technisch Tijdschrift artikelen over:

Een keramische verschildrukopnemer

Interactieve synthese van MR-beelden

De Schlierenmethode

De toekomst van de industriële ontwikkeling van Europa

Ontwikkelingen van de laatste 50 jaar (jubileumnummer)

Inhoud

blz.

PHILAN, een glasvezelnetwerk voor bedrijfscommunicatie	J. Brandsma	329
De 'harmonika'-sensor, een nieuwe vaste-stofbeeldopnemer	A. J. P. Theuwissen en C. H. L. Weijtens	341
Vijftig jaar geleden		349
Onderzoek naar een nieuw type herlaadbare batterij, de nikkel-hydridecel	J. J. G. Willems	350
Diëlektrische resonatoren voor geïntegreerde microgolfoscillatoren	G. Lütteke en D. Hennings	364
Wetenschappelijke publikaties		377

PHILIPS TECHNISCH TIJDSCHRIFT
Redactie en administratie
Philips Natuurkundig Laboratorium
Postbus 80 000
5600 JA Eindhoven

Abonnementsprijs per jaargang	f 80,—
Studentenabonnement	f 32,—
Band	f 10,—

Betaling na ontvangst van een rekening of
accept-girokaart.



PHILIPS

PHILIPS TECHNISCH TIJDSCHRIFT

1. *Banden* voor jaargang **42** (1984/86) kunnen tot 1 juni 1986 aangevraagd worden door middel van de bestelkaart in nummer 11/12.

2. De abonnementsprijzen voor jaargang **43** bedragen:

Gewoon abonnement	per jaargang f 80,—	(exclusief band)
Studentenabonnement	per jaargang f 32,—	(exclusief band)
Band	f 10,—	

Betaling van abonnementsgelden na ontvangst van een factuur.

Correspondentie over *abonnementsgelden* gelieve men te richten aan:

Administratie Research
Nederlandse Philips Bedrijven B.V.
Natuurkundig Laboratorium, WL 122
Postbus 80 000
5600 JA EINDHOVEN

3. Alle correspondentie over *abonnementen*, met uitzondering van financiële zaken, gelieve men te richten aan:

Administratie Philips Technisch Tijdschrift
Nederlandse Philips Bedrijven B.V.
Natuurkundig Laboratorium, WBp 42
Postbus 80 000
5600 JA EINDHOVEN

PHILIPS TECHNISCH TIJDSCHRIFT

JAARGANG 42
1984/86



PHILIPS

Philips Technisch Tijdschrift (ISSN 0165-5965) wordt uitgegeven door het Philips Natuurkundig Laboratorium, Eindhoven, en is gewijd aan de onderzoeken, werkwijzen en produkten van laboratoria en fabrieken, behorende tot of samenwerkende met ondernemingen van het Philips-concern. In de artikelen worden hiermee samenhangende technische problemen met hun fysische of chemische achtergrond behandeld. Het tijdschrift richt zich bij de behandeling van de zeer uiteenlopende onderwerpen zowel tot de specialist alsook tot de algemeen technisch of fysisch geschoolde maar niet in het onderwerp gespecialiseerde lezer.

Philips Technisch Tijdschrift wordt uitgegeven in een Nederlandse en een Engelse editie. Beide edities hebben dezelfde inhoud. Twaalf nummers van ongeveer 32 bladzijden vormen een jaargang, die wordt afgesloten met een register. Bovendien verschijnen er verzamelregisters over perioden van 10 jaargangen (het laatste is opgenomen in jaargang 40, 1981/82).

Redactie	Dr. J. W. Broer
	Dipl.-Phys. R. Dockhorn, hoofdredacteur
	Dr. E. Fischmann
	Ir. J. A. Klaassen
	Dr. J. L. Sommerdijk
	Ir. N. A. M. Verhoeckx
	Dr. M. H. Vincken
Redactie-assistenten	Ir. F. Zuurveen
	Ing. P. Post
	T. M. B. Schoenmakers
Engelse editie	D. A. E. Roberts, B.Sc., M.Inst.P., A.I.L.

© N.V. Philips' Gloeilampenfabrieken, Eindhoven, 1986.

Overnemen van artikelen of gedeelten daarvan is toegestaan, mits de bron voluit wordt vermeld. De redactie zal het op prijs stellen een bewijs-exemplaar te ontvangen. Voor het overnemen kunnen foto's en tekeningen beschikbaar worden gesteld.

Onderwerpenregister, jaargang 42, 1984/86

	Blz.		Blz.
A/D-omzetting, digitaal 'decimerend' filter voor —	240	Kleurenmultiplex, optisch communicatiesysteem met —	253
Aantasting van glas door water	63	Koude kathodes op basis van silicium	301
Amorfe legeringen, onderzoek aan —	52	Koudgaskoelmachines, Stirling—	1
ASP, audiosignaalprocessor	210	Kroesloos bereiden van glas	98
Batterij, onderzoek aan herlaadbare —	350	Laserdiagnostiek aan lagedruk-kwikontladingen	312
Bedrijfscommunicatie, glasvezelnetwerk voor —	329	Laserlassen, bundelmanipulatie met glasvezels bij —	271
CAD in licht- en elektronenoptica	73	Legeringen, onderzoek aan amorfe —	52
CAROT, digitale omcodering van analoge TV-signalen	227	Lichtgeleiders in procesbesturing	323
Communicatiesysteem, optisch — met kleurenmultiplex	253	Lineaire aandrijving, Stirling-koudgaskoelmachines met —	1
'Decimerend' filter voor A/D-omzetting van 'hifi'-audio	240	Magneto-optische registratie, wisbare	41
Diagnostiek, laser— aan lagedruk-kwikontladingen	312	Micro-bewerken, elektrochemisch	22
Diagnostiek met röntgenopnamen bij twee energieniveaus	282	Microgolfoscillatoren, diëlektrische resonatoren voor —	364
Diëlektrische resonatoren voor geïntegreerde microgolfoscillatoren	364	Nikkel-hydridecel, onderzoek aan —	350
Digitale audio	{ 210 240	Ontspiegelen van televisiebuizen	62
Digitale signaalbewerking I (themanummer):		Optica, CAD in licht- en elektronen—	73
woord vooraf	109	Optisch communicatiesysteem met kleurenmultiplex	253
inleidend artikel	111	Optische transmissie via het 1,55µm-venster	294
theoretische achtergronden	120	PHILAN, glasvezelnetwerk voor bedrijfscommunicatie	329
Digitale signaalbewerking II (themanummer):		Polymeerchemie	157
woord vooraf	189	Procesbesturing, lichtgeleiders in —	323
toepassing in TV-ontvangers	191	Registratie, wisbare magneto-optische	41
geïntegreerde audiosignaalprocessor ASP	210	Resonatoren, diëlektrische — voor geïntegreerde microgolfoscillatoren	364
CAROT, digitale omcodering van analoge TV-signalen	227	Röntgenopnamen, diagnostiek met — bij twee energieniveaus	282
'decimerend' filter voor A/D-omzetting	240	Sferische aberratie, vertekening door —	20
Dunne lagen, analyse van — met elektronenmicrosonde	173	Silicium, koude kathodes op basis van —	301
Dunne lagen, indrukkingsmetingen aan —	90	Stirling-koudgaskoelmachines met lineaire aandrijving	1
Elektrochemisch micro-bewerken	22	Submicron-IC-technologie, nieuw centrum voor —	274
Elektronen-microsonde, analyse met —	173	Transmissie, optische — via het 1,55µm-venster	294
Glas, aantasting van — door water	63	Trekproef, bepalen van Von Mises-spanning uit de insnoering bij de —	11
Glas, continu en kroesloos bereiden van —	98	TV-buizen, ontspiegelen van —	62
Glasvezels		TV-ontvangers, digitale signaalbewerking in —	191
bundelmanipulatie met — bij laserlassen	271	TV-signaal, robuust — via CAROT	227
optisch communicatiesysteem met — via kleurenmultiplex	253	Uitloggen van glas	63
netwerk met — voor bedrijfscommunicatie	329	Vaste-stofbeeldopnemer	341
'Harmonika'-sensor	341	Vertekening door sferische aberratie	20
Herlaadbare batterij, onderzoek aan —	350	Vijftig jaar geleden	
IC-activiteiten, uitbreiding van —	{ 89 168	ter introductie	310
IC-technologie, nieuw centrum voor submicron—	274	fragmenten uit jg. 1, nr. 1, 1936	311
Indrukkingsmetingen aan dunne lagen	90	fragmenten uit jg. 1, nr. 2, 1936	349
Kathodes, koude — op basis van silicium	301	Von Mises-spanning, bepalen van —	11
		Weeg- en sorteerapparaat	169
		Wisbare magneto-optische registratie	41

Auteursregister, jaargang 42, 1984/86

	Blz.		Blz.
Annegarn, M. J. J. C. , A. H. H. J. Nillesen en J. G. Raven		Nonhof, C. J. en G. J. A. M. Notenboom	
Digitale signaalbewerking in TV-ontvangers	191	Bundelmanipulatie met glasvezels bij laserlassen	271
Beek, L. K. H. van		Notenboom, G. J. A. M. , zie Nonhof, C. J.	
Polymeerchemie in de elektrotechnische industrie	157	Obertop, D. , zie Willich, P.	
Beirens, L. C. M. en A. A. van Gorkum		Oostrum, K. J. van	
Vertekening door sferische aberratie	20	CAD in licht- en elektronenoptica	73
Braat, J. J. M. , zie Hartmann, M.		Osenbruggen, C. van en C. de Regt	
Brandsma, J. R.		Elektrochemisch micro-bewerken	22
PHILAN, een glasvezelnetwerk voor bedrijfscommunicatie	329	Peek, J. B. H.	
Buschow, K. H. J.		Digitale signaalbewerking, een vakgebied van groeiende betekenis	111
Onderzoek aan amorfe legeringen	52	Persoon, E. H. J. en C. J. B. Vandenbulcke	
Coumans, J. J. H.		Digitale audio: voorbeelden van toepassing van de geïntegreerde signaalprocessor ASP	210
Diagnostiek met röntgenopnamen bij twee energieniveaus	282	Peters, J. H. en J. T. Kanters	
Cremers, R. M. M. , zie Weijer, P. van de		CAROT: een digitale methode om een robuust analoog kleurentelevisiesignaal te verkrijgen	227
Enden, A. W. M. van den en N. A. M. Verhoeckx		Raven, J. G. , zie Annegarn, M. J. J. C.	
Digitale signaalbewerking: theoretische achtergronden	120	Regt, C. de , zie Osenbruggen, C. van	
Franken, A. J. J. , zie Wierenga, P. E.		Rooy, T. L. van , zie Meerman, W. C. P. M.	
Galenkamp, H. en H. van Wijngaarden		Sanders, A. H. T. , zie Huizing, A.	
Bepaling van de Von Mises-spanning uit de insnoering bij de trekproef	11	Severijns, A. P. , zie Severin, P. J. W.	
Gelling, W. G. en F. Valster		Severin, P. J. W. en A. P. Severijns	
Het nieuwe centrum voor submicron-IC-technologie	274	Toepassingen van lichtgeleiders in procesbesturing	323
Gorkom, G. G. P. van en A. M. E. Hoeberechts		Smets, B. M. J.	
Koude kathodes op basis van silicium	301	Over het mechanisme van de aantasting van glas door water	63
Gorkum, A. A. van , zie Beirens, L. C. M.		Stolfi, F. en A. K. de Jonge	
Hartmann, M. , B. A. J. Jacobs en J. J. M. Braat		Stirling-koudgaskoelmachines met lineaire aandrijving	1
Wisbare magneto-optische registratie	41	Theuwissen, A. J. P. en C. H. L. Weijtens	
Hennings, D. , zie Lütteke, G.		De 'harmonika'-sensor, een nieuwe vaste-stofbeeldopnemer	341
Hoeberechts, A. M. E. , zie Gorkom, G. G. P. van		Thijssen, J. F. K. , zie Huizing, A.	
Huizing, A. , A. H. T. Sanders en J. F. K. Thijssen		Valster, F. , zie Gelling, W. G.	
Weeg- en sorteerrapparaat	169	Vandenbulcke, C. J. B. , zie Persoon, E. H. J.	
Jacobs, B. A. J. , zie Hartmann, M.		Verhoeckx, N. A. M. , zie Enden, A. W. M. van den	
Jonge, A. K. de , zie Stolfi, F.		Voss, M. C. M. , zie Meerman, W. C. P. M.	
Kam, J. J. van der		Weijer, P. van de en R. M. M. Cremers	
Een digitaal 'decimerend' filter voor analoog/digitaal-omzetting van 'hifi'-audio	240	Laserdiagnostiek aan lagedruk-kwikontladingen	312
Kanters, J. T. , zie Peters, J. H.		Weijtens, C. H. L. , zie Theuwissen, A. J. P.	
Lütteke, G. en D. Hennings		Wierenga, P. E. en A. J. J. Franken	
Diëlektrische resonatoren voor geïntegreerde microgolf-oscillatoren	364	Indrukkingsmetingen aan dunne lagen	90
Meerman, W. C. P. M. , T. L. van Rooy en M. C. M. Voss		Wijngaarden, H. van , zie Galenkamp, H.	
Het continu en kroesloos bereiden van glas	98	Willems, J. J. G.	
Nicia, A. J. A.		Onderzoek naar een nieuw type herlaadbare batterij, de nikkel-hydridecel	350
Een optisch communicatiesysteem met kleurenmultiplex en minimaal stralingsverlies, I. Systeem en stralingsrendement	253	Willich, P. en D. Obertop	
Nillesen, A. H. H. J. , zie Annegarn, M. J. J. C.		Analyse van dunne lagen met een elektronen-microsonde	173