

"Compact Disc Digital Audio"

*M.G. Carasso, J.B.H. Peek en J.P. Sinjou**

Inleiding

Gedurende de vele jaren van zijn ontwikkeling heeft de grammofoon een bepaalde wasdom bereikt. Onder andere door de beschikbaarheid van langspeelplaten van goede kwaliteit is het mogelijk in onze huiskamers een geluidswaergave te bereiken die heel wat beter is dan die van het apparaat waarmee in 1877 voor het eerst de menselijke stem werd gereproduceerd. Een groot bezwaar is dat deze platen, wil men hun kwaliteit handhaven, met zeer veel zorg moeten worden behandeld. Door de mechanische aftasting bij het afspelen treedt slijtage op, en beschadigingen door bedieningsfouten zijn niet altijd te vermijden. Door de analoge opname en waergave van het geluidssignaal is de signaal/ruisverhouding soms matig (< 60 dB) en laat de scheiding van de stereokanalen (< 30 dB) te wensen over.

Het 'Compact Disc'-systeem biedt voor deze — en andere — problemen een oplossing. Door de digitale behandeling van het signaal zijn een signaal/ruisverhouding en een kanaalscheiding mogelijk gebleken die beide beter zijn dan 90 dB. Doordat de digitale informatie op de plaat is afgeschermd door een 1,2 mm dikke, transparante laag, liggen beschadigingen en stof niet in het focusvlak van de laserbundel die de plaat aftast, en hebben zij naar verhouding weinig invloed. Deze optische aftasting brengt, in tegenstelling tot mechanische aftasting, met zich mee dat de plaat niet aan beschadiging en slijtage onderhevig is. De digitale signaalverwerking maakt het mogelijk het grootste deel van de fouten die desondanks nog optreden, te corrigeren. Dit kan omdat de op de plaat aanwezige informatie ook foutencorrectiebits bevat. Als correctie niet meer mogelijk blijkt doordat er teveel fouten zijn, kunnen deze nog wel worden gedetecteerd en volgens een bepaalde procedure 'gemaskeerd'. De kans dat men bij het afspelen

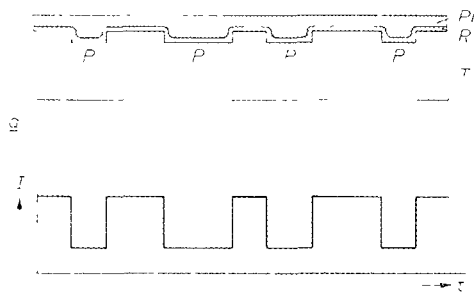
van een 'Compact Disc' de van conventionele platen zo bekende 'tik' hoort, is dus vrijwel tot nul gereduceerd.

Vanwege de grote informatiedichtheid kan, bij een speelduur van ruim een uur, de uitwendige diameter van de plaat beperkt blijven tot 120 mm. Doordat de plaat compact is, kan ook de afspelapparatuur klein van afmetingen zijn. De wijze waarop de digitale informatie uit het analoge muzieksignaal wordt afgeleid, levert een frequentie karakteristiek die van 20 tot 20 000 Hz vlak is. De van conventionele platenspelers bekende effecten als 'wow' en 'flutter' behorende bij dit systeem tot het verleden. Een bijzonderheid is nog dat op de plaat 'control and display'-informatie is opgenomen in de vorm van zg. C&D-bits. Allereerst is hierin 'informatie voor de luisteraar' opgenomen als speelduur, componist en titel van het muziekstuk. Ook het volgordenummer van een muziekgedeelte op de plaat behoort ertoe. Voorts bevatten de C&D-bits het gegeven of het audiosignaal al dan niet met 'pre-emphasis' is opgenomen en met 'de-emphasis' moet worden weergegeven¹⁾. In het 'Compact Disc'-systeem is een 'pre-emphasis'-karakteristiek gestandaardiseerd met tijdconstanten van 15 en 50 μ s. Bij bepaalde uitvoeringen van het afspelapparaat kan de 'informatie voor de luisteraar' op een 'display' worden weergegeven en kunnen de verschillende muziekgedeelten op de plaat in een door de luisteraar op te geven volgorde worden afgespeeld.

In dit eerste artikel zullen we het systeem als geheel behandelen, zonder op details in te gaan. Achtereenvolgens zullen de plaat, de bewerkingen van het audiosignaal, het lezen van de plaat en de reconstructie van het audiosignaal aan de orde komen. In het artikel erna zal nader worden ingegaan op de systeemaspecten en de modulatie, de foutencorrectie en de digitaal-analoog-

De plaat

Bij het LaserVision systeem²⁾, zoals bekend bedoeld om video-informatie vast te leggen, is het signaal op de plaat opgenomen in de vorm van een spiraalvormig spoor, dat bestaat uit een opeenvolging van putten. De delen van het oppervlak tussen de putten worden 'dammen' genoemd. De informatie is in het spoor in analoge vorm aanwezig. Iedere overgang van dam naar put en omgekeerd markeert een nuldoorgang van het gemoduleerde videosignaal. Op de 'Compact Disc' is het signaal op een gelijksoortige manier aangebracht, maar de informatie is in het spoor in digitale vorm aanwezig. Iedere dam en iedere put vertegenwoordigt een reeks bits, kanaalbits genoemd. Na iedere overgang dam/put of put/dam is er een '1', alle tussengelegen kanaalbits zijn '0', zie fig. 1.



Ch... ..

b)

Fig. 1.

a) Doorsnede door een 'Compact Disc', gemaakt in de lengterichting van het spiraalvormige spoor. *T* transparant dragermateriaal, *R* reflecterende laag, *Pr* beschermende laag. *P* langwerpige putten die samen het spoor vormen (zie ook de foto op pagina 265).

b) *I* de intensiteit van het door de optische pickup (zie fig. 2) uitgelezen signaal, uitgezet als functie van de tijd. Het blokvormige signaal is in werkelijkheid afgerond en heeft schuin verlopende flanken³⁾. Het digitale signaal dat uit het blokvormige verloop wordt afgeleid, is aangegeven als een reeks van kanaalbits *Ch*.

De dichtheid van de informatie op de 'Compact Disc' is zeer groot. De kleinste eenheid van audio-informatie (de 'audio-bit') beslaat op de plaat een oppervlakte van $1 \mu\text{m}^2$, terwijl de diameter van de afastende lichtvlek slechts $1 \mu\text{m}$ is. De spoed van het spoor is $1,6 \mu\text{m}$, de breedte $0,6 \mu\text{m}$ en de diepte $0,12 \mu\text{m}$. De minimale lengte van een put of dam is $0,9 \mu\text{m}$, de maximale lengte $3,3 \mu\text{m}$. De zijde van het transparante dragermateriaal *T* waarin de putten *P* zijn geperst — bij het afspelen met verticale draaiingsas de bovenzijde —, is bedekt met een reflecterende laag *R* en een beschermende laag *Pr*. Het spoor wordt vanaf de onderzijde van de plaat optisch afgetast met een constante snelheid van $1,25 \text{ m/s}$. Het toerental van de plaat varieert daardoor, en wel van ca. 8 s^{-1} tot ca. $3,5 \text{ s}^{-1}$.

De bewerkingen van het audiosignaal

Voor het omzetten van het analoge signaal van de microfoon in een digitaal signaal wordt gebruik gemaakt van de methode van pulscodemodulatie (PCM). Hierbij wordt het signaal periodiek bemonsterd en iedere bemonstering vertaald in een binair getal. Volgens het bemonsteringstheorema van Nyquist dient de frequentie van het bemonsteren ten minste twee keer zo groot te zijn als de hoogste frequentie die men van het analoge signaal in rekening wil brengen. Het aantal bits per bemonstering bepaalt de signaal/ruisverhouding bij de latere weergave.

In het 'Compact Disc'-systeem wordt het analoge signaal bemonsterd met een frequentie van $44,1 \text{ kHz}$, wat voldoende is voor de weergave van de maximale frequentie van $20\,000 \text{ Hz}$. Het signaal wordt gequantiseerd volgens de methode der uniforme quantisatie, de bemonsterde amplitude wordt hierbij in gelijke stukken verdeeld. Het aantal bits per bemonstering (deze bits worden audiobits genoemd) bedraagt 32, dat wil zeggen 16 voor het linker en 16 voor het rechter audiokanaal. Dit correspondeert met een signaal/ruisverhouding van meer dan 90 dB. De — netto — bitstroom is dus $44,1 \times 10^3 \times 32 = 1,41 \times 10^6$ audiobits/s. De audiobits worden gegroepeerd in zg. rasters, 'Engels.

frames), die ieder zes van de oorspronkelijke bemonsteringen bevatten.

Volgens een bepaald coderingssysteem, genaamd CIRC (cross-interleaved Reed-Solomon-code)⁴), worden telkens aan blokken van audiobits blokken van pariteitsbits toegevoegd, die dienen om bij de weergave correctie — of, bij een te groot aantal, detectie — van fouten mogelijk te maken. De verhouding van het aantal bits voor en na deze bewerking is 3:4. Aan ieder raster worden nog de — reeds genoemde — C&D-bits (control and display bits) toegevoegd. De bits worden hierna databits genoemd.

De bitstroom wordt vervolgens gemoduleerd, dat wil zeggen dat de databits worden vertaald in kanaalbits, die geschikt zijn voor opslag op de plaat, zie fig. 1b. Daarbij wordt gebruik gemaakt van de EFM-code (eight-to-fourteen modulation), waarbij blokken van acht bits worden vertaald in blokken van veertien bits⁵). De blokken van veertien bits worden verbonden door een drietal zogenaamde koppelbits. De verhouding van het aantal bits voor en na de modulatie is dus 8/17.

Ten behoeve van de synchronisatie van de bitstroom wordt aan ieder raster nog een uit 27 kanaalbits bestaand synchronisatiepatroon toegevoegd, dat voor ieder raster identiek is. De totale —bruto — bitsnelheid is na al deze bewerkingen $4,32 \times 10^6$ kanaalbits/s geworden. Tabel 1 geeft een overzicht van de opeenvolgende bewerkingen met de daarbij behorende bitsnelheden en benamingen. Uit de kanaalbitsnelheid en de aftastingsnelheid van 1,25 m/s volgt dat de lengte van een kanaalbit op de plaat ca. $0,3 \mu\text{m}$ is.

Met het aldus verkregen signaal wordt bij de platenfabrikant de laserbundel, waarmee de lichtgevoelige laag op een roterende glazen plaat wordt belicht, aan- en uitgeschakeld. Via een ontwikkelprocedé wordt op deze plaat een patroon van putjes verkregen. Nadat het oppervlak is voorzien van een dunne zilverlaag, wordt door middel van een galvanisch procedé een afdruk van nikkel vervaardigd, de vaderplaat. Van de vaderplaat worden op gelijksoortige wijze afdrucken gemaakt, de moederplaten. De afdrucken van de moederplaten,

de zonen, worden gebruikt als gereedschap, waarmee de putjes P in het thermoplastische, transparante dragermateriaal T van de plaat worden geperst, zie fig. 1a.

Tabel 1. De benamingen der opeenvolgende signalen, de bijbehorende bitstromsnelheden, en de bewerkingen die plaatsvinden

benaming	bitstromsnelheid in 10^6 bits/s	bewerkingen op de deze bitstroom
audio-signaal		PCM (44,1 kHz)
audiobitstroom	1,41	CIRC (+ pariteitsbits) toevoegen C&D-bits
databitstroom	1,94	EFM toevoegen koppelbits toevoegen synchronisatie patronen
kanaalbitstroom	4,32	

Het lezen van de plaat

Zoals gezegd, wordt de plaat in het afspelapparaat optisch afgetast. Hiervoor wordt gebruik gemaakt van de AlGaAs halfgeleider-laser⁶). In fig. 2 is het optische gedeelte van de 'pick-up' weergegeven. Het licht van de laser L_a (golflengte 800 nm) wordt via de lenzen L_2 en L_1 gefocusseerd op de reflecterende laag van de plaat. De diameter van de lichtvlek S is ongeveer $1 \mu\text{m}$. Als de lichtvlek op een dam valt, wordt het licht nagenoeg geheel gereflecteerd en bereikt het, via de half-doorlatende spiegel M , de vier fotodiodes D_1 t.e.m. D_4 . Als de lichtvlek over een put valt — de diepte van een put is ongeveer een kwart deel van de golflengte in het transparante dragermateriaal — wordt ten gevolge van interferentie minder licht gereflecteerd en bereikt een aanzienlijk kleinere hoeveelheid de fotodiodes. Als de uitgaande signalen van de vier fotodiodes worden gesommeerd, is het resultaat een — vrij ruwe³) — benadering van het biokvormige patroon dat in de vorm van putten en dammen in de plaat aanwezig is. De optische pick-up van fig. 2 is zeer klein (ca. 45 mm bij 12 mm) en is gemonteerd

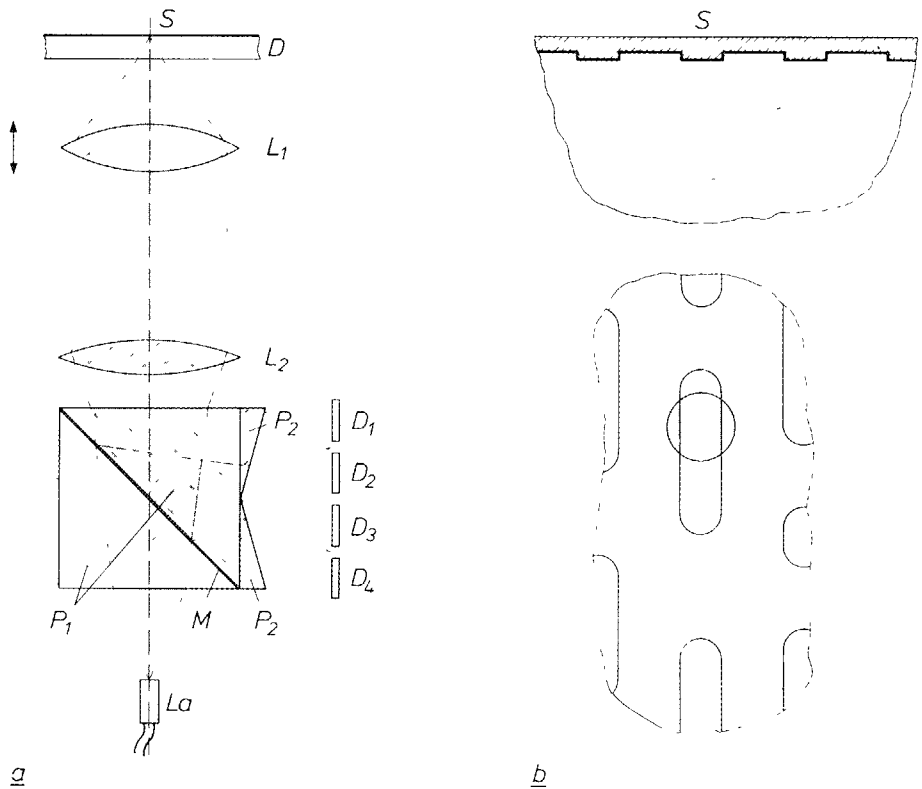


Fig. 2.

a) Schema van de 'optische pick-up' D radiale doorsnede van de plaat, S lichtvlek, de afbeelding op de plaat van het licht-emitterende deel van de halfgeleider-laser La . L_1 objectieflens, die in verband met de focusering instelbaar is L_2 lens voor het evenwijdig maken van de divergente laserbundel M halfdoorlatende spiegel die wordt gevormd door een laag die is aangebracht op het deelvlak van de prismacombinatie P_1 . P_2 prisma's die de bundel splitsen D_1 t.e.m. D_4 fotodiodes die — door de uitgangsströmen op verschillende manieren te combineren — zowel het uitgangssignaal van de pick-up als het spoorvolg-foutsignaal en het focus-foutsignaal leveren (In werkelijkheid zijn de prisma's P_2 en de fotodiodes D_1 t.e.m. D_4 90° gedraaid en vindt de reflectie op de spiegel M niet in een radiaal vlak maar in een tangentiaal vlak plaats)

b) Vergrote weergave van de omgeving van de lichtvlek S , met het bijbehorende aanzicht. Duidelijk is te zien dat de diameter van de lichtvlek (circa $1\mu\text{m}$) groter is dan de breedte van een put ($0,6\mu\text{m}$).

in een arm die kan scharnieren om een draaipunt. De pick-up kan zich daardoor in radiale richting over de plaat bewegen, zodat de pick-up het gehele spiraalvormige spoor kan aftasten. Rondom het draaipunt van de arm is een uit een combinatie van een spoel en een permanente magneet bestaande 'lineaire' motor gemonteerd. Door de spoel te bekrachtigen kan de pick-up naar iedere gewenste plaats van het

spoor worden gedirigeerd, waarbij de op de plaat per raster toegevoegde C&D-bits de plaatsinformatie verschaffen. De pick-up is daardoor in staat een door de luisteraar opgegeven muziekgedeelte zelfstandig op te zoeken. Daarna moet de pick-up het spoor nauwkeurig — binnen $\pm 0,1\mu\text{m}$ — volgen en niet beïnvloed worden door het volgende of voorgaande spoor. Omdat het spoor enigszins exentrisch op de plaat kan zijn

aangebracht en ook de lagering van de draaitafel niet volmaakt is, moet gerekend worden met een maximale slinging van het spoor van $300 \mu\text{m}$. Er moet dus een spoorvolgservosysteem zijn dat de afwijking van pick-up en spoor kleiner maakt dan de toegestane waarde van $\pm 0,1 \mu\text{m}$ en bovendien de gevolgen van kleine schokken van het afspelapparaat kan opvangen.

Het spoorvolg-foutsignaal wordt geleverd door de vier fotodiodes D_1 t.e.m. D_4 . Als de lichtvlek S zich, in radiale richting gezien, midden op het spoor bevindt, wordt een symmetrische lichtbundel gereflecteerd. Bevindt de lichtvlek zich echter enigszins naast het spoor, dan wordt de gereflecteerde lichtbundel ten gevolge van interferentie-verschijnselen asymmetrisch.

Deze asymmetrie wordt gedetecteerd door de gereflecteerde lichtbundel in tweeën te delen door middel van de prisma's P_2 . De ene lichtbundel heeft dan hierna een gemiddeld grotere intensiteit dan de andere. Het signaal dat verkregen wordt door de fotodiodes als $(D_1 + D_2) - (D_3 + D_4)$ te koppelen, kan dus gebruikt worden als spoorvolg-foutsignaal.

Door veroudering of vervuiling van de optiek kan de gereflecteerde bundel een zich langzaam vergrotende, min of meer constante, asymmetrie verkrijgen. De lichtvlek bevindt zich door een gelijkspanningscomponent in het spoorvolg-foutsignaal dan steeds iets naast het midden van het spoor. Om dit effect te compenseren wordt een tweede spoorvolg-foutsignaal opgewekt. Daartoe wordt de spoel die de arm van de pick-up stuurt, voorzien van een wisselspanning van 600 Hz, met een amplitude die overeenkomt met een radiale verplaatsing van de lichtvlek van $\pm 0,05 \mu\text{m}$. Het uitgaande somsignaal van de vier fotodiodes — dat maximaal is als de lichtvlek zich midden op het spoor bevindt — wordt daardoor gemoduleerd met een wisselspanning van 600 Hz. De amplitude van dit 600Hz-signaal neemt toe naarmate de lichtvlek zich verder van het hart van het spoor verrijdt. Bovendien verandert het 600Hz-foutsignaal van teken als de lichtvlek zich naar de andere zijde van het spoor verplaatst. Dit tweede spoorvolg-foutsignaal kan dus worden gebruikt om het eerder ge-

noemde foutsignaal met een gelijkspanning te corrigeren. Het uitgaande somsignaal van de fotodiodes, dat in het afspelapparaat verder wordt verwerkt tot het audiosignaal, wordt daardoor weer maximaal.

De scherptediepte van de optische pick-up ter plaatse van S (zie fig. 2) bedraagt ongeveer $4 \mu\text{m}$. De axiale slinging van de plaat kan echter ten gevolge van diverse mechanische invloeden maximaal 1 mm bedragen. Het is duidelijk dat er ook een servosysteem nodig is om de juiste focussering van de pick-up op de reflecterende laag te bewerkstelligen. Daartoe is het objectief L_1 verplaatsbaar in de richting van zijn optische as door middel van een combinatie van een spoel en een permanente magneet, op dezelfde manier als bij een luidspreker. Het focus-foutsignaal wordt eveneens geleverd door de rij fotodiodes D_1 t.e.m. D_4 . Als de lichtvlek scherp wordt gefocusseerd op de plaat, zijn op de rij fotodiodes twee scherpe afbeeldingen hiervan aanwezig, die zich juist tussen D_1 en D_2 en tussen D_3 en D_4 bevinden. Als de lichtvlek niet scherp op de plaat is gefocusseerd, zijn de beide afbeeldingen op de fotodiode eveneens onscherp, maar bovendien naar elkaar toe of van elkaar af bewegen. Het signaal dat verkregen wordt door de fotodiodes als $(D_1 + D_4) - (D_2 + D_3)$ te combineren, kan daarom worden gebruikt om het focus-servosysteem te sturen. De afwijking in de focussering blijft daardoor beperkt tot $\pm 1 \mu\text{m}$.

De reconstructie van het audiosignaal

Uit het signaal dat door de optische pick-up van de plaat wordt gelezen, moet het analoge audiosignaal worden gereconstrueerd.

Fig. 3 heeft het blokschema van de signaalverwerking, zoals die plaatsvindt in het afspelapparaat. In DEMOD vindt de demodulatie plaats volgens regels voor de modulatie volgens de EFM-code, maar dan in omgekeerde richting. De informatie wordt daarna tijdelijk opgeslagen in een buffergeheugen en bereikt dan de schakeling voor de foutendetectie en -correctie, aangeduid als ERCO. Met behulp van de pariteitsbits kunnen hier eventuele fouten worden gecorrigeerd en, als correctie niet mogelijk

blijkt, alleen gedetecteerd⁴⁾. Fouten kunnen hun oorsprong vinden in defecten tijdens het fabricageproces, in beschadigingen tijdens het gebruik, of in vingerafdrukken of stof op de plaat. Omdat door de CIRC-bewerking de informatie in de tijd is verweven ('interleaved'), worden fouten die aan de ingang van *ERCO* in één raster voorkomen, bij het decoderen in *ERCO* over een groot aantal rasters verspreid. Hierdoor wordt de kans vergroot dat het maximale aantal corrigeerbare fouten per raster niet wordt overschreden. Een kras of andere beschadiging veroorzaakt vaak een reeks van fouten, 'burst' genoemd. De in *ERCO* toegepaste foutencorrigerende code is — mede door het verspreiden van de fouten — in staat een burst van maximaal 4000 databits volledig te corrigeren.

Als er meer fouten optreden dan maximaal zijn toegestaan, kunnen deze alleen nog worden gedetecteerd. In het blok *CIM*

(concealment: interpolation and muting) worden de gedetecteerde fouten vervolgens gemaskeerd. Als de waarde van een bemonstering een fout vertoont, wordt een nieuwe waarde bepaald door lineaire interpolatie tussen de voorgaande en de volgende waarde. Als twee of meer opeenvolgende bemonsteringen een fout vertonen, worden ze (in de huidige uitvoering van *CIM*) gelijk aan nul gemaakt ('muting'). Tevens wordt een gelijdelijke overgang gecreeerd door een aantal waarden ervoor en een aantal waarden erna, volgens een bepaald voorschrift, naar nul te laten verlopen.

In de digitaal-analoogomzetter *DAC*⁷⁾ worden de 16bits-monsters, na filters *F* gepasseerd te zijn, vertaald en weer aaneengevoerd tot de oorspronkelijke analoge audiosignalen *A* van de beide audiokanalen *L* en *R*. Omdat dit nauwkeurig met dezelfde frequentie moet gebeuren als waarmee het analoge audiosignaal is bemonsterd, wor-

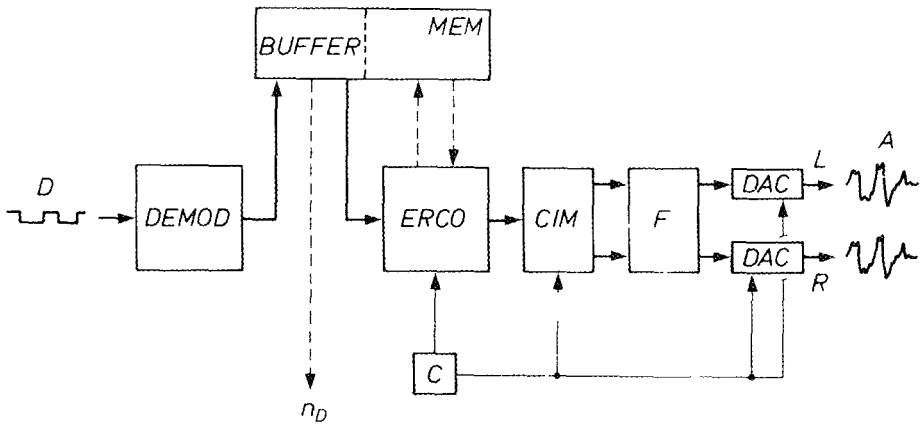


fig. 3.

Blokschema van de verwerking van het signaal in het afspelapparaat. *D* het ingaande digitale signaal, gelezen door de optische pick-up, zie fig. 2. *A* de beide uitgaande analoge audiosignalen van het linker (*L*) en het rechter (*R*) audiokanaal. *DEMOD* demodulatieschakeling. *ERCO* foutencorrectieschakeling. *BUFFER* buffergeheugen, deel uitmakend van het grotere, bij *ERCO* behorende, geheugen *MEM*. *CIM* schakeling, waarin fouten die alleen zijn gedetecteerd omdat ze niet kunnen worden gecorrigeerd, zoveel mogelijk worden gemaskeerd ('concealment'). *F* filters. *DAC* schakelingen voor de digitaal-analoogomzetting. Ieder der hiervoor genoemde blokken bestaat uit geïntegreerde schakelingen in VLSI-techniek. *C* klokgenerator, gestuurd door een kwartskristal. De vulgraad van het buffergeheugen dient als criterium bij de regeling van het toerental n_D van de plaat.

den de DAC's — evenals *CIM* en *ERCO* — gesynchroniseerd met behulp van een door een kwartskristal gestuurde klokgenerator C.

Uit fig 3 blijkt ook hoe het toerental n_D van de plaat wordt geregeld. De bitstroom komt synchroon met het kloksignaal uit het buffergeheugen. De bitstroom is echter het buffergeheugen ingegaan met een snelheid die wordt bepaald door het toerental van de plaat. De mate waarin n_D met de bemonsteringsfrequentie overeenkomt, bepaalt de vullingsgraad van het buffergeheugen. De regeling van n_D is zo ingericht dat steeds een vulling van 50% van het buffergeheugen wordt nagestreefd. Het analoge signaal dat het afspeelapparaat levert, is dus geheel vrij van 'wow' en 'flutter', zonder dat hoge eisen worden gesteld aan het constant zijn van het toerental van de plaat.

Samenvatting. In het 'Compact Disc'-systeem leveren de digitale behandeling van het audiosignaal en de optische aftasting van de plaat voordelen op als ongevoeligheid voor plaatbeschadigingen, compactheid van plaat en afspeelapparaat, uitstekende signaal/ruisverhouding en kanaalscheiding (beide 90 dB) en een over een groot frequentiegebied (tot 20 000 Hz) vlakke weergavekarakteristiek. De 'Compact Disc' heeft, bij een diameter van slechts 120 mm, een ononderbroken speelduur van ruim een uur. Het analoge audiosignaal wordt omgezet in een digitaal signaal, dat geschikt is om op de plaat te worden geschreven. Nadat het digitale signaal van de plaat is gelezen met behulp van een optische 'pick-up', wordt het oorspronkelijke audiosignaal in het afspeelapparaat gereconstrueerd.

*) Drs. M.G. Carasso en dr.ir. J.B.H. Peek, medewerkers van Philips' Natuurkundig Laboratorium, Eindhoven, J.P. Sinjou, medewerker van Philips' Hoofdindustrialiegroep Audio, Eindhoven.

- 1) Zie F.W. de Vrijer, Modulatie, Philips techn T **36**, 313-368, 1976, in het bijzonder blz 332 en 333
- 2) Zie Philips techn T **33**, 185-201, 1973
- 3) Zie fig 3 van het artikel van J.P.J. Heemskerck en K.L. Schouhamer Immink in dit nummer
- 4) Zie H. Hoeve, J. Timmermans en L.B. Vries, Foutencorrectie en -maskering in het 'Compact Disc'-systeem, dit nummer
- 5) Zie J.P.J. Heemskerck en K.A. Schouhamer Immink, 'Compact Disc' — systeemaspecten en modulatie, dit nummer
- 6) J.C.J. Finck, H.J.M. van der Laak en J.T. Schiama, Philips techn T **39**, 97, 1980
- 7) Zie D. Goedhart, R.J. van de Plassche en E.F. Stikvoort, 'Compact Disc' — de omzetting van digitaal in analoog bij het afslefen. Philips techn T **40**, 290, 1981

"Compact Disc"

- systeemaspecten en modulatie

J.P.J. Heemskerk en K.A. Schouhamer Immink*

In dit artikel gaan we nader in op de verschillende factoren die bij het ontwerpen van het 'Compact Disc'-systeem tegen elkaar moesten worden afgewogen. In het bijzonder bespreken we daarbij het modulatiesysteem EFM (eight to fourteen modulation) dat mede helpt om de gewenste hoge informatiedichtheid op de plaat te realiseren

In fig 1 is het gehele 'Compact Disc'-systeem gerepresenteerd als een 'transmissiesysteem' dat het geluid van een orkest in de huiskamer brengt. Het orkestgeluid wordt daartoe aan de opnamekant omgezet in een *bitstream* B_1 die op de 'master'-plaat wordt vastgelegd. Naar het voorbeeld van de 'master'-plaat worden de platen voor de gebruiker geproduceerd. Een plaat in de speler reproduceert, via de bitstream

B_0 — die in het ideale geval identiek zou zijn met B_1 —, het orkestgeluid in de huiskamer. Het systeem tussen *COD* en *DECOD* is het eigenlijke *transmissiekanaal*; B_1 en B_0 bestaan uit 'kanaalbits'

In fig. 2 is het codeersysteem wat verder uiteengezeld. Het audiosignaal wordt met PCM eerst omgezet in een reeks B_1 van 'audiobits'. Daar worden vervolgens aan toegevoegd, een aantal bits voor 'control and display' (C&D) en de pariteitsbits die foutcorrectie mogelijk maken¹⁻²). Dit resulteert in de 'databitstream' B_2 . De modulator zet deze om in kanaalbits (B_3), in de stroom B_1 is daar nog een synchronisatiesignaal aan toegevoegd

Voor het aantal databits n dat op de plaat kan worden opgeslagen geldt

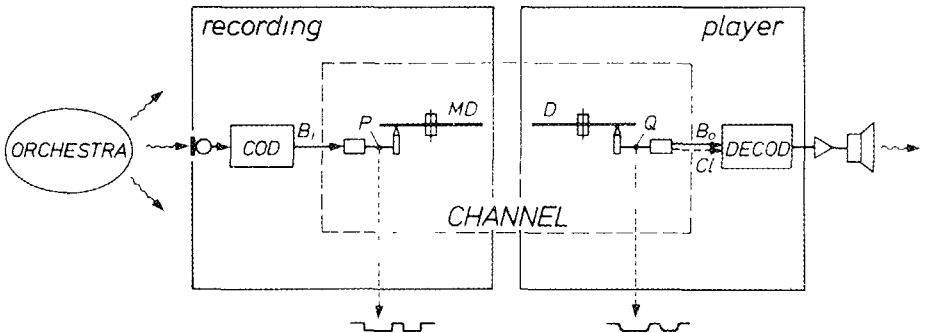


Fig. 1.

Het 'Compact Disc'-systeem, opgevat als een transmissiesysteem dat het geluid van de studio in de huiskamer brengt. Door het transmissiekanaal tussen het codeersysteem (*COD*) aan de opnamekant en het decodeersysteem (*DECOD*) in de speler, wordt de bitstream B_1 , via de schrijflaser, de 'master'-plaat (*MD*), de platenproductie, de plaat (*D*) in de speler en de optische pick-up 'overgezonden' naar *DECOD*, in het ideale geval is B_0 gelijk aan B_1 . Uit het signaal van de pick-up bij *Q* moeten niet alleen de bits van B_0 worden gedetecteerd maar ook de klok (*C*) worden geregenereerd die voor de verdere digitale verwerkingen nodig is

$$n = \eta A/d^2,$$

waarin A het bruikbare gedeelte van de plaatoppervlakte is, d de diameter van de uitlees-lichtvlek, en η het 'aantal databits per lichtvlek' (het aantal databits dat op een stukje ter lengte d van het spoor kan worden onderscheiden). A/d^2 is het aantal lichtvlekken dat de plaat kan bevatten. Voor de informatiedichtheid n/A geldt dus.

$$n/A = \eta/d^2. \quad (1)$$

De lichtvlek diameter d is een van de belangrijkste parameters van het kanaal. Met de modulatie kan winst in η worden geboekt. We bespreken nu eerst in het kort enkele aspecten van het kanaal die mede de eisen bepalen die we aan het modulatiesysteem stellen

Het kanaal

De bitstream B_1 in fig. 1 wordt omgezet in een signaal bij P dat de lichtbundel van de

schrijflaser in- en uitschakelt. Het kanaal dient zo goed te zijn dat uit het leessignaal bij Q de bitstream B_1 kan worden gereconstrueerd.

Om dit mogelijk te maken moeten er hoge eisen gesteld worden aan alle stappen in de transmissieweg, van het opnemen van de 'master'-plaat via de platenfabricage tot het afspelen toe. In het bijzonder zijn het de speler en de plaat die de kwaliteit van het kanaal bepalen. Dit zijn nl serieproducten, die niet binnen al te nauwe toleranties gefabriceerd kunnen worden.

We laten hier aan de hand van één voorbeeld zien hoe dergelijke toleranties een rol spelen bij het ontwerp, en wel bij de keuze van de lichtvlek diameter d . Definieren we d als de halfwaarde-diameter voor de lichtintensiteit, dan geldt.

$$d = 0,6 \lambda/NA,$$

waarin λ de golflengte van het gebruikte laserlicht is en NA de numerieke apertuur van het objectief. Ten behoeve van de

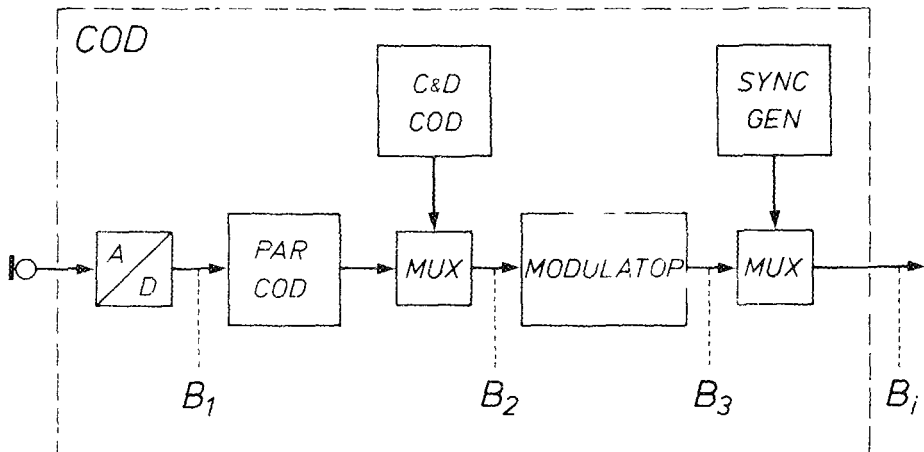


Fig. 2.

Het codeersysteem (COD in fig. 1). Het systeem is zeer vereenvoudigd weergegeven, in werkelijkheid zijn er b.v. ten behoeve van stereoweergave twee audiokanalen aan de ingang die tezamen via PCM de bitreeks B_1 leveren, en worden de verschillende digitale bewerkingen gestuurd door een 'klok' die niet is aangegeven. De bitstream B_1 wordt aangevuld met pariteits- en C&Dbits (B_2), gemoduleerd (B_3), en voorzien van synchronisatiesignalen (B_i) MUX multiplexers. Fig. 9 geeft de diverse bitstromen in meer detail.

informatiedichtheid (1) moet d zo klein mogelijk zijn. De kleine, goedkope en met laagspanning te voeden diodelaser CQL10³) is als lichtbron voor dit systeem gekozen, daarmee ligt de golflengte vast ($\lambda \approx 800$ nm). De numerieke apertuur moet dus zo groot mogelijk zijn. Met het toenemen van NA nemen echter de toleranties in de fabricage, zowel van de speler als van de plaat, drastisch af. Zo is b.v. de tolerantie in de lokale scheefstand van de plaat (de

'plaatkanteling') ten opzichte van de objectiefas evenredig met NA^{-3} . De tolerantie in de plaatdikte blijkt evenredig te zijn met NA^{-4} , en de scherptediepte, die de tolerantie in de focusering bepaalt, met NA^{-2} . De afweging van deze factoren heeft geleid tot een keuze van 0,45 voor NA . Daarmee vinden we een waarde van $1\mu\text{m}$ voor de lichtvlekdiаметer d .

De kwaliteit van het kanaal wordt beoordeeld met een 'oogpatroon', dat men verkrijgt door het punt Q in fig. 1 aan te sluiten op een oscilloscoop die gesynchroniseerd is met de klok van de bitreeks B_o , zie fig. 3a. De signalen afkomstig van verschillende put en damlengten worden door elkaar heen geschreven; zij zijn sterk afgerond, voornamelijk door de uitgebreidheid van de lichtvlek en de beperkte steilheid van de putflanken. Bij voldoende kwaliteit kan men echter op de 'klokmomenten' (de streepjes in fig. 3a) steeds goed beslissen of het signaal positief of negatief is, en daaruit de bitreeks reconstrueren. De ruit om een streepje is in dit geval het oog. Door onvolmaaktheden van het kanaal kan het oog dichtslippen, door 'phase jitter' van het signaal ten opzichte van de klok wordt een oog smaller, door ruis wordt het minder hoog. De signalen van fig. 3a zijn berekend voor een perfecte optiek. In fig. 3b ziet men het effect van een defocusering van $2\mu\text{m}$, in fig. 3c het effect van, bovendien, een radiale plaatkanteling van $1,2^\circ$. In fig. 3b is een goede beslissing nog mogelijk, in fig. 3c niet meer.

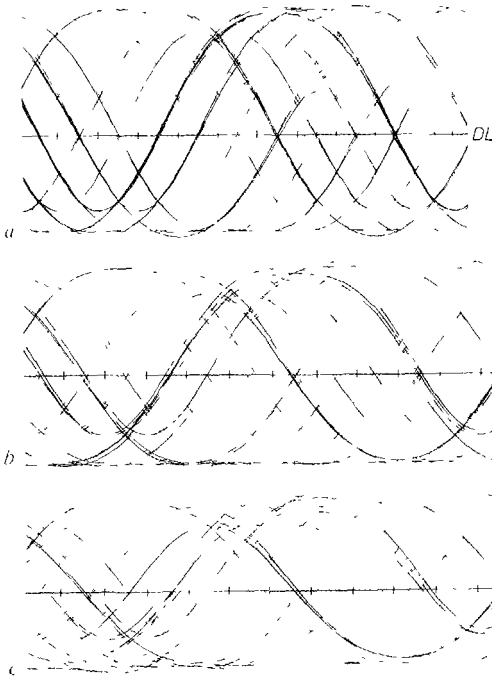


Fig. 3. Oogpatroon. De figuren geven het leessignaal (bij Q in fig. 1) op een met de bitklok gesynchroniseerde oscilloscoop. Op de beslissingstijdstippen (de streepjes) moet kunnen worden uitgemaakt of het signaal boven of onder het beslissingsniveau (DL) ligt. De krommen zijn berekend voor a) een ideale optiek, b) een defocusering van $2\mu\text{m}$, c) een defocusering van $2\mu\text{m}$ tezamen met een radiale plaatkanteling van $1,2^\circ$. De krommen geven een goed beeld van wat men ook experimenteel vindt.

Tabel I. Fabricagetoleranties

speler	objectiefkanteling $\pm 0,2^\circ$
	spoorvolgving $\pm 0,1\mu\text{m}$
	focusering $\pm 0,5\mu\text{m}$
	rms golffrontfout van de leesbundel $\pm 0,05\lambda$ (± 40 nm)
plaat	dikte $1,2 \pm 0,1$ mm
	vlakheid $\pm 0,6$ (d : een doorbuiging aan de rand van $0,5$ mm)
	positionering van putflanken ± 50 nm
	putdiepte 120 ± 10 nm

Dit voorbeeld geeft tevens een indruk van de hoge eisen die aan de apparatuur worden gesteld. Ten einde een wat algemener overzicht daarvan te geven, zijn in tabel I

de fabricagetoleranties van een aantal belangrijke grootheden, zowel van de speler als van de plaat, verzameld, de lijst is vanzelfsprekend allerminst volledig.

Bij goed gefabriceerde spelers en platen kan de kanaalkwaliteit nog worden aangetast door vuil en krassen die bij gebruik op de platen ontstaan. In principe is het systeem daar vrij ongevoelig voor¹⁾, en resulterende fouten kunnen bovendien vrijwel altijd nog worden gecorrigeerd dan wel gemaskerd²⁾. In het hierna volgende zullen we zien dat ook het modulatiesysteem er toe bijdraagt de gevoeligheid voor onvolmaaktheden te verminderen.

Bitreeksmodulatie

De speelduur van een plaat is gelijk aan de spoorlengte gedeeld door de spoorsnel-

heid v . De speelduur wordt dus (bij gegeven plaatgrootte) groter naarmate we de spoorsnelheid van het systeem (de spoorsnelheid van de 'master'-plaat en de gebruikersplaat) kleiner kiezen. Doen we dit echter, dan wordt het kanaal 'slechter', in die zin

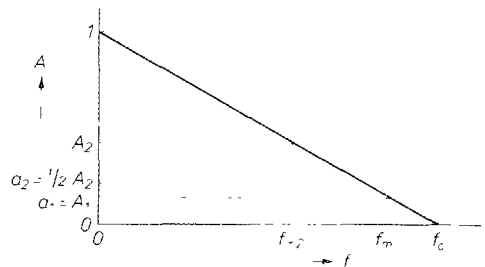


Fig. 5.

Amplitude-frequentiekarakteristiek van het kanaal. De figuur geeft de amplitude A van het (sinusvormige) signaal in Q (fig. 1) als er in P een sinusvormig eenheidssignaal wordt aangeboden, als functie van de frequentie f . De transmissie wordt 'afgesneden' bij de frequentie f_c , daarvoor geldt $f_c = (2N\lambda/\lambda)v$. De getrokken lijn geldt voor een ideale optiek, in werkelijkheid heeft men altijd met wat lagere waarden van A te maken, de afsnijfrequentie is dan effectief lager. De 'maximum-frequenties' f_{m1} , f_{m2} , de amplitudes A_1 , A_2 en de 'halve ooghoogten' a_1 , a_2 hebben betrekking op 'directe' en 'gemoduleerde' inschrijving van de databits op de plaat, zie fig. 4 en 6.

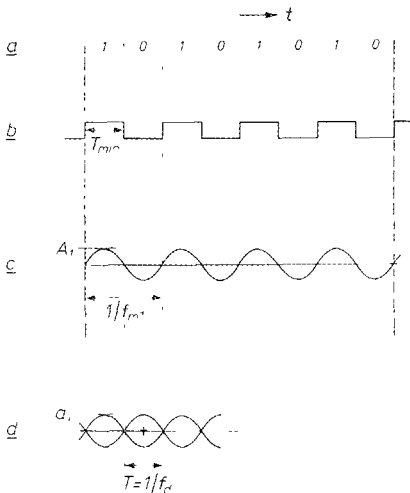


Fig. 4.

Directe inschrijving van de databitreeks op de plaat. a) Databitreeks met de snelste wisseling van enen en nullen. b) Directe vertaling van de bitreeks in een putjespatroon. c) Het bijbehorende uitgangssignaal (bij Q in fig. 1), de amplitude A_1 vindt men met behulp van fig. 5. d) Het oogpatroon dat uit (c) volgt. T_{min} minimumput of damlengte, f_{m1} hoogste frequentie, T databitlengte, f_d databitnelheid. Er geldt $T_{min} = T$, $f_{m1} = 1/2 f_d$.

dat de ooghoogte kleiner wordt: het systeem wordt gevoeliger voor storingen. Er is dus een ondergrens voor de spoorsnelheid als er een minimum-waarde voor de ooghoogte vastgesteld is in verband met te verwachten ruis en storingen. We zullen nu laten zien hoe we, door een geschikte modulatie, deze ondergrens kunnen verleggen.

We bezien eerst de situatie zonder modulatie. In de binnenkomende databitstroom kunnen de enen en nullen willekeurig wisselen. We beschouwen een reeks van 8 databits waarin de wisseling het sterkst is (fig. 4a). Bij ongecodeerde inschrijving (1. put; 0: dam, of omgekeerd) ontstaat het patroon van fig. 4b. Dit levert bij Q in fig. 1 het afgeronde signaal van fig. 4c; fig. 4d geeft het oogpatroon. Het signaal van

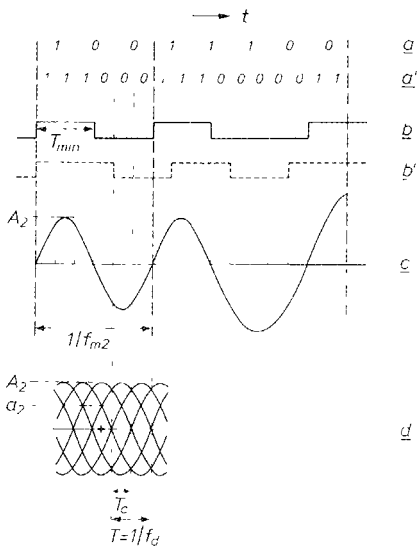


Fig. 6.

8→16-modulatie. Elke groep van 8 databits (a) is met een 'woordenboek' vertaald in 16 kanaalbits (a'), zodanig dat de looplengte ten minste drie kanaalbits bedraagt b) Putjespatroon dat uit de kanaalbitreeks (a') ontstaat, b') een putjespatroon voor een ander ingangssignaal c) Het bij (b) behorende leessignaal, de amplitude wordt weer met behulp van fig 5 bepaald d) Het verkregen oogpatroon. De halve ooghoogte (a_2) bedraagt hier slechts de helft van de amplitude (A_2) van het (ongeveer sinusvormige) signaal met maximum-frequentie (f_{m2})

fig 4c vertegenwoordigt de hoogste frequentie (f_{m1}) bij deze wijze van transmissie. Daarvoor geldt blijkbaar $f_{m1} = \frac{1}{2} f_d$, waarin f_d de gegeven databitsnelheid is. De halve ooghoogte a_1 is gelijk aan de amplitude A_1 van het signaal met de hoogste frequentie.

Het verband tussen ooghoogte en spoor-snelheid wordt nu, indirect, gegeven door de 'amplitude-frequentie karakteristiek' van het kanaal; zie fig. 5. Daarin is A de amplitude van het (sinusvormige) signaal bij Q in fig. 1 als er in P een sinusvormig eenheidssignaal van frequentie f wordt aangeboden. Met behulp van Fourier-analyse en -synthese kan uit $A(f)$ het uitgangssignaal bij elk willekeurig ingangssignaal worden berekend. De getrokken lijn vertegenwoor-

digt een kanaal met een perfecte optiek, daar gaan wij in dit hoofdstuk voorlopig van uit; de werkelijkheid zal altijd wat ongunstiger zijn. De 'afsnijfrequentie' f_c wordt bepaald door de lichtvlek-diameter en de spoor-snelheid v ; in het ideale geval geldt. $f_c = (2NA/\lambda)v$

Bij gegeven spoor-snelheid lezen we nu direct de halve ooghoogte a_1 in fig 4 uit fig 5 af: deze is gelijk aan de amplitude A_1 bij de frequentie f_{m1} . Variëren we de spoor-snelheid, dan draait de rechte om het punt 1 op de A -as. Bij gegeven minimum-waarde van a_1 volgt uit de figuur hoe ver we f_c kunnen laten dalen, daarmee is de ondergrens voor v vastgelegd. Is in het bijzonder de minimumwaarde voor a_1 zeer klein, dan kan f_c dalen tot even boven f_{m1} ($= \frac{1}{2} f_d$)

Fig. 6 geeft de situatie weer met modulatie, en wel met een denkbeeldige 8→16-modulatie, die echter zeer dicht bij EFM staat. Elke groep van 8 inkomende databits (fig 6a) wordt daarbij vertaald in 16 kanaalbits (fig 6a'). Dit geschiedt volgens een 'woordenboek' dat aan elk woord van 8 bits on dubbelzinnig, maar overigens willekeurig, een woord van 16 bits toekent, echter wel zodanig dat de verkregen kanaal-bitstroom alleen putten en dammen produceert die ten minste drie kanaalbits lang zijn (fig. 6b). Omgerekend op de tijdschaal is de 'minimum-loop-lengte' T_{min} 1/2 maal zo groot geworden als in fig 4, maar een eenvoudige berekening leert dat er toch ongeveer evenveel informatie overgebracht kan worden als in fig 4 (256 combinaties per 8 databits), doordat er per lengte-eenheid meer posities voor de putflanken zijn (vgl. fig. 6b en b') de 'kanaalbitlengte' T_c is tweemaal zo klein geworden.

Met de modulatie hebben we bereikt dat de hoogste frequentie (f_{m2}) die in het signaal voorkomt (zie fig 6c links), kleiner is geworden ($f_{m2} = \frac{1}{3} f_d = \frac{2}{3} f_{m1}$). Uit fig. 5 volgt dat f_c en v daardoor bijna 1 1/2 maal zo klein ($\frac{2}{3}$ maal zo groot) kunnen worden gekozen, voor het geval dat zeer kleine signalen toelaatbaar zijn, dit betekent een winst van bijna 50% in speelduur. De modulatie heeft ook nadelen. In de eerste plaats is de halve ooghoogte (a_2) in dit

geval slechts de helft van de amplitude (A_2) van het signaal met de hoogste frequentie (zie fig. 6d). Dit heeft zijn consequenties als men de situatie nagaat voor een wat grotere minimum-ooghoogte. Zo wordt de modulatie b.v. volledig onbruikbaar als de halve ooghoogte in fig. 5 niet kleiner dan $\frac{1}{2}$ mag zijn ($a_2 = \frac{1}{2}$ dus $A_2 = 1$), ongecodeerde inschrijving is dan nog wel mogelijk ($A_1 = a_1 = \frac{1}{2}$). In de tweede plaats is, met de oogbreedte (T_C), de tolerantie voor tijdfouten en voor de positionering van de putflanken tweemaal zo klein geworden. Bij het ontwerpen van een systeem moet een en ander dus zorgvuldig tegen elkaar worden afgewogen.

Ten einde kwalitatief te laten zien hoe men tot een keuze kan komen, hebben we in fig. 7 de halve ooghoogte uitgezet als functie van de 'lineaire informatiedichtheid' σ (het aantal inkomende databits per lengte-eenheid van het spoor; $\sigma = f_d/v$) voor drie systemen: '8→8-modulatie' (d.i. ongecodeerde inschrijving), 8→16-modulatie, en een systeem met ongeveer weer dezelfde informatie-capaciteit per 8 databits, waarbij de minimum-looplenge echter nog verder vergroot is, vanzelfsprekend weer ten koste van de oogbreedte ('8→24-modulatie', $T_{\min} = 2T$, $T_C = \frac{1}{3}T$). De figuur is een directe uitwerking van de hierboven gevolgde gedachtengang, met dien verstande dat gerekend is met een afsnijfrequentie die 20% lager is dan de ideale waarde $(2NA/\lambda)v$, dit als eerste aanpassing aan wat wij in de praktijk voor de functie $A(f)$ vinden.

De keuze voor het 8→16-systeem komt nu kwalitatief hierop neer, dat ruis en storingen van dien aard zijn dat het oog wel kleiner mag zijn dan in het punt A in fig. 7, maar dat het in C te klein wordt; met 8→16-modulatie kan dus winst worden geboekt, met 8→24-modulatie niet meer.

Voor het gekozen 'Compact Disc'-systeem geldt: $\sigma = 1,55$ databit/ μm ($f_d = 1,94$ Mb/s, $v = 1,25$ m/s¹), het werkpunt zou in fig. 7 dus in P liggen. Het gebruikte model is echter tamelijk grof; in een meer genuanceerd model blijken A, B en C zover meer naar links te liggen dat P dicht bij C ligt. Maar ook dicht bij C is 8→16-modulatie nog altijd te verkiezen boven 8→24-modu-

latie vanwege de $1\frac{1}{2}$ maal zo grote oogbreedte.

EFM is een verfijning van 8→16-modulatie. De keuze voor dit systeem is gebaseerd op meer gedetailleerde modellen en een verscheidenheid van experimenten. Bij de gebruikte ooghoogte geeft het een winst van 25% in informatiedichtheid vergeleken met ongecodeerde inschrijving.

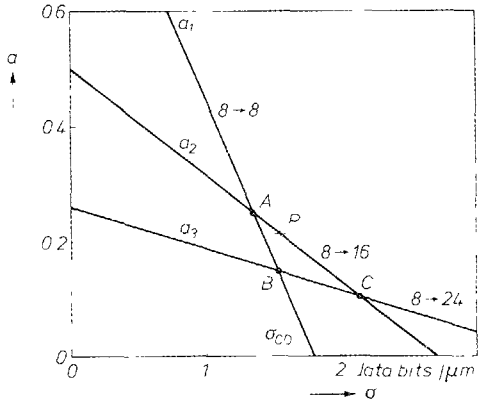


Fig. 7.

De halve ooghoogte a als functie van de lineaire informatiedichtheid σ , voor 8→8-, 8→16- en 8→24-modulatie. Deze systemen worden gekarakteriseerd door de volgende waarden voor de kanaalbitlengte T_C en de minimumlooplenge T_{\min}

8→8 $T_C = T$, $T_{\min} = T$ (fig. 4),

8→16 $T_C = \frac{1}{2}T$, $T_{\min} = \frac{3}{2}T$ (fig. 6),

8→24 $T_C = \frac{1}{3}T$, $T_{\min} = 2T$,

waarin T de databitlengte is. De rechten geven de relaties weer die men uit fig. 5 afleidt

$$a_1 = c_1(1 - f_{m1}/f_c) \rightarrow a_1 = 1 - \sigma/1,8,$$

$$a_2 = c_2(1 - f_{m2}/f_c) \rightarrow a_2 = 0,5(1 - \sigma/2,7),$$

$$a_3 = c_3(1 - f_{m3}/f_c) \rightarrow a_3 = 0,26(1 - \sigma/3,6),$$

waarin σ de getalswaarde is van de lineaire informatiedichtheid uitgedrukt in databits per μm . De c 's zijn de verhoudingen 'halve ooghoogte/amplitude' en de f_m 's de maximum-frequenties voor de drie systemen ($c_1 = 1$, $c_2 = \sin 30^\circ = 0,5$, $c_3 = \sin 15^\circ = 0,26$, $f_{m1} = \frac{1}{2}f_d$, $f_{m2} = \frac{1}{3}f_d$, $f_{m3} = \frac{1}{4}f_d$, f_d databitsnelheid). Het tweede stel vergelijkingen volgt uit het eerste stel door substitutie van $0,8 \times (2NA/\lambda)v$ voor f_c , met $NA = 0,45$, $\lambda = 0,8 \mu\text{m}$, $v = f_d/\sigma$. De factor 0,8 is geïntroduceerd als eerste grove correctie op de 'ideale' amplitudekarakteristiek.

Verdere eisen betreffende het modulatiesysteem

Bij de nadere uitwerking van het modulatiesysteem moesten we nog rekening houden met de volgende twee eisen.

In de eerste plaats moet in de speler de *bitklok* kunnen worden geregenereerd uit het uitgelezen signaal (het signaal in *Q* in fig. 1). Daartoe moet het aantal putflanken per seconde voldoende groot zijn; in het bijzonder moet de 'maximumlooptijd' T_{max} zo klein mogelijk zijn.

De tweede eis betreft de 'laagfrequentie-inhoud' van het uitleessignaal. Deze moet zo klein mogelijk zijn. Daar zijn twee redenen voor. In de eerste plaats worden de servosystemen voor de spoorvolgning en de focusering¹⁾ bestuurd met laagfrequentie signalen, zodat laagfrequente componenten van het informatiesignaal de servosystemen zouden kunnen storen. De tweede reden wordt geïllustreerd door fig. 8, waarin het uitgelezen signaal is geschetst voor een schone plaat (a) en voor een plaat die, bij voorbeeld ten gevolge van een vingerafdruk, vuil is (b). Het signaal zakt daardoor zowel in amplitude als in niveau. Dit laatste zou een geheel foute uitlezing kunnen veroorzaken, doordat het signaal beneden het beslissingsniveau zakt. Dergelijke fouten worden voorkomen met behulp van een filter dat de laagfrequente componenten elimineert (c), maar zo'n filter is alleen toegestaan als het informatiesignaal zelf geen laagfrequentie-inhoud heeft. In het 'Compact Disc'-systeem wordt voor de informatie-overdracht het frequentiegebied van 20 kHz tot 1,5 MHz gebruikt; de servosystemen werken op signalen van 0 tot 20 kHz.

Het modulatiesysteem EFM

Fig. 9 geeft een overzicht van de bitrijken in het codeersysteem. De informatie is verdeeld in 'rasters' (Engels: frames). Eén raster bevat 6 bemonsteringsperiodes met elk 32 audiobits (16 bits voor elk der beide audiokanalen). Deze worden verdeeld in symbolen van 8 bits. De bitstroom B_1 bevat dus 24 symbolen per raster. In B_2 zijn daaraan 8 pariteitssymbolen en één C&D-symbool toegevoegd. 33 'data-symbolen'. De modulator vertaalt elk symbool in

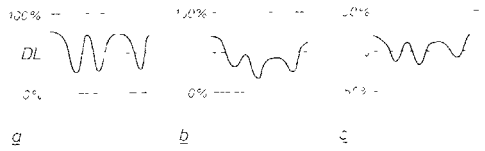


Fig. 8.

Het uitleessignaal van zes putflanken op de plaat, a) voor een schone plaat, b) voor een vuile plaat, c) voor een vuile plaat, nadat het signaal een filter heeft gepasseerd dat lage frequenties elimineert. DL beslissingsniveau. Door het vuil daalt zowel de amplitude als het niveau van het signaal, de beslissingsfouten die daardoor zouden ontstaan, worden met behulp van het filter geëlimineerd.

een nieuw symbool van 14 bits. Daar worden nog 3 'koppelbits' aan toegevoegd, op het hoe en waarom daarvan komen we zo dadelijk terug. Zo ontstaat B_1 , waaraan nog een synchronisatiesymbool van 27 bits is toegevoegd. B_1 bevat per raster dus $33 \times 17 + 27 = 588$ kanaalbits. B_1 wordt ten slotte omgezet in een signaal dat de schrijfflaser bestuurt. We merken nog op dat in B_1 '1' of '0' niet 'put' of 'dam' betekent, zoals wij eenvoudigheidshalve in fig. 6 hebben verondersteld, maar dat een '1' een putflank markeert. De informatie is dus alleen in de posities van de flanken opgeslagen, voor het decodeersysteem maakt het derhalve niet uit of 'put' en 'dam' op de plaat verwisseld worden.

De keuze voor het vertalen van telkens 8 bits, in aansluiting op de indeling in symbolen bij de pariteitscodering, voorkomt 'foutenverlenging' ('error propagation'). Voor het foutencorrectiesysteem is nl. steeds een geheel symbool 'fout' of 'niet fout'. Eén kanaalbitfout die bij de transmissie ontstaat, verknoeit weliswaar een geheel symbool, maar — door de bedoelde aansluiting — ook niet méér dan één symbool. Kiest men voor een ander modulatiesysteem, waarbij de databits niet in groepen van 8, maar b.v. van 6 of 10 worden vertaald, dan verdeelt men de bitstroom B_2 in feite opnieuw in 6- of 10-bits-'modulatiesymbolen'. Eén foute kanaalbit verknoeit dan weliswaar slechts één modulatiesymbool, maar dat tast dan meestal wel twee van de oorspronkelijke 8-bitssymbolen aan.

Bij EFM is gekozen voor een vertaling van telkens 8 databits in 14 kanaalbits, met een T_{min} van 3 en een T_{max} van 11 kanaalbits (dit betekent dus: ten minste 2 en ten hoogste 10 nullen achter elkaar in B_1). De keuze is in grote lijnen als volgt tot stand gekomen. We hebben reeds gezien dat de keuze van ca. $1\frac{1}{2}$ databit voor T_{min} , met omstreeks 16 kanaalbits per 8 databits, voor het 'Compact Disc'-systeem ongeveer optimaal is⁴⁾ Een eenvoudige berekening

leert dat men minstens 14 kanaalbits nodig heeft om de 256 mogelijke symbolen van 8 databits alle te kunnen weergeven onder de voorwaarden $T_{min} = 3$, $T_{max} = 11$ kanaalbits. De keuze voor T_{max} is ingegeven door het feit dat men het zich met een grotere keuze niet erg veel gemakkelijker maakt, terwijl het met een kleinere keuze opeens wel veel moeilijker wordt. Met 14 kanaalbits kan men 267 symbolen maken die aan de looplengtevoorwaarden

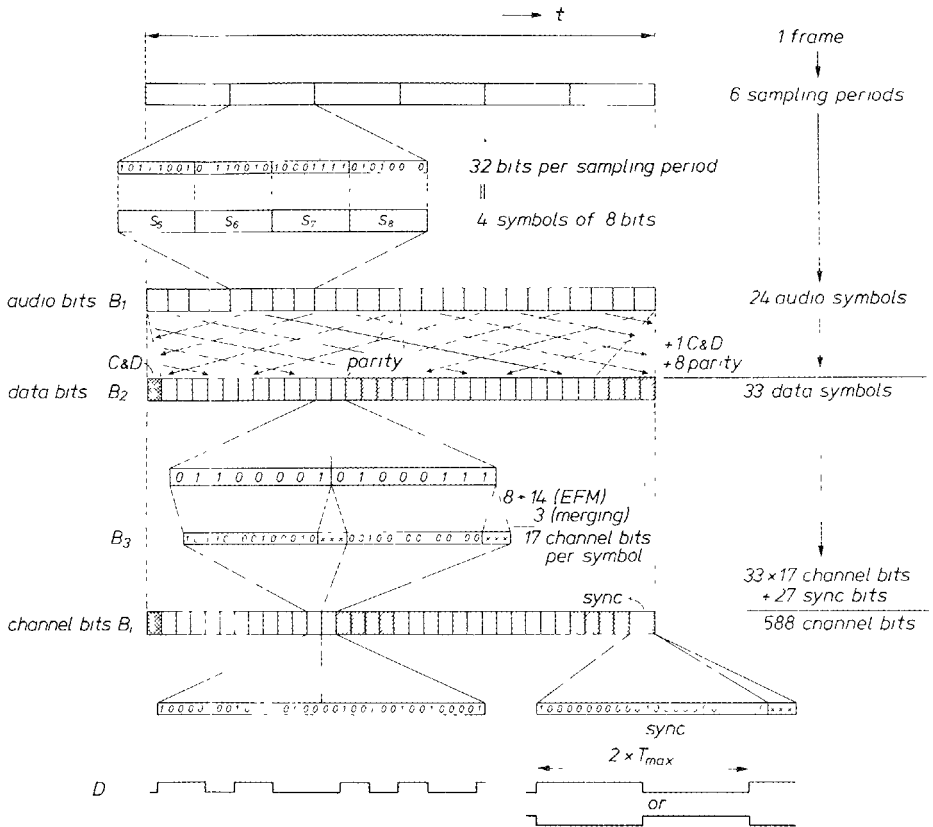


Fig. 9.

Bitstromen in het codeersysteem (fig. 2) De informatie is verdeeld in rasters, de figuur geeft één raster van de successieve bitstromen. Er zijn per raster zes bemonsteringsperiodes, die elk 32 bits leveren (16 voor elk der beide audiokanalen) De 32 bits zijn in de 'audiobitreeks' B_1 verdeeld in vier symbolen. In de 'databitreeks' B_2 zijn aan de 24 audiosymbolen acht pariteitssymbolen en één C&D-symbool toegevoegd. Ter verspreiding van eventuele fouten zijn de symbolen van verschillende rasters in B_1 met elkaar vervlochten, zodat de audiosymbolen in één raster van B_2 afkomstig zijn van verschillende rasters in B_1 . Door de modulatie worden de acht databits van een symbool van B_2 vertaald in veertien kanaalbits, waaraan nog drie 'koppelbits' worden toegevoegd (B_3). De rasters worden gemarkeerd met een synchronisatiesignaal van de getekende vorm (rechts onder), daarmee is de 'kanaalbitreeks' (B_4) verkregen die gebruikt wordt om de 'master'-plaat te beschrijven, zodanig dat elke '1' een overgang put/dam of dam/put levert (D)

voldoen. Aangezien er slechts 256 nodig zijn, hebben we er 10 van geschrapt die het aanéénrijgen van symbolen onder deze voorwaarden extra moeilijk zouden maken, en één geheel willekeurig. Voor het overige is het woordenboek met behulp van computeroptimalisatie zodanig samengesteld dat de vertaling in de speler kan worden uitgevoerd met een zo eenvoudig mogelijke schakeling, dat wil zeggen met een schakeling met zo weinig mogelijk logische poorten

De koppelbits dienen er in de eerste plaats voor aan de looplengthvoorwaarden te blijven voldoen bij het aanéénrijgen. Dreigt de looplength te kort te worden dan kiezen we er nullen voor, wordt hij te lang dan doen we er één bij. We houden dan echter nog een grote vrijheid over in de

keuze van de koppelbits, en deze vrijheid wordt gebruikt om de laagfrequent-inhoud van het signaal te minimaliseren. Op zichzelf zouden twee koppelbits voldoende zijn om steeds aan de looplengthvoorwaarden te kunnen voldoen. De overgebleven vrijheid is in dat geval echter onvoldoende voor een effectieve minimalisatie van de laagfrequent-inhoud. Het toevoegen van een derde koppelbit kost weliswaar 6% aan informatiedichtheid op de plaat, maar resulteert in voldoende onderdrukking van de laagfrequent-inhoud. De koppelbits bevatten geen audio-informatie en worden in de demodulator weer uit de bitstroom verwijderd.

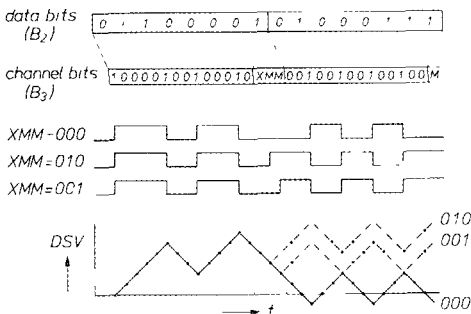


Fig. 10 illustreert ten slotte hoe de koppelbits worden bepaald. Als maat voor de laagfrequent-inhoud gebruiken we de zg. digitale somwaarde (DSV, 'digital sum value'); dit is het vanaf het begin van de plaat geaccumuleerde verschil tussen put- en damlengthe. Bovenaan ziet men twee datasymbolen van B₂ en hun vertaling volgens het woordenboek in kanaalsymbolen (B₃). Volgens de T_{min}-regel moet in dit geval de eerste van de koppelbits een nul zijn, deze positie wordt gekenmerkt met 'X'. Bij de twee volgende posities is de keuze vrij, deze worden gemerkt met 'M'. De drie keuzemogelijkheden XMM = 000, 010 en 001 zouden aanleiding geven tot de getekende putjespatronen, en tot het getekende verloop van de DSV, daarbij is verondersteld dat de DSV aan het begin gelijk aan 0 was. Er wordt nu gekozen voor die koppeling die de DSV aan het einde van het tweede symbool zo klein mogelijk maakt, dus voor 000 in dit geval. Als de beginwaarde -3 was geweest, zou de koppeling 001 zijn gekozen.

Met deze strategie wordt de ruis in de ser- vobandfrequenties (< 20 kHz) onderdrukt met ongeveer 10 dB. In principe kunnen, binnen de overeengekomen standaard voor het 'Compact Disc'-systeem, betere resultaten worden verkregen door over méér dan één symbool vooruit te kijken, minimalisatie van de DSV op korte termijn draagt nl. niet altijd bij tot minimalisatie

Fig. 10.

Strategie voor het minimaliseren van de digitale somwaarde (DSV). Na vertaling van de databits in kanaalsymbolen worden de symbolen door middel van drie extra-bits zodanig aan elkaar gekoppeld dat aan de looplengthvoorwaarden voldaan blijft, t en de DSV zo klein mogelijk wordt. De eerste looplengthregel (minstens twee nullen achter elkaar) eist in het getekende geval een nul op de eerste positie, terwijl de keuze voor de tweede en derde positie vrij blijft. Er zijn in dit geval dus drie mogelijkheden voor de koppeling 000, 010 en 001. Deze mogelijkheden leveren de getekende putjespatronen en het getekende verloop van de DSV. De koppeling die de laagste waarde van DSV aan het einde van het erop volgende symbool levert, wordt gekozen. Er wordt dus één symbool vooruit gekeken, strategieën waarbij verder vooruit wordt gekeken zijn in principe ook mogelijk.

op langere termijn. Van deze mogelijkheid wordt in het huidige 'Compact Disc'-systeem nog geen gebruik gemaakt.

Samenvatting. Het 'Compact Disc'-systeem kan worden gezien als een transmissiesysteem dat geluid van de studio in de huiskamer brengt. Het in databits gecodeerde, en tot kanaalbits gemoduleerde geluid wordt via het 'transmissie-kanaal' (schrijffaser, 'master'plaat, gebruikersplaat, optische pick-up) overgezonden. De mogelijke informatiedichtheid op de plaat wordt bepaald door de diameter d van de leeslichtvlek op de plaat en het 'aantal databits per lichtvlek'. Met het kleiner maken van d nemen de fabricagetoleranties voor de speler en de speelplaat drastisch af. Het gekozen compromis levert $d \approx 1 \mu\text{m}$, met zeer geringe toleranties voor o.m. objectief- en plaatkanteling, plaatdikte en defocussing. De grondgedachte van de modulatie is dat men, bij behoud van de minimumlengte voor 'put' en 'dam' (de 'minimum-looplengte') die nodig is voor een goede transmissie door het kanaal, de informatiedichtheid kan vergroten door het aantal posities per lengte-eenheid voor putflanken (de bitdichtheid) te vergroten. Ten behoeve van klokregeneratie is er ook een maximum-looplengte, terwijl de laagfrequent-inhoud van het uitleessignaal zo klein mogelijk moet zijn. Met het gebruikte modulatiesysteem EFM wordt elk 'symbool' van acht databits omgezet in 14

kanaalbits (met een minimumlooplengte van 3 en een maximum-looplengte van 11 bits) en drie koppelbits, die zo worden gekozen dat bij het aaneenrijgen der symbolen aan de looplengte-voorwaarden voldaan blijft en de laagfrequent-inhoud zo klein mogelijk wordt.

- *) Dr. J.P.J. Heemskerk, medewerker van Philips' Hoofdividiegroep Audio, Eindhoven, ir. K.A. Schouhamer Immink, medewerker van Philips' Natuurkundig Laboratorium, Eindhoven
- 1) M.G. Carasso, J.B.H. Peek en J.P. Sinjou, Het systeem 'Compact Disc Digital Audio', dit nummer z 267
 - 2) H. Hoeve, J. Timmermans en L.B. Vries, Foutcorrectie en -maskering in het 'Compact Disc'-systeem, Philips techn. T **40**, 282, 1981
 - 3) J.C.J. Finck, H.J.M. van der Laak en J.T. Schrama, Een halfgeleider-laser voor het uitlezen van informatie, Philips techn. T **39**, 97-107, 1980
 - 4) Voor een meer gedetailleerde discussie zie men K.A. Immink, *Modulation systems for digital audio disc with optical readout*, Proc. IEEE Int. Conf. on Acoustics, speech and signal processing, Atlanta 1981, blz 587-589