

Enige kanttekeningen bij digitale audiosystemen

De digitale audio staat eraan te komen. Er zijn al enige vooraankondigingen geweest, maar onenigheid over het systeem lijkt nog een van de grootste struikelblokken te zijn voor commerciële introductie. Er worden ons gouden bergen beloofd, en op het eerste gezicht lijkt dat ook te kloppen. Maar is het wel alles goud wat er blinkt...?

Aan de analoge registratie van signalen, ter wille van de eenvoud beperken we ons in dit artikel tot audio-systemen, kleeft een aantal bezwaren. Dit geldt zowel voor de mechanische (bijv. platen) als magnetische (bijv. bandrecorders) systemen, met elk hun specifieke voor- en nadelen. Iedereen die wel eens een plaat „grijs gedraaid“ heeft zal dit kunnen beamen, evenals iemand die wel eens een band op een luidspreker o.i.d. heeft gelegd.

De grote opkomst van de digitale technieken in de – meer professionele – meettechniek heeft er mede toe geleid deze technieken ook te benutten voor het opslaan, verwerken en reproduceren van audio-signalen. Er liggen nu een aantal voorstellen op tafel die al ten dele voor professionele doeleinden zijn gerealiseerd. Voor we echter de voor- en eventuele nadelen van digitale audio-systemen kunnen begrijpen moeten we ons eerst wat verder verdiepen in de principiële werking van een digitaal audio systeem, wat we verder zullen aanduiden met *DAS*.

PRINCIPE VAN EEN DAS

In figuur 1 is een vereenvoudigd blokschema gegeven van een DAS. Het te registreren geluid (denk bijv. aan een microfoon-signaal) wordt met een klok periodiek bemonsterd en de grootte van de signaalspanning op dat moment wordt omgezet in een getal dat in binaire vorm in een massa-geheugen wordt opgeslagen. Bij weergave wordt de weg terug bewandeld: het getal wordt (niet-destructief) en periodiek (weer bepaald door de klok, die dezelfde frequentie moet hebben als bij opname) uitgelezen en door een digitaal naar analoge omzetter in een spanning omgezet. Deze spanning wordt aan een (vermogens-) versterker aangeboden die daarmee een luidspreker stuurt. Zo wordt dan een geluid voortgebracht dat wordt verondersteld veel gelijkens te vertonen met het oorspronkelijke geluidssignaal dat aan de microfoon werd aangeboden. De aandachtige lezer zit echter ondertussen al met twee vragen, te weten:

- 1) Hoe vaak moet het signaal worden bemonsterd? en
- 2) Met welke fijnheid (oplossend vermogen in amplitude) moet de spanning worden gemeten?

Op deze vragen zullen we later uitgebreid ingaan, maar voor dit moment weten we genoeg om de voordelen van een DAS te begrijpen. Daar de meeste verhalen niet of niet veel verder gaan dan figuur 1 is met een duidelijk waarom maar weinig mensen de nadelen van een DAS beseffen.

VOORDELEN VAN EEN DAS

Door de principiële andere werking van een DAS zijn er een groot aantal voordelen verbonden aan een DAS:

- Doordat uitsluitend nullen en enen hoeven te worden herkend is de storinggevoeligheid aanzienlijk lager dan bij analoge systemen.
- Het signaal kan net zo vaak worden uitgelezen als men wil, zonder nadelige gevolgen voor de kwaliteit. (probeer dat eens met een plaat!)
- Jank behoort geheel tot het verleden. Het in- en uitlezen wordt geregeld door

klokken. Zelfs een zeer eenvoudige heeft al gauw een stabiliteit van 0,0001%.

- Geen rumble, geen armresonanties, geen akoestische terugkoppeling, geen overspringen van groeven, geen warp, en wat er nog meer aan ellende aan platen kleeft.
- Geen kopspiegelresonanties
- De signaal/ruis verhouding kan erg ver worden opgevoerd.

Vooraf voor studio's en meer ambitieuze amateurs zijn de volgende voordelen ook nog van groot belang:

- Het signaal kan net zo vaak als men wil worden gekopieerd, zonder enig verlies van kwaliteit.
- Gelijktijdig van twee of meer opname/weergave systemen is perfect door dezelfde klok te gebruiken.
- Het mengen van twee signalen kan door vooraf ingestelde factoren zeer precies worden gedoseerd.
- De frequentie karakteristiek kan zeer vlak zijn van 0 tot 20 000 Hz.

U ziet, het lijkt allemaal fabelachtig mooi. Maar helaas zitten ook hier weer addertjes onder het gras, waarvan er tenminste één een boa constrictor zal blijken. Maar voor we dat kunnen begrijpen moeten we ons eerst verdiepen in de twee vragen die waren blijven liggen.

HOE VAAK MOET EEN SIGNAAL WORDEN BEMONSTERD?

Deze vraag is uiteraard al eerder gesteld en wel voordat digitale meetsystemen werden ontworpen. Ik ben mij dan ook terdege bewust dat er nu niets nieuws verteld gaat worden, maar helaas is het onderstaande toch nog zo weinig bekend dat ik het hier wil behandelen.

In figuur 2, spoor a, is een sinusvormig signaal getekend dat met een veel (20 x) hogere frequentie wordt bemonsterd. Het zal niemand verbazen dat dit goed gaat. In spoor b en c van deze figuur zijn lagere be-

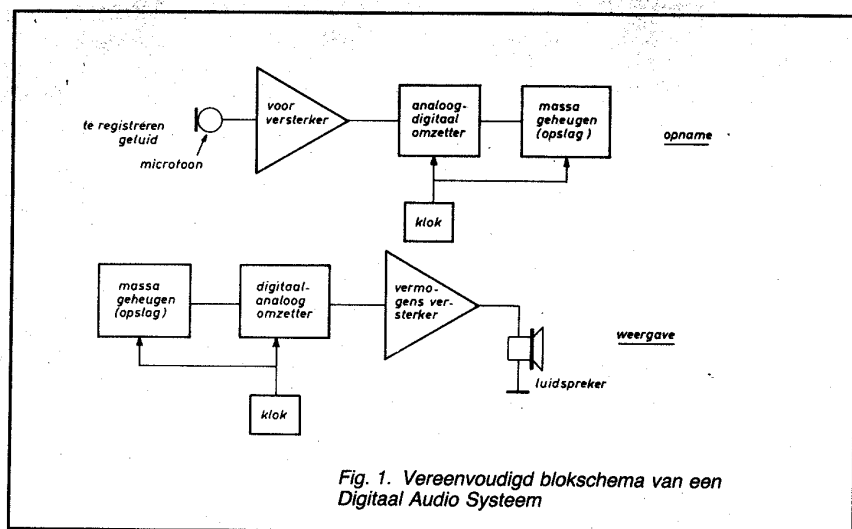


Fig. 1. Vereenvoudigd blokschema van een Digitaal Audio Systeem

monsteringsfrequenties gebruikt, respectievelijk 10 en $5 \times$ de signaalfrequentie. Ook hiervan is nog wel plausibel dat dit voldoende is om het signaal voldoende goed te representeren. Minder gemakkelijk is dat in te zien van spoor d, waar de bemonsteringsfrequentie nog slechts $2,5 \times$ de signaalfrequentie is. Als men echter de ontwikkeling over meerdere perioden volgt, dan blijkt er nog steeds een e nduidig verband te bestaan met het signaal, maar het is duidelijk dat we de grens naderen. De theoretische limiet is $2 \times$ de signaalfrequentie als bemonsteringsfrequentie, en daaruit volgt dat de bemonstering volgens spoor e te gering is. De grote vraag is alleen: wat gebeurt er dan?

Dit wordt duidelijk als we figuur 3 beschouwen. Hierin zijn twee signalen van verschillende frequentie bemonsterd met dezelfde frequentie. Voor het bovenste signaal is de bemonsteringsfrequentie meer dan twee maal de signaalfrequentie, voor het onderste signaal echter niet. En tot onze stomme verbazing zien wij dat beide signalen exact dezelfde monsters opleveren. Na de bemonstering weten we uiteraard niet welk signaal welke monsters heeft opgeleverd en denken we derhalve dat deze van het laagfrequente signaal afkomstig zijn, waardoor het hoogfrequente signaal zich voordoet als een laagfrequent. Daarom heet dit uit de digitale meettechniek beruchte verschijnsel dan ook het alias-effect. Voor hen die het precies willen weten: de schijnbare frequentie ligt evenveel *beneden* de halve bemonsteringsfrequentie als het oorspronkelijke signaal hier *boven* ligt. Dit staat ook wel bekend als het Nyquist sampling theorema. (N.B. In de spectrale voorstelling wordt ook wel gezegd dat het spectrum „omvouw” rond de halve bemonsteringsfrequentie. Zou echter een gedeelte van het spectrum hierdoor bij negatieve frequenties terecht komen dan vouwt dit weer rond de nul, en dit blijft net zo lang doorgaan totdat alles tussen nul en de halve bemonsteringsfrequentie inligt.)

We weten nu dus twee dingen:

- 1) Willen we tot 20 kHz weergeven, dan moet het signaal met tenminste 40 kHz worden bemonsterd, en
- 2) Alias-effecten moeten tot iedere prijs worden vermeden en daarom moet het signaal worden gefilterd opdat geen frequenties boven de halve bemonsteringsfrequentie worden aangeboden. Want het feit dat de menselijke gehoorgrens bij 20 kHz ligt betekent nog niet dat er geen geluiden van hogere frequentie bestaan dan wel door menselijke stemmen en instrumenten zouden kunnen worden opgewekt. Een filter dat deze taak vervult wordt dan ook vaak zeer toepasselijk een anti-alias filter genoemd.

Nu we het toch over filteren hebben: de digitaal naar analoog omzetter geeft een uitgangsspanning die een trapvormig verloop heeft, zoals te zien is in figuur 4. Omdat de „treden” van de „trap” erg hoge frequen-

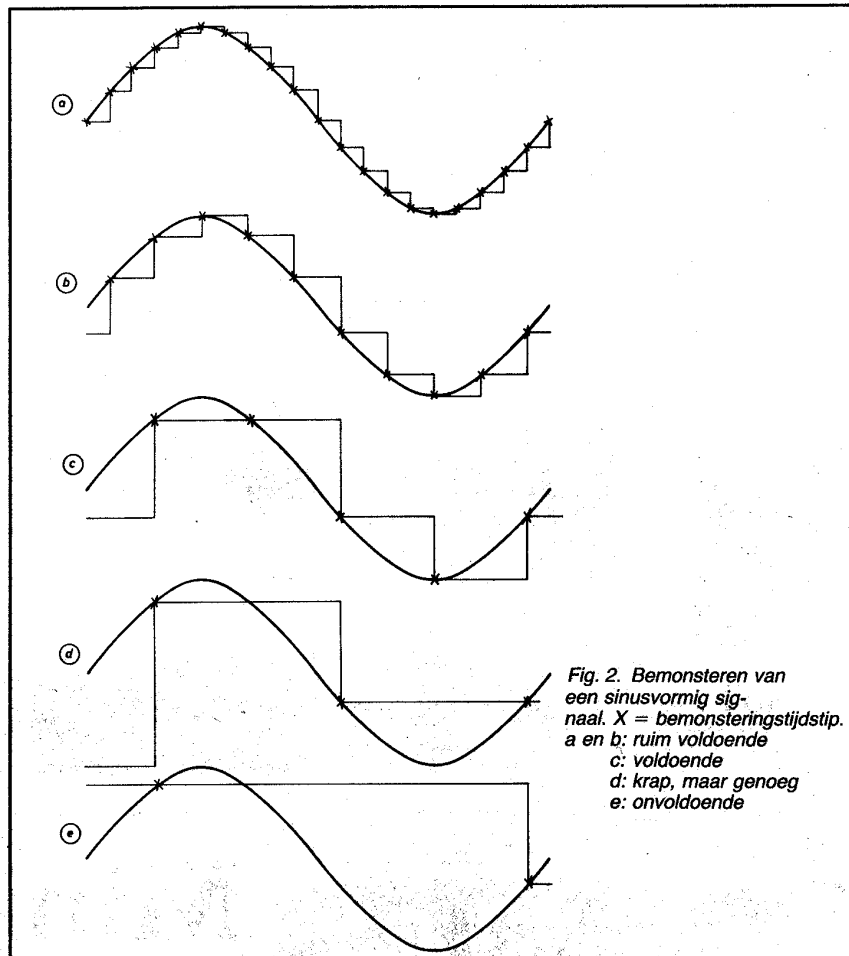


Fig. 2. Bemonsteren van een sinusvormig signaal. X = bemonsteringstijdstip. a en b: ruim voldoende; c: voldoende; d: krap, maar genoeg; e: onvoldoende

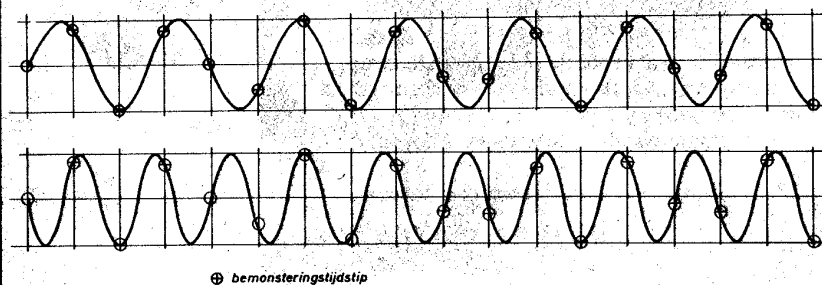


Fig. 3. Het alias-effect. Het hoogfrequente signaal levert exact dezelfde monsters als het laagfrequente signaal. Deze signalen zijn derhalve na de bemonstering ononderscheidbaar.

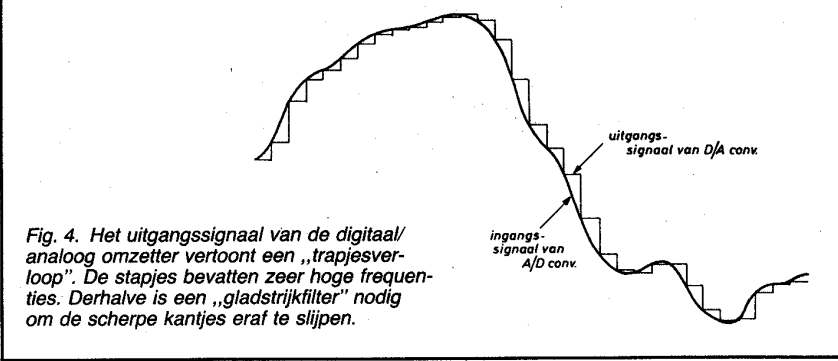


Fig. 4. Het uitgangssignaal van de digitaal/ analoog omzetter vertoont een „trapjesverloop”. De stapjes bevatten zeer hoge frequenties. Derhalve is een „gladstrijfilter” nodig om de scherpe kantjes eraf te slijpen.

ties bevatten zou het direct toevoeren van dit signaal aan de luidspreker voor de tweeter vervelende, zo niet desastreuze gevolgen hebben. Derhalve wordt gewoonlijk tussen de D/A omzetter en de vermogensversterker een „gladstrijk” filter geplaatst, dat er letterlijk en figuurlijk de scherpe kantjes afslijpt.

MET WELKE FIJNHEID MOET DE SPANNING WORDEN GEMETEN?

Omdat de fijnheid het oplossend vermogen bepaalt, voelen we wel aan dat dit begrip in dezelfde hoek zit als signaal-ruis verhouding: een signaaltje „verzuipt” in de ruis of is te klein om nog een bit te veranderen. Er zijn echter wel enige verschillen, maar om de gedachten te bepalen is het een goede leidraad.

Voor een normaal (studio) analogoog audio systeem is de signaal-ruis verhouding ongeveer 70 dB. Dat is een sterkteverhouding tussen ruis en maximaal signaal van 1 : 3000. In digitale systemen werkt men uitsluitend met machten van twee en de eerste die groter is, is $2^{12} = 4096$. Maar er is nog een tekenbit nodig, en vanwege voornoemde detailverschillen iets meer bits, waardoor gewoonlijk 16 (zelf ook weer een macht van twee) bits worden aangehouden voor een DAS.

NADELEN VAN EEN DAS

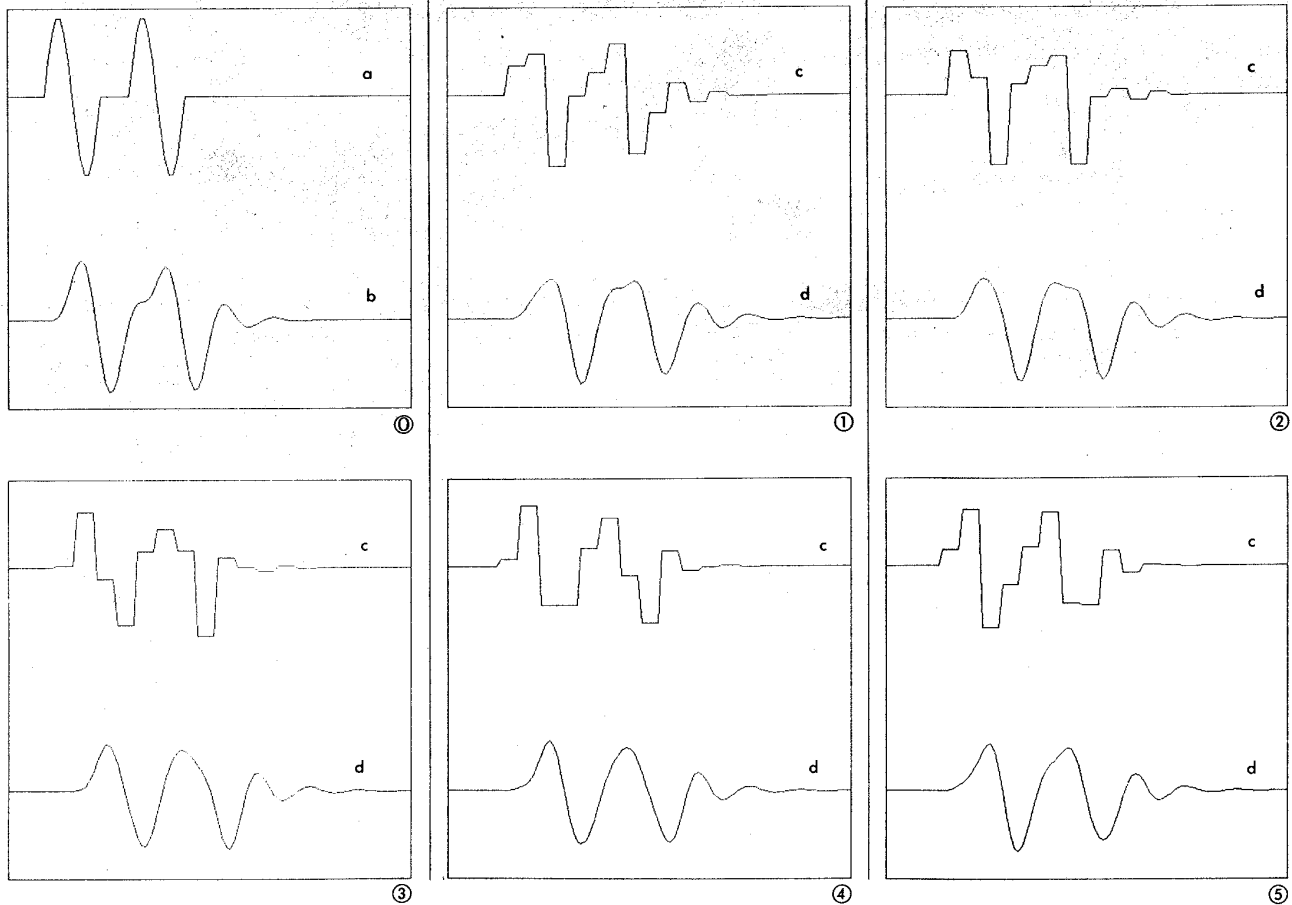
Experts beseffen dat een 16 bit analogoog naar digitaal omzetting in maximaal 25 μ s (i.v.m. de 40 kHz minimale bemonsteringsfrequentie) geen sinecure is. Het is moeilijk om deze tijd met de huidige stand der techniek sterk te reduceren. Mede hierdoor, maar ook om niet te veel bits te moeten wegschrijven, werken zo'n beetje alle voorgestelde systemen met bemonsteringsfrequenties van 44 à 48 kHz. Willen we tot 20 kHz „recht” weergeven en geen alias-effecten krijgen, dan moet echter een waanzinnig steil filter worden toegepast, want de afstand tussen 20 en 22 kHz is slechts 0,14 octaaf! Zelfs een 4^e orde Butterworth filter is op dat stukje nog maar 3,3 dB afgevalen. Zeer steile filters hebben echter één groot nadeel: ze hebben een hoogst beoerde impulsweergave. Meteen rijst dan het bange vermoeden dat het noodzakelijke gebruik van zeer steile anti-alias filters de impulsweergave van een DAS slechts matig zal doen zijn. Om hier een wat betere indruk van te krijgen hebben we een DAS gesimuleerd met de volgende eigenschappen:

- Bemonsteringsfrequentie : 50 kHz (relatief hoog dus)
- Anti-alias filter : 4^e orde Butterworth, kantelpunt 21 kHz
- Gladstrijkfilter : Idem

Voor vijf (verschillende) gevallen staat de responsie van de DAS getekend in figuur 5. Het ingangssignaal is weer ons gemene, al eerder (ref. 1) gebruikte, signaal waarmee niet-periodiek hoog wordt gesimuleerd van bijna 18 kHz. Dit en het uitgangssignaal van het anti-alias filter is voor alle vijf gevallen hetzelfde. Het zal u misschien verbazen dat er over vijf verschillende gevallen wordt gesproken, want het gaat toch maar over één systeem? Dat is wel waar, en van analoge systemen zijn we ook gewend dat ze éénduidig op een signaal reageren, maar bij digitale systemen is dat niet het geval: het uitgangssignaal hangt af van het - toevallige - moment van bemonsteren. (toevallig, omdat de klok vrijloopt t.o.v. het ingangssignaal) Hierdoor is het mogelijk dat een DAS een ander uitgangssignaal geeft hoewel het ingangssignaal hetzelfde was. Deze variabiliteit is een nieuw effect, dat in analoge systemen niet optreedt.

Als we de uitgangssignalen echter vergelijken met het ingangssignaal dan schrikken we wel even. Vooral 5-5 lijkt als twee druppels water op de responsie van een magneto-dynamisch pick-up element in de normale wijze van bedrijf (vgl. fig. 6 van ref. 1)

Fig. 5. Spoor a: ingangssignaal $f = 18$ kHz; spoor b: uitgangssignaal anti-aliasfilter (4^e orde Butterworth); spoor c: bemonsterde signaal (5 gevallen); spoor d: uitgangssignaal DAS (5 gevallen)



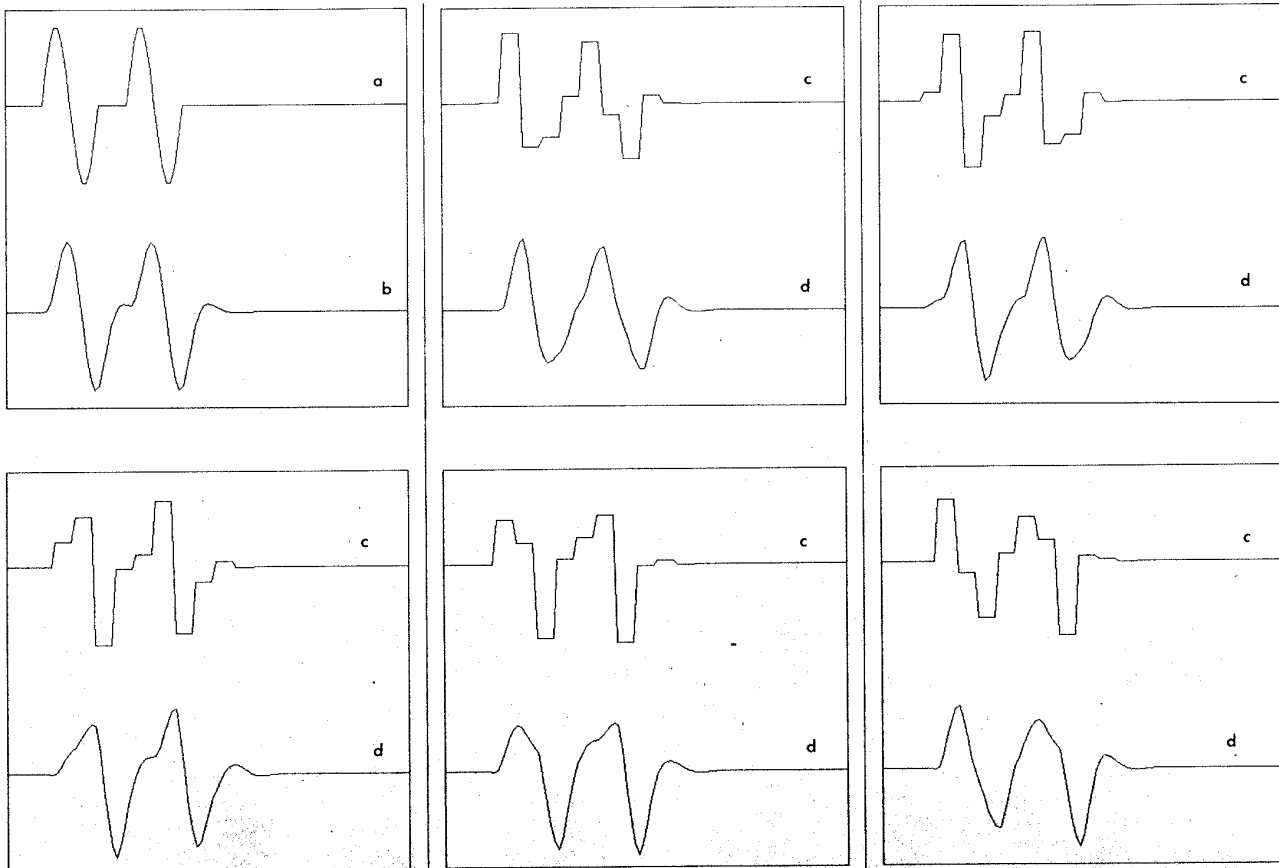


Fig. 6. Spoor a: ingangssignaal $f = 18$ kHz; spoor b: uitgangssignaal anti-aliasfilter (2^o orde LRC); spoor c: bemonsterde signaal (5 gevallen); spoor d: uitgangssignaal DAS (5 gevallen)
Bemonsteringsfrequentie 50 kHz

Gebleken is echter dat deze misvorming bij pick-up elementen hoorbaar is (compensatie ervan levert nl. duidelijk hoorbare verbeteringen op, zie ook ref. 1) en het is dus geen gewaagde veronderstelling dat dit bij DAS-sen ook hoorbaar zal zijn. Netter gezegd: Op grond van deze berekeningen durf ik te voorspellen dat een DAS met een bemonsteringsfrequentie van 44 à 50 kHz gehoormatig in het hoog onder zal doen voor een analoog systeem, uitgerust met of een moving-coil element of een magnetodynamisch element met resonantiecompensatie.

Dit zou allemaal nog niet zo'n bezwaar zijn, ware het niet dat dit een impliciete*) beperking is. Met alle kritiek – die ik ook heb – op de eigenlijk aftandse analoge registratie blijft echter een feit dat analoge systemen geen impliciete beperking hebben voor hun hoog-registratie. U kunt tegenwerpen dat er in de simulatie een aantal aannames, zo u wilt vrijheden zitten zoals de keu-

*) Met impliciet bedoel ik een eigenschap van het systeem die onontkoombaar is en dus niet te verbeteren door nieuwe technieken. Een DAS heeft als impliciete beperking dat hij nooit frequenties hoger dan de halve bemonsteringsfrequentie weer kan geven.

ze van het anti-alias en gladstrijkfiter, die het resultaat beïnvloeden. Maar daar breng ik twee argumenten tegen in:

- Om „moeilijke” signalen zoals ons test-signaal weer te geven moet je nu eenmaal een frequentiebereik hebben dat ver doorloopt. De omhullende is van groot belang voor de herkenbaarheid en natuurgetrouwheid van een geluid. Dit is al eerder aan de orde geweest (ref. 1 en 2) en is bij de bouwers van synthesizers al jaren bekend (ref. 3) Voorts kan dit worden gestaafd door het feit dat platen, die op halve snelheid zijn gesneden vanaf de originele mastertape en die derhalve een uitgebreid frequentiebereik in het hoog hebben natuurgetrouwer klinken, vooral in percussie. Een ander leuk voorbeeld is het toepassen van de mechanische resonantie compensatie op een element dat – gemeten – resonanceert op ruim 28 kHz, zoals een collega van mij heeft gedaan. Ook dit levert nog een gehoormatige verbetering van het geluid op.

- Toepassen van een minder steil filter met een betere pulsweergave leidt tot het optreden van de gevreesde alias-effecten. Hierdoor wordt het signaal wel sterker maar niet beter, en de variabiliteit van het uitgangssignaal door de willekeurige relatie tussen het ingangssignaal en het bemonsteringssignaal wordt groter. Dit is geïllustreerd in figuur 6. Hier is een 2^o orde LRC filter toegepast met een maximale opslingering van 0,8 dB en eveneens een kantelfrequentie van 21 kHz. Dit wijst erop

dat een ander filter slechts een ander soort ellende betekent.

EXPERIMENTELE RESULTATEN

Hoewel voor de gewone consument de digitale systemen nog niet beschikbaar zijn, opereren voor professionele toepassingen al op beperkte schaal digitale systemen. Het eindresultaat is nu echter nog een analoge plaat, maar verder zijn alle voordelen van digitale verwerking aanwezig. Er zijn enige van deze platen aangeschaft, maar ze klinken echter alles behalve briljant. Ze kunnen de vergelijking met de „Half-Speed Master” niet doorstaan, en eerlijkheidshalve moet ik opmerken dat de betrekkelijk slechte ervaringen met deze platen aanleiding is geweest om DAS-sen eens wat grondiger te bestuderen, wat tot de bovenstaande resultaten heeft geleid.

MOGELIJKHEDEN TOT VERBETERING

Het probleem schuilt in de betrekkelijk lage bemonsteringsfrequentie en de enige mogelijkheid die ik zie om bovenstaande nadelen het hoofd te bieden is opvoering van de bemonsteringsfrequentie tot 80 à 100 kHz. Dit is haalbaar, zeker als het aantal bits wat wordt gereduceerd. Hoewel dit in meer detail bestudeerd zou moeten worden lijkt mij dit mogelijk door het signaal iets slimmer te registreren, zoals hoog-op-

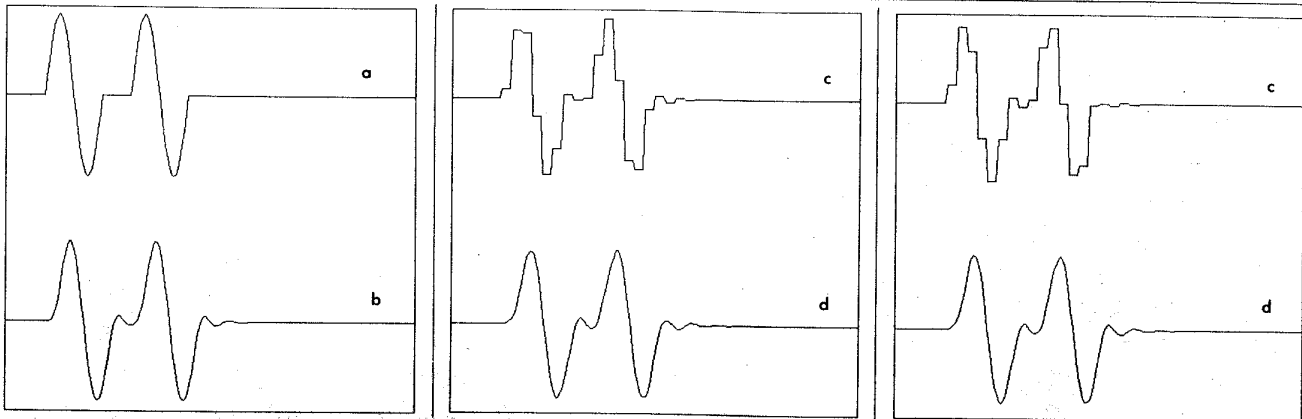


Fig. 7. Als fig. 5, echter bemonsteringsfrequentie 100 kHz, twee gevallen.

haal bij opname en/of eenvoudige compandersystemen blijven gebruiken. Het aantal bits zou dan kunnen worden gereduceerd tot 12 à 14. Een berekening voor een bemonsteringsfrequentie van 100 kHz levert het resultaat van figuur 7. Het behoeft weinig betoog dat dit er hoopvoller uitziet dan de resultaten, verkregen in figuren 5 en 6.

CONCLUSIES

De betrekkelijk lage bemonsteringsfrequenties die in de voorgestelde Digitale Audio Systemen worden gebruikt maken het gebruik van zeer steile filters, die een goede pulsweergave in de weg staan, vooral in het hoog, noodzakelijk. Gehoormatig zullen zij in het hoog dan naar alle waarschijnlijkheid onder doen voor de betere analoge audio-systemen die nu op de markt zijn. Simulatie leverde resultaten op die vergelijkbaar zijn met resultaten verkregen voor magneto-dynamische elementen in de normale wijze van bedrijf. De hoorbaarheid hiervan in het laatste geval betekent hoorbaarheid in het geval van een DAS. Dit is voorlopig bevestigd door de magere resultaten verkregen met digitaal verwerkte platen.

Wat het gehoormatige effect zal zijn van de variabiliteit van het uitgangssignaal door de willekeurige relatie tussen het ingangssignaal en het bemonsteringssignaal is op dit moment nog niet duidelijk, daar het hier een nieuw verschijnsel betreft. Op grond van deze gegevens kan niet anders worden geconcludeerd dan dat een bemonsteringsfrequentie van 80 à 100 kHz noodzakelijk zal zijn voor natuurgetrouwe weergave. Technisch is dit in principe te realiseren.

SLOTOPMERKING

Het is niet mijn bedoeling met dit artikel de DAS de das om te doen, doch om een discussie op gang te brengen om te voorkomen dat we worden opgescheept met een systeem dat een impliciete beperking heeft voor de pulsweergave in het hoog en dat,

als het eenmaal gestandaardiseerd is voor lange tijd een sta-in-de-weg zal zijn voor natuurgetrouwe weergave.

Referenties:

- 1) H. R. E. van Maanen, „Compensatie van mechani-

sche resonantie bij pick-up elementen”, Radio Elektronica 1979 no 15/16 en 17.

2) H. R. E. van Maanen, „Actieve scheidingsfilters voor HiFi-systemen”, Radio Elektronica 1979 no 21.

3) E. Feremans, „Synthesizers zelf bouwen en bespelen”, Radio Elektronica 1979 no 20.

Commentaar op artikel „Enige kanttekeningen bij digitale audiosystemen” ...

Digitale audiosystemen lijken een grote toekomst tegemoet te gaan. Dit kan de bezoeker van HiFi-shows vaststellen, evenals de lezer van vaktijdschriften. De op vernieuwing beluste audio industrie zal daarbij zeker niet de laatste zijn om dit van torens en daken te schreeuwen. Digitale audio is op dit moment nog zeker geen gemeengoed voor de consument en staat eigenlijk nog geheel in de kinderschoenen. Kinderen kunnen evenwel snel groeien en dus... Het is voor de niet-ingewijde geïnteresseerde luisteraar of technicus bepaald niet eenvoudig, zich het fenomeen digitale audio eigen te maken. Dit blijkt ook uit kritische reacties, die de laatste tijd in diverse vaktijdschriften opkomen. (Zie ook „van de redactietafel” van Hein ten Bosch, in Stereo-beeld-Test van april 1981).

H. R. E. van Maanen doet in dit nummer een poging, om via een theoretische en experimentele benadering de beperkingen van digitale audiosystemen aan te geven. Dit is juist, als het gaat om begrip te krijgen voor wat digitale audio is en hoe het tot stand komt. Het gaat evenwel voorbij aan hetgene, dat momenteel technisch bereikbaar is en waaraan o.a. door NV Philips wordt gewerkt, t.b.v. het Compact Disc Digitale Audio Systeem.

Bekijken we enige karakteristieken van dat systeem, dan zien we:
 Frequentiebereik: 20 Hz...20 kHz
 Bemonsteringsfrequentie: 44,1 kHz
 Signaal-ruisverhouding: > 90 dB
 (overeenkomend met een digitale bemonstering uitgedrukt in 16 bits)

Aan de opnamezijde worden de volgende eisen gesteld aan het zogenaamde anti-Alias filter:
 Doorlaatband: 0...20 kHz, ± 0,1 dB
 Damping boven 24 kHz: > 100 dB

Een vierde orde Butterworth-filter is hiervoor niet zeer realistisch te noemen. Daarentegen is de gewenste filterkarakteristiek wel bereikbaar met een dertiende orde elliptisch filter.

Aan de weergavezijde is voor het zogenaamde gladstrijkfiter een bereikbare specificatie:

Doorlaatband: 0...20 kHz, ± 0,2 dB

Damping boven 24 kHz: > 50 dB

Dit filter is realiseerbaar als zevende orde elliptisch filter.

Een eigenschap van Butterworth én elliptische filters is, dat zij een groepslooptijd karakteristiek hebben, die boven de 10 kHz verre van vlak is en die een slechte pulsweergave veroorzaakt, zoals terecht door H. R. E. van Maanen opgemerkt. Conventionele analoge filters falen onvermijdelijk in digitale audio systemen.

De filters, die in het ideale geval nodig zijn voor digitale audio systemen, hebben de bovengeschreven amplitudekarakteristiek gecombineerd met een perfect vlakke groepslooptijd karakteristiek. De klasse filters, waarmee dit gerealiseerd kan worden, staan bekend onder de naam transversale filters. Op analoge wijze kunnen deze filters gerealiseerd worden met emmerjesgeheugens. De signaal-ruisverhouding hiervan is echter voorlopig nog veel te slecht. Er kunnen evenwel ook reeds digitale transversale filters gemaakt worden, met alle gewenste eigenschappen.

Het anti-Alias-filter kan naar het digitale domein worden verschoven, door te bemonsteren met een hoge frequentie (bijv. 176,4 kHz), gevolgd door een transversaal, laagdoorlaat-filter met zeer scherpe filtereigenschappen en een bemonsteringsfrequentieverlaging naar 44,1 kHz. Natuurlijk is voor de bemonstering met 176,4 kHz ook een anti-Alias-filter nodig. Dit kan echter

gemakkelijk geconstrueerd worden, met behoud van een vlakke groepslooptijd tot 20 kHz.

Voor het gladstrijkfiter kan dezelfde weg in omgekeerde richting worden bewandeld: eerst een bemonsteringsfrequentietransformatie van 44,1 naar 176,4 kHz, gevolgd door een transversaal laag-doorlaafilter, digitaal-analoog omzetting en een simpel analoogfilter met lineaire fase tot 20 kHz.

De beschreven techniek van overbemonsteren en digitale, transversale filters, lost de problemen van impulsvervorming op. Van signalen met spectrumcomponenten boven 20 kHz zal uiteraard alleen maar het deel tot 20 kHz weergegeven worden. In de nabije toekomst zal de beschreven techniek bij digitale audiosystemen algemeen in gebruik komen, zowel in studio, als in consumentenapparatuur.

Het door H. R. E. van Maanen gevonden effect van de variabele uitgangsgolfvorm bij een constante ingangsgolfvorm, wordt veroorzaakt door het niet voldoen aan de anti-Alias-eisen van het gebruikte vierde orde Butterworth-filter.

Het spectrum van de beschreven toon-burst strekt zich ver uit boven de 25 kHz (halve bemonsteringsfrequentie). Om Alias-effecten te vermijden, moet een veel scherper filter gebruikt worden. Als een effectief anti-Alias-filter wordt toegepast, is het waargenomen effect van variabele uitgangsspanning niet meer aanwezig.

Gaan digitale audiosystemen dan toch een gouden toekomst tegemoet...? Als het aan ons ligt, zeker!

A. A. M. Gall/J. J. Mons

(A. A. M. Gall en J. J. Mons zijn resp. als product manager en ontwikkelaar in het Compact Disc Digital Audio Project bij de NV Philips' Gloeilampenfabrieken in Eindhoven werkzaam).

... en de reactie van de heer Van Maanen

Het valt mij op dat nergens in dit commentaar expliciet staat, maar wel het gehele stuk door wordt aangenomen dat frequenties boven de 20 kHz van nul en gener waarde zouden zijn voor de natuurgetrouwheid van gereproduceerd geluid. Ik ben het hier mee oneens en betreur dat de heren Gall en Mons de door mij aangedragen argumenten volkomen negeren. Echter, ons gehoor is een niet-lineair element en heeft daardoor de mogelijkheid tot detectie. Hierdoor wordt, behalve het geluid zelf ook de omhullende waargenomen en komen spectrale componenten die bo-

ven de gehoorgrens liggen beneden deze grens terecht. (Het verschijnsel analoog aan detectie van AM radiosignalen). Derhalve is het instandhouden van de omhullende van wezenlijk belang voor een natuurgetrouwe weergave van geluid. Alle experimenten die ik in de afgelopen jaren heb gedaan wijzen sterk in die richting, en ik heb tot op heden nog geen resultaten verkregen die hiermee strijdig waren.

In mijn artikel betoog ik dat verschillende soorten

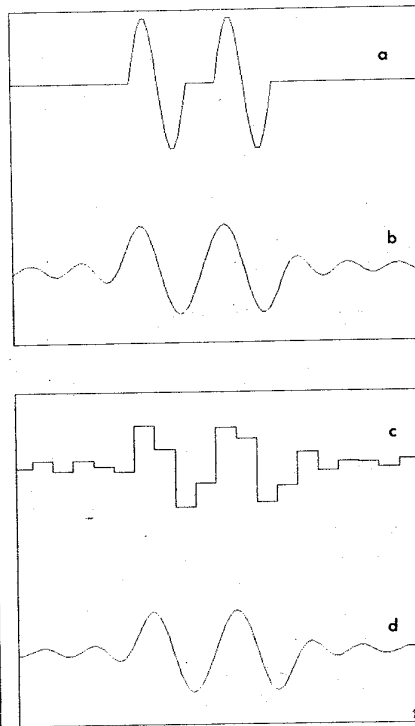
Fig. 1. Responsie van een digitaal audio-systeem, bemonsterd met 50 kHz. Zowel anti-alias, als gladstrijkfiter is „perfect” filter (zie ook tekst).

Spoor a. Ingangssignaal

Spoor b. Uitgangssignaal anti-aliasfilter

Spoor c. Bemonsterde signaal

spoor d. Uitgangssignaal gladstrijkfiter



filters een verschillende soort ellende inhouden. Dat het gebruik van 13e orde (!) filters gehoormatig af te raden is, zijn ook beide heren met mij eens, maar of het gebruik van transversale filters het ideale antwoord is waag ik in twijfel te trekken: weliswaar hebben deze filters zeer fraaie amplitude- en fasekarakteristieken, maar in tijd-domein hebben ze de — op het eerste gezicht onmogelijke — eigenschap om eerder signaal af te geven dan er signaal in is gegaan. (Door het gebruik van geheugens die het totale signaal vertragen is dit in de praktijk te verzevenlijken). Dat allerlei aanzetten e.d. (denk aan slagwerk) hierdoor worden aangetast behoeft weinig betoog.

Om echter dit voor iedereen duidelijk te maken heb ik de responsieberekeningen nogmaals herhaald met een „perfect” filter:
 Responsie = 0...20 kHz ± 0 dB.
 Fasedraaiing = 0° 0...∞ Hz.
 Verzwakking boven 20 kHz ∞ dB.
 De resultaten staan in fig. 1.

We zien inderdaad dat er signaal wordt geleverd vóór het eigenlijke signaal arriveert en dat de scherpe kanten van onze tone-burst er weer zijn afgeslepen: het is nu helemaal een tone-burst van een lagere frequentie geworden. Van het tweede effect is bij analoge systemen gebleken dat zij duidelijk hoorbare verschillen opleveren. Ik twijfel er niet aan dat zij ook bij digitale systemen hoorbaar zullen zijn. Wat het eerste effect betreft: ik heb nog nooit een transversaal filter gehoord, maar deze resultaten overziende heb ik mijn twijfels...

Doorrekenen met dit „perfecte” filter levert inderdaad als resultaat dat de variabiliteit in de uitgangsgolfvorm verdwijnt mits dit filter zowel als anti-alias als gladstrijkfiter wordt gebruikt. Daar deze (nog) niet bestaat vond ik het verstandig om op het bestaan van dit effect te wijzen bij gebruik van „normale” analoge filters. Tot slot wil ik opmerken dat het mij bevreemdt dat met zeer hoge bemonsteringsfrequenties wordt gewerkt (bijna 180 kHz) om daarna de informatie sterk te reduceren (en dus informatie te vernietigen). Mijn berekeningen, zoals vermeld in mijn artikel, bewijzen dat door het niet of minder drastisch reduceren van de informatie gehoormatig een beter resultaat kan worden bereikt. Ik daag de heren dan ook uit om de proef op de som te nemen. De opslag van een grotere hoeveelheid gegevens hoeft, lijkt mij, geen probleem op te leveren. Als op een schijfje van 11 à 12 cm op één kant een uur muziek kan worden gezet mag dit geen probleem geven.

H. R. E. van Maanen