

# Kwantiseringsruis bij digitale audiosystemen

## Computersimulatie toont toeneming door steile filters

*Digitale audiosystemen blijken onder bepaalde omstandigheden een hoorbare hoeveelheid ruis te produceren, die op het eerste gezicht onverklaarbaar is. Simulatie van een digitaal audiosysteem op een computer heeft als resultaat opgeleverd dat deze ruis wordt veroorzaakt door interactie tussen de amplitudekwantisering en de toegepaste filtering. Onder de simulatiecondities kwam de kwantiseringsruis hierdoor bijna 20 dB hoger te liggen dan het theoretische niveau. Het gebruik van tijdgeoptimaliseerde filters, gecombineerd met een hogere bemonsteringsfrequentie, kan een aanzienlijke verbetering opleveren van de effectieve dynamiek zonder dat het aantal bits per monster zou hoeven worden vergroot.*

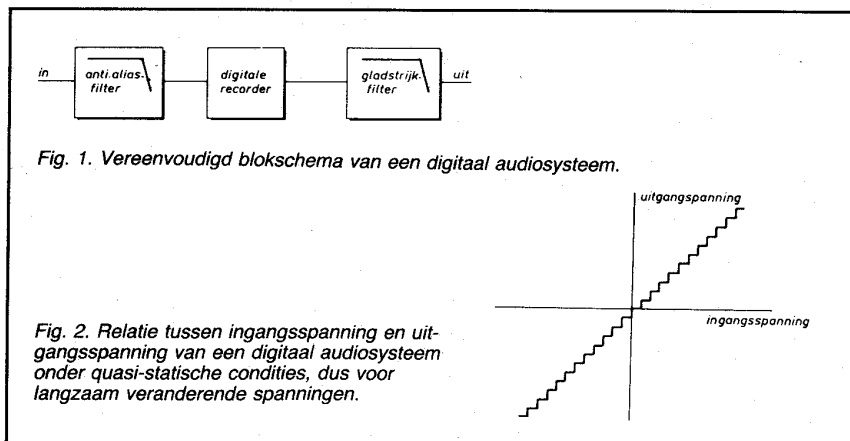
De opbouw van digitale audiosystemen is al eerder in deze kolommen ter sprake gebracht [1]. We zullen ons derhalve nu beperken tot enige algemene essenties. Uit de opbouw zoals geschetst in fig. 1, blijkt dat het ingangssignaal eerst een laagdoorlatend zgn. *anti-alias-filter* doorloopt. Hierna wordt het periodiek bemonsterd (d.w.z. de amplitude wordt bepaald op het moment van bemonsteren). Deze gemeten waarde – die een bepaalde nauwkeurigheid heeft, gewoonlijk uitgedrukt in het aantal gebruikte bits – wordt dan in een geheugen opgeslagen. In de praktijk gebeurt dit met een frequentie van 44,1 tot 48 kHz. Bij weergave vindt een periodieke uitlezing van het geheugen plaats, waaruit een bitstroom resulteert die wordt omgezet in een spanning, evenredig met de opgeslagen waarde. Via een uitgangsfiler dat dient om de stapjes „glad te strijken” wordt het (analoge) uitgangssignaal verkregen.

Bij een digitaal audiosysteem (DAS) vindt dus een discretisering plaats zowel in tijd als in amplitude. Beide veroorzaken tussen

het ingangs- en het uitgangssignaal verschillen die karakteristiek zijn voor digitale audiosystemen en die hun analoge tegenhangers niet hebben. Hierdoor is er betrekkelijk weinig ervaring met deze vervormingen en de hoorbare effecten daarvan, die dan ook veelal drastisch worden onderschat. De dramatische invloed van de tijdkwantisering op de impulsweergave hebben we in een eerder artikel al eens uitgebreid bediscussieerd [1]; ditmaal willen we de amplitude-kwantisering en de wederzijdse beïnvloeding van tijd- en amplitudekwantisering bestuderen.

### EFFECTEN VAN AMPLITUDEKWANTISERING

De amplitudekwantisering geeft aanleiding tot een niet-lineaire relatie tussen ingangs- en uitgangssignaal. Dit is geïllustreerd in fig. 2. Deze relatie heeft de vorm van een trap, waarvan de stapgrootte wordt bepaald door de resolutie van het systeem. Zo is bij een gebied van ±10 V en 16-bit resolutie de stapgrootte ruim 0,3 mV.



Zoals alle niet-lineaire overdrachtskarakteristieken, geeft ook deze aanleiding tot vervorming. Het eenvoudigst kan men zich dat voorstellen aan de hand van een zwak, sinusvormig ingangssignaal (met in ons geval een amplitude van ongeveer 0,6 mV): het uitgangssignaal is dan een blokvolg. Hieraan zien we ook een tweede, nogal onplezierige, eigenschap van een DAS, en wel dat de vervorming toeneemt met afnemende signaalsterkte, zoals is geïllustreerd in fig. 3.

Daarnaast treedt nog een ander verschijnsel op. Stel dat de amplitude van ons ingangssignaal 1,5 maal de stapgrootte bedraagt. In dat geval blijft het uitgangssignaal een blokvolg met een amplitude van 1 maal de stapgrootte. Deze afwijking staat bekend als *kwantiseringsruis*, die we verder in dit artikel zullen aanduiden als *Q-ruis*. In analogie met de klassieke registratiesystemen zullen we de volgende definitie van Q-ruis hanteren:

$$U_{uit} = U_{in} + \text{ruis (analoog)} \quad (1)$$

$$U_{uit} = U_{in} + Q\text{-ruis (digitaal)} \quad (2)$$

Met nadruk zij erop gewezen dat deze analogie wel bruikbaar is, maar een volkomen verschillende achtergrond heeft: in het analoge systeem wordt ruis bepaald door *stochastische* (willekeurig optredende) verschijnselen zoals thermische ruis, in digitale systemen daarentegen door *systematische* effecten. Nu blijkt de tweede soort tot vervelendere hoorbare effecten te leiden dan de eerste. Daarom poogt men wel om door kunstgrepen, zoals het toevoegen van stochastische ruis, de Q-ruis een wat willekeuriger karakter te geven om daarmee de gehoorindruk te verbeteren [2]. In het digitale jargon heet dat het toepassen van „dither”. We zullen definitie (2)

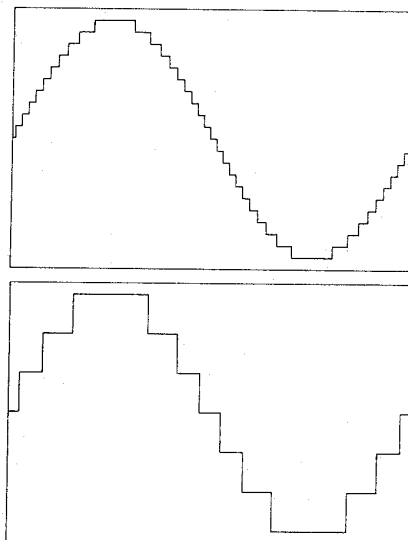


Fig. 3. Toenemende vervorming bij afnemende signaalsterkte: de bovenste sinus is 3x sterker dan de onderste. Het verschil in vervorming is evident. Om de verschillen duidelijker te laten uitkomen is de schaal van de onderste sinus met een factor 3 vergroot.

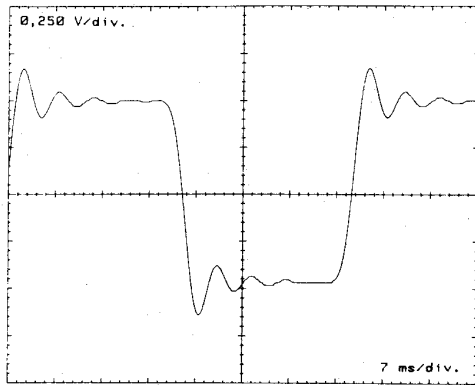


Fig. 4. Voorbeeld van doorschot van een steil filter.

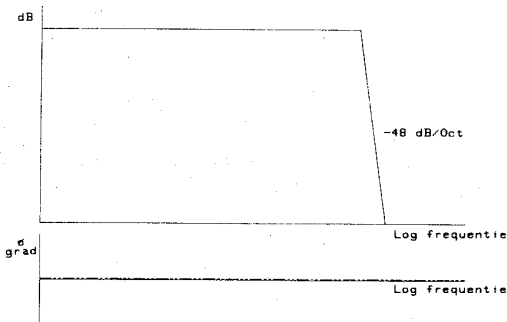


Fig. 6. Bode-diagram van de voor simulatie toegepaste filters.

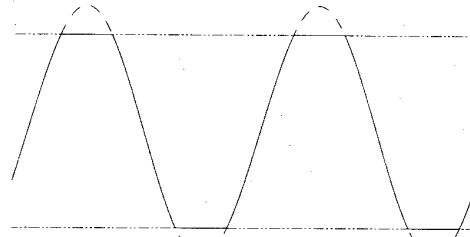


Fig. 5. Als het ingangssignaal de uitstuurruimte van het systeem overschrijdt, ontstaat het zogenaamde „hard clipping”. De streeplijn is in deze figuur het ingangssignaal; de streep-stip-lijn geeft de uitstuurgrenzen van het systeem aan; de getrokken lijn is het verkregen uitgangssignaal.

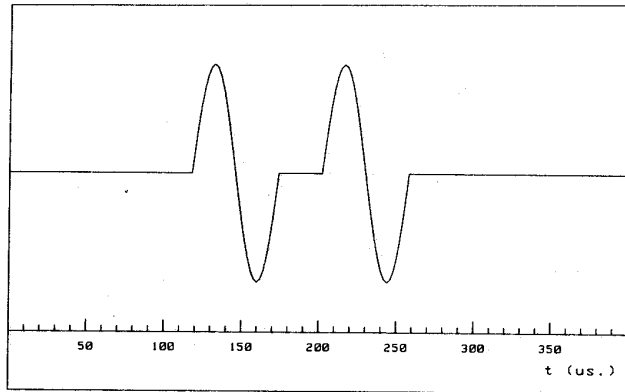


Fig. 7. Dubbelsinus-salvo, gebruikt als „moeilijk” ingangssignaal voor blootleggen van fouten van systemen.

toch gebruiken om de door amplitudekwantisering veroorzaakte bijgeluiden te beschrijven. Merk overigens op dat er door deze definitie geen volledige scheiding is tussen ruis en vervorming.

**DYNAMIEK VAN EEN DAS**

Alvorens we de dynamiek (in effectieve zin althans) van een DAS kunnen berekenen, moeten we weten hoever we kunnen gaan zowel aan de bovenkant (maximaal signaal) als aan de onderkant van de voor het analoge signaal beschikbare uitstuurruimte. Dat dit niet zo eenvoudig is als het lijkt, moge blijken uit het volgende voorbeeld.

Stel dat we een blokgolf van 1 kHz willen opnemen. Ook als de amplitude hiervan nauwkeurig bekend is, lukt het toch niet om dit ongeschonden te registreren tenzij het opneemniveau 20% lager wordt ingesteld dan theoretisch nodig is. Dit komt doordat het (steile) anti-alias-filter vooraan in de keten een doorschot vertoont van ca. 18%, zoals is te zien in fig. 4. Willen we dus geen „clipping” krijgen, moet het niveau naar beneden [3].

Een DAS „clipt hard”. Dat wil zeggen dat bij oversturing het signaal recht wordt afgesneden (zie fig. 5). De hiermee gepaard gaande niet-lineaire vervorming veroorzaakt zeer storende hoorbare effecten, zoals we die kennen van overstuurde te-

rugggekoppelde versterkers. Daarom moet bij een DAS het opneemniveau „veiliger” worden ingesteld dan bij een „soft clipping” analog registratiesysteem. Bovendien verhoogt het genoemde doorschot-effect het risico van clipping. Het is dus verstandig om het maximale niveau ca. 5 dB lager te kiezen dan bij een analog systeem.

Aan de „onderkant” is de vraag nog moeilijker, omdat daar aspecten meespelen die subjectief zijn: wat is de vervorming die men acceptabel acht en wat is de Q-ruisbijdrage? Bij dit laatste komt ook de vraag om de hoek kijken in hoeverre de Q-ruis „maskeerbaar” is, dat wil zeggen door de muziek kan worden weggedrukt. Om in dit soort vragen een beter inzicht te krijgen, is het nodig om dit probleem eerst beter te analyseren. Hiervoor staan twee wegen open: meten aan een werkelijk digitaal audiosysteem of computersimulatie.

**COMPUTERSIMULATIE VAN EEN DAS**

Omdat meten aan een DAS een kostbare zaak is en het moeilijk, zo niet onmogelijk is om verschillende effecten te scheiden (denk aan brom, ruis uit de analoge gedeelten, niet-lineariteit van de A/D- en D/A-omzetters) is gekozen voor een computersimulatie van een DAS. De voordelen van deze werkwijze zijn legio: ieder willekeurig systeem is in principe te realiseren, het is

goedkoop, effecten kunnen stuk voor stuk worden bestudeerd enz. Er zijn echter ook nadelen aan verbonden: Alles moet vanaf „papier” worden geïnterpreteerd, horen is er niet bij en de gemaakte keuzen blijven altijd aanvechtbaar, hoe goed deze ook mogen zijn [1]. Desondanks hebben we voor deze aanpak gekozen, gezien de potentiële mogelijkheden ervan.

– Specificaties van het simulatiemodel

De moeilijkste keuze die men moet maken bij een computersimulatie is wel die van de anti-alias- en gladstrijk-filters [1]. Gekozen is voor fasezuivere 8e-orde-filters, die perfect glad zijn tot 20 kHz en daarna met 48 dB/octaaf afvallen. De fasedraaiing is voor alle frequenties nul graden. Fig. 6 geeft het Bode-diagram van deze filters weer.

De bemonsteringsfrequentie is gekozen op 50 kHz, wat nog iets hoger is dan de professionele bemonsteringsfrequentie van 48 kHz en duidelijk beter dan de 44,1 kHz die is vastgelegd voor het Compact Disc-systeem.

Voor de amplituderesolutie kiezen we 5 bit (1 : 32), niet omdat dit realistisch is, maar omdat we de effecten aan de „onderkant” willen bestuderen en om de effecten van Q-ruis duidelijk te laten uitkomen.

Als ingangssignaal hebben we weer de reeds in [1] beschreven dubbele sinus van stal gehaald, waarmee we de gedragingen

van het systeem zullen bestuderen; dit signaal is weergegeven in fig. 7. In tabel 1 zijn de specificaties van het gesimuleerde DAS kort samengevat.

**- SIMULATIEPROCEDURE**

De simulatieprocedure verloopt nu als volgt: hetingangssignaal wordt door hetingangfilter gestuurd, waarna het uitgangssignaal van dat filter twee verschillende wegen bewandelt. De eerste voert rechtstreeks naar het uitgangfilter, de tweede voert via een tijd- en amplitudekwantiseringsstap naar het uitgangfilter. Vervolgens wordt de responsie van het uitgangfilter op de beide signalen berekend; het verschil ertussen is de Q-ruis. Een en ander is geïllustreerd in fig. 8.

De berekening van de responsie van de filters verloopt door middel van een Fouriertransformatie uit het frequentie-naar het tijddomein, gevolgd door een inverse transformatie naar het frequentiedomein. Een op zichzelf bewerkelijke methode [1] die echter uitstekende resultaten oplevert. Op deze wijze verkrijgen we dus inzicht in de vervormingen die ontstaan door de amplitudekwantisering bij zwakke signalen.

**RESULTATEN VAN DE SIMULATIE.**

Fig. 9 toont de resultaten van de berekening als functie van de tijd. Spoor A is het uitgangssignaal in het ideale geval, dus zonder kwantisering. Spoor B is het uitgangssignaal in het niet-ideale geval, dus met kwantisering. Op het eerste gezicht lijken de verschillen marginaal, maar spoor C geeft het verschil, de Q-ruis dus, weer, zij het met een factor 10 vergroot. Wat opvalt is dat de Q-ruis zich over een veel groter gedeelte van de tijd uitstrekt dan hetingangssignaal. Dit is te wijten aan het gebruik van steile filters, die zich in het tijddomein langdurig manifesteren. Dit duidt erop dat de spectrale samenstelling wel eens sterk zou kunnen afwijken van die van het ideale uitgangssignaal.

Om dit te kunnen analyseren is van zowel het „ideale” als het „niet-ideale” uitgangs-

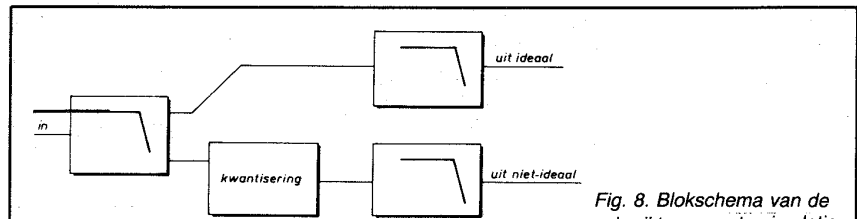


Fig. 8. Blokschema van de gebruikte computersimulatie.

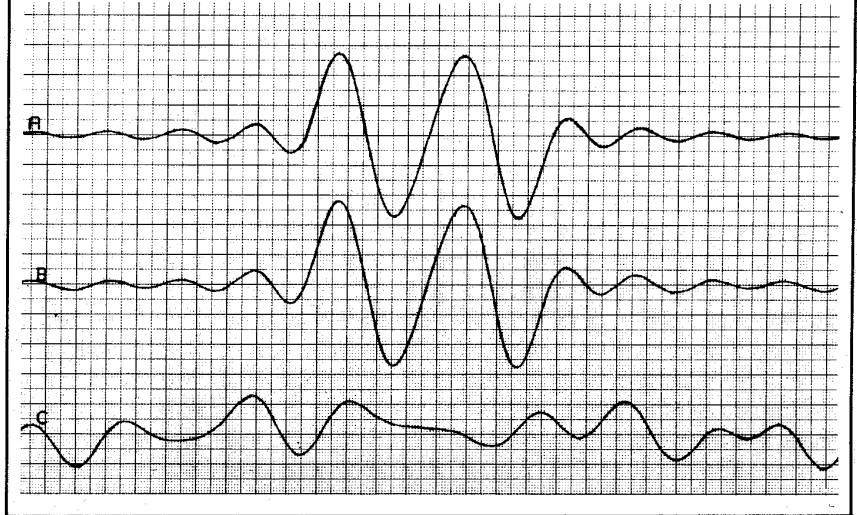


Fig. 9. Resultaat van computersimulatie. Spoor A stelt het uitgangssignaal voor in het ideale geval, spoor B het uitgangssignaal in het niet-ideale geval. Spoor C representeert de Q-ruis, ofwel het verschil tussen A en B (10x vergroot)

signaal en de Q-ruis het spectrum bepaald. De resultaten van deze berekening zijn afgebeeld in respectievelijk de figuren 10, 11 en 12. Ook hier is de schaal van de Q-ruis een factor 10 groter dan van de uitgangssignalen. Vergelijking tussen fig. 10 en 11 leert ons dat er vervormingen in het spectrum zijn opgetreden; het niet-ideale spectrum heeft een meer „bultig” karakter gekregen. Het spectrum van de Q-ruis heeft wat weg van een berglandschap als de Dolomieten: het vertoont een enorme hoeveelheid bergen en dalen. Wat echter ook opvalt is dat de spectrale samenstelling in-

derdaad sterk verschilt van die van het ideale uitgangssignaal. Vooral de laagfrequente piek bij ongeveer 1,5 kHz is hier een grote boosdoener. Deze kan absoluut niet worden gemaskeerd door het signaal zelf.

Een ander opvallend aspect is de tamelijk grote amplitude van het spectrum. Dit duidt erop dat de Q-ruis sterker is dan het niveau dat volgt uit de resolutie van de A/D-omzetter (veelal 16 bit). Om dit meer kwantitatief te bepalen, hebben we de berekening herhaald zonder filtering. Het spectrum van de

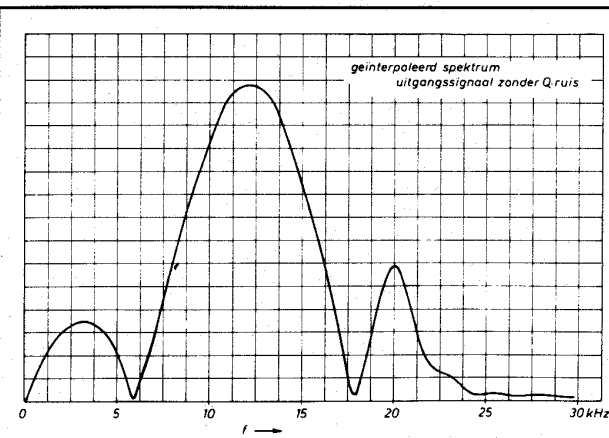


Fig. 10. Geïnterpoleerd spectrum van uitgangssignaal A in fig. 9.

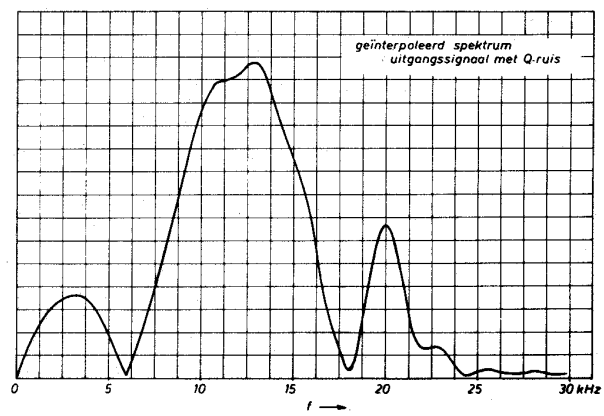


Fig. 11. Geïnterpoleerd spectrum van uitgangssignaal B in fig. 9.

Q-ruis die in dat geval ontstaat, is afgebeeld in fig. 13. Het verschil met fig. 12 is overduidelijk. Om een indruk te krijgen van de verschillen hebben we het spectrum geïntegreerd van 0 tot 20 kHz (om de hoorbare ruis te bepalen) en dan blijkt dat met filtering het Q-ruisniveau 18,9 dB hoger ligt dan zonder filtering! Hieruit volgt dat de dynamiek van een DAS voor niet-continue signalen significant lager is dan voor continue signalen, de met afnemende amplitude toenemende vervorming nog daargelaten.

**PRAKTISCHE ERVARINGEN**

De gegeven analyse is een voortvloeisel uit een luisterproef die enige tijd geleden heeft plaatsgevonden. Men demonstreerde de Q-ruis door de resolutie stelselmatig te reduceren, beginnend bij 16 bit. Hierbij bleek dat een amplituderisolutie van 12 bit al een onaanvaardbaar geluid oplevert, hoewel dit op grond van de resolutie altijd nog een theoretische dynamiek van 72 dB zou moeten hebben. Dit hoorbaar optreden van Q-ruis verbaasde de auteur destijds zeer, maar uit deze analyse blijkt duidelijk dat er wel degelijk slecht maskeerbare Q-ruis van relatief sterk niveau kan optreden in digitale audiosystemen. Wat erg tot tevredenheid stemt, is dat de laagfrequente ruis, die duidelijk hoorbaar was, ook uit de simulatie te voorschijn komt.

**RELATIVERENDE OPMERKINGEN**

Hoewel deze computersimulatie een vruchtbare aanpak is gebleken van het probleem van de Q-ruis, moet nu niet direct iedereen veronderstellen dat de dynamiek van een digitaal audiosysteem 19 dB slechter is dan wordt gespecificeerd. Dit getal is reëel onder de gegeven condities, maar hoewel ons testsignaal erg behulpzaam is bij het verkrijgen van inzicht in de gebeurtenissen in een DAS, is het daarmee nog geen realistisch muzieksignaal. Wat echter wel blijkt is dat discontinue signalen problemen geven. Hoeveel de signaal/ruis-ver-

bemonsterings frequentie	filters	amplitude- resolutie
50 kHz	recht tot 20 kHz 8e orde vanaf 20 kHz fasedraaiing voor alle frequenties 0°	5 bit (1 : 32)

Tabel 1. Specificaties van het gesimuleerde digitale audiosysteem.

houding van een DAS verslechtert onder realistische condities, is op dit moment nog niet duidelijk. Een feit is echter wel dat deze verhouding slechter is dan is opgegeven voor continue signalen.

**CONCLUSIES**

De dynamiek van een DAS blijkt sterk te worden beïnvloed door een wederzijdse wisselwerking tussen de - steile - anti-alias- en gladstrijk-filtering en de amplitudekwantisering. Dit is een dermate complex gebeuren dat niet zonder meer kan worden overzien. De computer is een krachtig hulpmiddel gebleken bij het bestuderen van deze effecten, maar is niet in staat om een antwoord te geven op de vraag in hoeverre de dynamiek van een DAS terugloopt onder realistische condities. De hier gevonden waarde van 19 dB lijkt ons meer een bovengrens dan een ondergrens, maar een schatting van 10 dB is waarschijnlijk verre van onrealistisch, gezien de praktische ervaringen.

In hoeverre de gunstig gekozen bemonsteringsfrequentie van 50 kHz hierop nog van invloed kan zijn, is niet onderzocht. We kunnen slechts stellen dat hoe lager de bemonsteringsfrequentie is, des te steiler de filtering moet zijn en derhalve zal de interactie met de amplitudekwantisering ongunstiger worden. Gecombineerd met de

ruimte die aan de bovenkant nodig is om clippen te vermijden, zou dit wel eens kunnen betekenen dat de effectieve dynamiek van een DAS niet beter is dan die van een goed analogo systeem, waarbij de luisteraar de kwantiseringruis van een DAS wel eens als ongunstiger zou kunnen ervaren.

De wet van behoud van ellende treedt ook hier weer in werking: het bezuinigen op het totaal aantal bits door met een zo laag-mogelijke bemonsteringsfrequentie te werken, wreekt zich door een toeneming van de Q-ruis ten gevolge van voornoemde interactie. Het gebruik van hogere bemonsteringsfrequenties, gekoppeld aan het gebruik van minder steile filters, geeft een betere effectieve dynamiek zonder dat het aantal bits per monster hoeft te worden opgevoerd.

De verbeterde impulsweergave is een tweede argument om dit te doen. In [1] kwam destijds al aan de orde dat de zeer steile filtering vervelende effecten tot gevolg heeft, die vergelijkbaar zijn met de gedragingen van magneto-dynamische pickup-elementen. Hierdoor is de impulsweergave beduidend slechter dan met huidige analoge systemen mogelijk is. Er zouden dus twee vliegen in één klap kunnen worden geslagen.

Op grond van dit soort resultaten verwacht de auteur dat er binnen tien jaar een tweede generatie digitale audiosystemen op de stoep zal staan.

**Literatuur:**

- [1] H. R. E. van Maanen: „Enige kanttekeningen bij Digitale Audiosystemen”, Elektronica 81/17, p. 49 ... 59.
- [2] J. Vanderkooy, S. P. Lipshitz: „Resolution below the Least Significant Bit in Digital Systems with Dither”, Journal of the Audio Engineering Society 32/3, p. 106 ... 114, maart 1984.
- [3] J. Meyer: „Time correction of Anti-Aliasing Filters used in Digital Audio Systems”, Journal of the Audio Engineering Society 32/3, p. 132 ... 138, maart 1984.

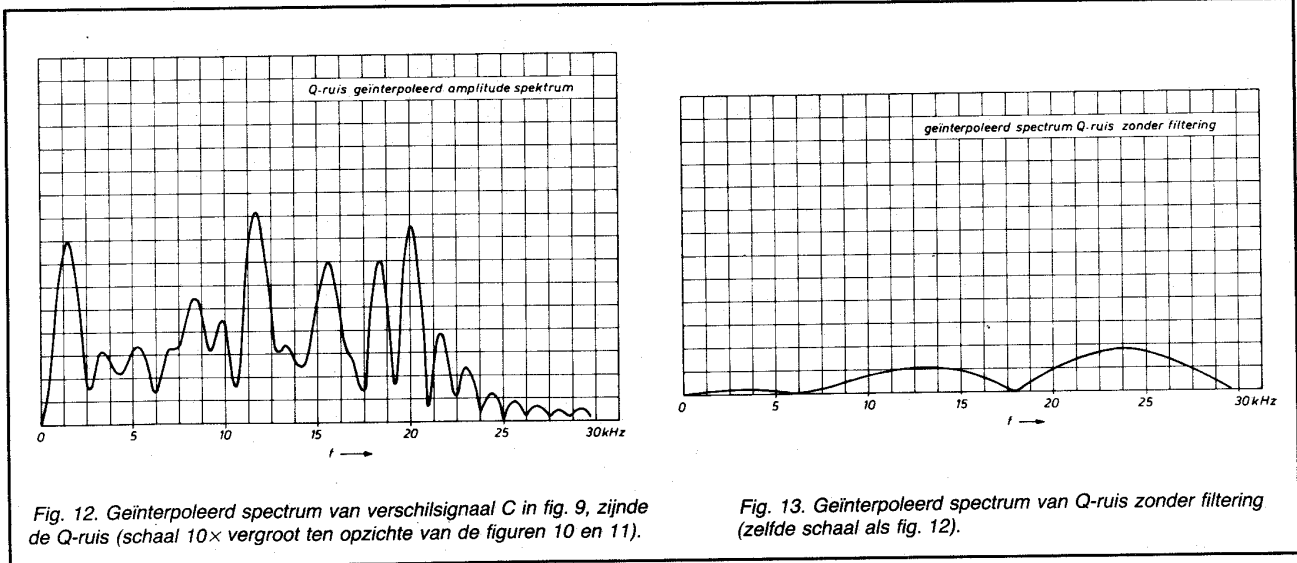


Fig. 12. Geïnterpoleerd spectrum van verschilsignaal C in fig. 9, zijnde de Q-ruis (schaal 10x vergroot ten opzichte van de figuren 10 en 11).

Fig. 13. Geïnterpoleerd spectrum van Q-ruis zonder filtering (zelfde schaal als fig. 12).