

In deze artikelenreeks staat het streven naar werkelijkheidsweergave centraal. Een van de middelen die men daartoe gebruikt is tegenkoppeling. Wat dat is en hoe het werkt wordt uitgelegd.

Tegenkoppeling van de werkelijkheidsweergave?

Deel 1: vóór tegenkoppeling

ir. Menno van der Veen

In dit deel worden vooral de positieve effecten van tegenkoppeling toegelicht. Stromingen waarbij men zegt dat tegenkoppeling uit den boze is worden ook onderzocht (deel 2). Daarnaast is het van belang of er objectieve meetmethodes bestaan om te toetsen of een apparaat aan het criterium van werkelijkheidsweergave voldoet, wat dat ook zijn moge (deel 3). Deze studies proberen elektronische principes, objectieve en subjectieve waarderingsmaten aan elkaar te koppelen.

Het is bekend en ook logisch dat iedere fabrikant van hifi-apparatuur streeft naar werkelijkheidsweergave. De versterkers die gebouwd worden moeten perfect zijn, er schitterend uitzien en ook nog fantastisch klinken. Mede dankzij datareductie (DCC en MD en DAB) staan de uitgangspunten van de werkelijkheidsweergave stevig ter discussie. Immers datareductie tast de muzieksignalen stevig aan terwijl werkelijkheidsweergave uitgaat van het standpunt dat er niets met de oorspronkelijke signaal mag gebeuren. Voor velen is dat aanging om zich extra te bezinnen op wat goede geluidskwaliteit eigenlijk is. Slaat men de goede weg in, wordt van de juiste filosofie gebruik gemaakt? Men is dus aan het nadenken en dat is ook de bedoeling van deze artikelen. Daarbij staat in dit deel de methode van "tegenkoppeling" centraal en er wordt nu onderzocht of het wel zo geweldig is als iedereen beweert.

Principe

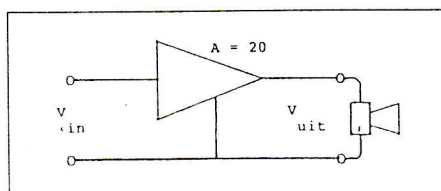
Laten we in eerste instantie spreken over eindversterkers, dat maakt het eenvoudig. De theorie is echter net zo goed van toepassing op voorversterkers. Bij een eindversterker heb je te maken met een ingang en een uitgang. Op de ingang (links) wordt bijvoorbeeld een CD-speler aangesloten en op de uitgang rechts zit de luidspreker. Figuur 1 geeft deze algemene aansluiting aan. De CD-speler geeft bijvoorbeeld maximaal 2 Volt muziekspanning af. Dat is te weinig om de luidspreker rechtstreeks aan te drijven. Vandaar dat er een eindversterker gebruikt wordt en die levert

bijvoorbeeld een versterking van 20 keer. Hierdoor krijgt de luidspreker dus maximaal $2 \times 20 = 40$ Volt op zijn dak. Dat is bij een luidspreker van 8 Ohm identiek aan een vermogen van $40 \cdot 40 / 8 = 200$ Watt.

Iedereen voelt aan dat dit enorm veel is. Toch sluit men in de praktijk CD-spelers rechtstreeks op eindversterkers aan. Gelukkig zit er dan meestal nog een volumeregelaar tussen die er voor zorgt dat je niet de kamer uitgeblazen wordt. We spreken in dit geval overigens over spanningsversterking want de ingangspanning wordt 20 keer versterkt aan de uitgang geleverd.

Gaan we echter het inwendige in de elektronica van de versterker controleren, dan blijkt de versterking helemaal geen 20 keer te zijn, maar vele malen meer. Bijvoorbeeld 100.000 keer. Er gebeurt in de eindversterker dus iets vreemds. Een overmaat van versterking wordt op de een of andere slimme manier teruggebracht tot dat versterkingsgetal dat we nodig hebben. De schakeling die daar voor zorgt is de tegenkoppeling. Conclusie 1: tegenkoppeling werkt een overmaat aan versterking weg en reduceert de versterking tot de gewenste grootte.

Fig. 1 Algemene weergave van een eindversterker.



Open-lus en effectief

In figuur 2 staat schematisch aangegeven hoe een versterker met tegenkoppeling er uit ziet. De versterker heeft nu twee ingangen: een positieve en een negatieve. De negatieve ingang zit inwendig in de elektronica. Van buiten af is die niet bereikbaar. Tevens zitten er twee weerstanden in (R_1 en R_2) die voor de tegenkoppeling zorgen. De versterking van de spanning TUSSEN de plus- en min-ingang is meestal enorm groot en die versterking wordt gegeven door "Ao". Daarmee wordt de "open-lus" versterking bedoeld en die kan wel 100.000 keer bedragen. Door de weerstanden R_1 en R_2 wordt een deel -b- (formule 1) van de luidsprekerspanning teruggevoerd naar de min-ingang en daar vergeleken met de muziekspanning van de CD-speler op de plus-ingang. Dit vergelijk wordt gerealiseerd door de twee genoemde spanningen van elkaar af te trekken.

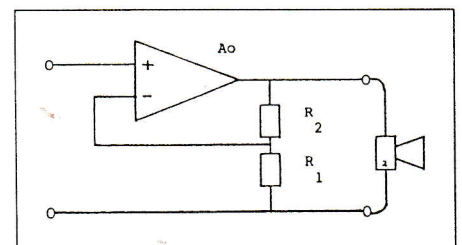


Fig. 2 Eindversterker met tegenkoppeling.

$$b = \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

De versterker gaat in principe dus bezig met twee signalen. Het CD-signaal dat hij moet versterken en het deel -b- van het luidsprekersignaal. Rekentechnisch valt nu aan te tonen dat door deze schakelwijze de versterking teruggebracht wordt tot een veel lager getal: namelijk de "effectieve" of "gesloten-lus" versterking "Ac". Zie form. 2. Laat ik dit met een rekenvoorbeeld verduidelijken: stel $R_1 = 1k$ en $R_2 = 19k$ en

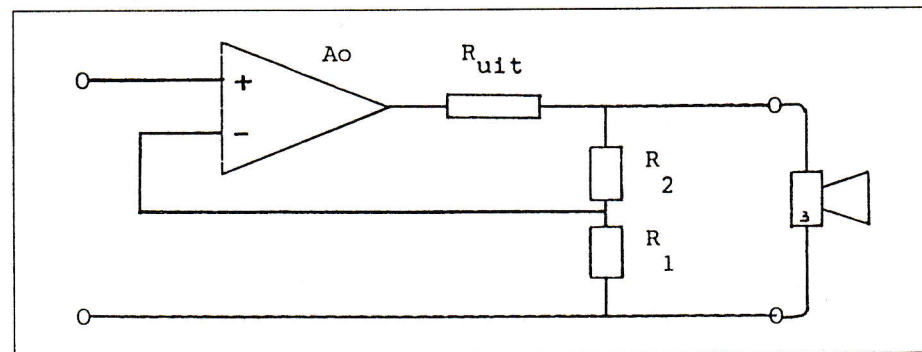
$A_o=100.000$. Invullen in formules 1 en 2 levert nu op dat A_c gelijk wordt aan 20. Maar voor het geval dat iemand nog wat doorrekent, zal hij/zij ontdekken dat als A_o gelijk gekozen wordt aan 10.000 of 1000, er nog steeds een effectieve versterking van 20 overblijft. Dit leidt dan tot het volgende belangrijke resultaat. Conclusie 2: de gewenste versterking kan met eenvoudige weerstanden ingesteld worden en wordt bij voldoende grote A_o door die weerstanden bepaald.

$$A_c = \frac{A_o}{1+b \cdot A_o} = \frac{V_{uit}}{V_{in}} \quad 2$$

Gevolg voor dempingsfactor

Iedere versterker heeft aan zijn uitgang een zekere restweerstand. Die is storend omdat daardoor de basluidspreker niet voldoende in zijn eigenbeweging wordt geremd. Hier zit een heel verhaal achter dat ik nu weglaat, maar de essentie is dat een lage restweerstand zorgt voor een beheerste beweging van de conus van de woofer. Tevens is de luidsprekerfabrikant bij het ontwerpen van zijn filters uitgegaan van een versterker met kleine restweerstand. Past men een versterker met hoge restweerstand toe, dan verandert door de afwezigheid van demping niet alleen de basweergave maar ook de GEHELE frequentie karakteristiek (meetbewijzen volgen in deel 2). Om een maat voor de restweerstand te maken heeft men de grootte "dempingsfactor" bedacht. Die bedraagt 8 gedeeld door de restweerstand van de versterker. Een voorbeeld: stel een versterker zonder tegenkoppeling heeft aan zijn uitgang een restweerstand R_{uit} van 2 Ohm; dan is de dempingsfactor $8/2=4$ (zie fig. 3). Door tegenkoppeling wordt echter R_{uit} drastisch verlaagd tot R_{eff} (zie figuur 4 en formules 3 en 4). Een rekenvoorbeeld laat de immense gevolgen voor de dempingsfactor zien: $A_o=100.000$; $R_1=1k$; $R_2=19k$; $R_{uit}=2$ Ohm. Dit levert dan op: $R_{eff}=0,0004$ Ohm en $DF=20004$. In dit verband is het zinvol om een uitspraak terug te halen die door mij

Fig. 3 Eindversterker met uitgangswaerstand.



$$R_{eff} = \frac{R_{uit}}{1+b \cdot A_o} \quad 3$$

$$DF = \frac{8}{R_{uit}} \cdot (1+b \cdot A_o) \quad 4$$

gedaan is tijdens de muziekdagen van Multifoon in de Doelen in Rotterdam. Daar zei ik: "als je bezwaar hebt tegen tegenkoppeling en je wilt toch een extreem hoge dempingsfactor, dan wil je iets dat strijdig is in zichzelf". Immers: hoge tegenkoppeling levert een hoge dempingsfactor. Lage of geen tegenkoppeling levert een lage dempingsfactor op. Conclusie 3: tegenkoppeling zorgt voor een hoge dempingsfactor.

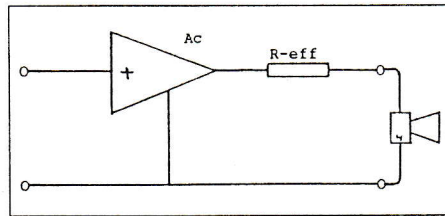
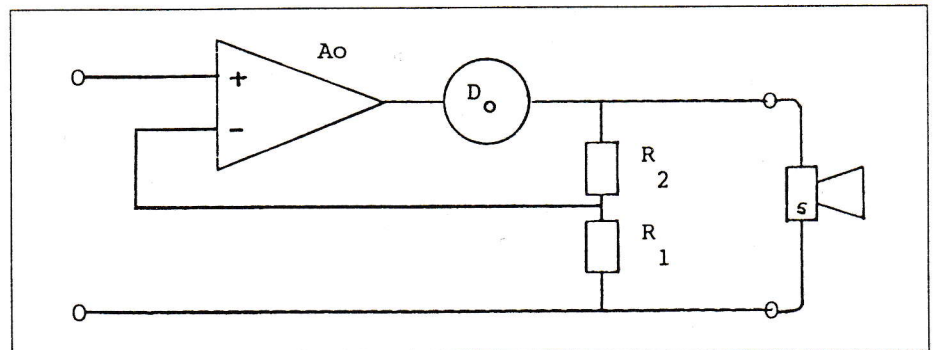


Fig. 4 Effect van tegenkoppeling op uitgangswaerstand.

Gevolg voor vervorming

Een versterker die vervormt is een onding. Ik doe hier helemaal geen uitspraken over welke vervorming hoorbaar is of niet en hoeveel vervorming wel of niet opvalt. Sinds wij bezig zijn met DCC, MD en DAB leren we langzamer-

Fig. 5 Alle vervorming teruggebracht tot een enkelvoudige uitgangsvervorming D_o .



hand te accepteren dat sommige vervormingen door maskering niet of nauwelijks opvallen. Het verschijnsel vervorming is dus ook weer een heel verhaal op zich, dat ik hier niet verder bespreek. Ik wil de nadruk leggen op wat tegenkoppeling met vervorming doet. In elke deeltrap van de versterker treedt iets vervorming op. In verband met deze theorie is het echter zinvol om die deelvervormingen allemaal samen te voegen tot een totaalvervorming D_o die aan de uitgang van de versterker staat.

Stel nu dat een versterker zonder tegenkoppeling een THD (Total Harmonic Distorsion) heeft van $D_o=10\%$, dan laten figuur en formule 5 zien hoe de tegenkoppeling de vervorming wegwerkt. Bij $A_o=100.000$; $R_1=1k$ en $R_2=19k$ neemt de vervorming nu af tot $D_{eff}=0,002\%$. Dat is een opvallend resultaat: hoge tegenkoppeling zorgt voor extreem lage vervormingscijfers. Dit resultaat is al lang bekend. Bij veel versterkers tref je die lage vervormingscijfers aan en alleen daar aan kun je al zien dat er veel tegenkoppeling is toegepast. Conclusie 4: tegenkoppeling verlaagt de harmonische vervorming.

$$D_{eff} = \frac{D_o}{1+b \cdot A_o} \quad 5$$

Gevolg voor frequentiebereik

De meeste versterkers halen zonder tegenkoppeling gemakkelijk een frequentiebereik van 20.000 Hz. Gaat men dan vervolgens ook nog tegenkoppelen, dan wordt het frequentiebereik extreem veel groter. Maar hier zit een adder onder het gras. Veel tegenkop-

pelen kan er voor zorgen dat de versterker instabiel wordt en meer gaat werken als een zender en oscillator. Die situatie is ongewenst en daarom brengen de meeste fabrikanten het frequentiebereik zonder tegenkoppeling (open-lus bandbreedte) terug tot ongeveer 5kHz. In figuur 6 staat nu grafisch aangegeven wat er met het frequentiebereik van een versterker gebeurt als tegenkoppeling wordt toegepast. Gerekend is met $A_o=100.000$ (bovenste lijn); $R_1=1k$; $R_2=19k$ en $f_o=5kHz$ (-3dB be-

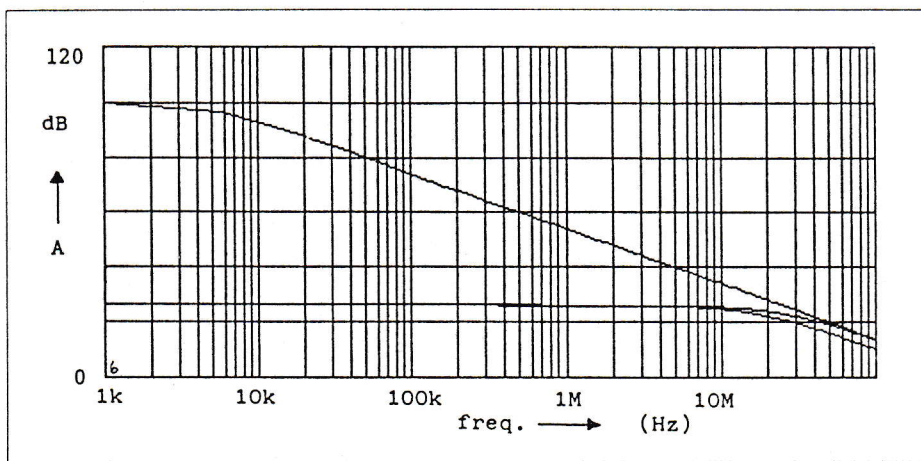


Fig. 6 Effect van tegenkoppeling op het frequentiebereik.
 De bovenste kromme is van de open-lus versterker.
 De middelste van een tegengekoppelde versterker zonder luidspreker.
 De onderste geldt voor de versterker met aangesloten luidspreker.

reik zonder tegenkoppeling). Zie ook formule 6. Duidelijk wordt nu zichtbaar (onderste kromme) dat het frequentiebereik toeneemt tot 25 MHz !! Zoveel bandbreedte is ook weer ongewenst en bij dat grote bereik komen ook weer andere problemen om de hoek kijken. Ik noem bijvoorbeeld het feit dat hier gerekend is aan een hoogafval van 6dB/okt. De meeste versterkers kunnen dat maar over een beperkt frequentiegebied handhaven en bij hogere frequenties gaat het al spoedig over in 12 of 18dB/okt. In dat geval levert de hier berekende tegenkoppeling fikse instabiliteit op. Daarom gaat geen enkele fabrikant zo ver. Maar ondertussen is het principe wel duidelijk. Conclusie 5: tegenkoppeling doet het frequentiebereik drastisch toenemen.

$$6 \quad f_{-3,eff} = f_o \cdot (1 + b \cdot A_o)$$

Alles koek en ei?

Wie het artikel tot hier toe doorgelezen heeft, kan niets anders dan concluderen dat tegenkoppeling fantastisch is. Immers de versterking is eenvoudig instelbaar, de dempingsfactor is hoog, de vervorming is laag en het frequentiebereik is ook nog heel groot. Wat wil je nog meer bij een goede versterker. De cijfers zijn schitterend en indrukwekkend. Maar hoe komt het dan dat sommige zwaar tegengekoppelde versterkers toch zo slecht kunnen klinken? Ik heb exemplaren in de vingers gehad die het goed deden, maar ook types met een totaal dichtgeslagen, vlak en onrustig geluidsbeeld. Zeggen die fantastische cijfers dan niks? Hoe meer versterkers ik test (*), des te meer ik ge-

neigd ben om dat te zeggen. Het lijkt er op alsof die getalletjes niet onder woorden brengen wat we horen. Ondanks dat zal ik nog steeds doorgaan met het verrichten van metingen bij mijn testen.

De cijfertjes vertellen namelijk wel of: a) de fabrikant weet waar hij het over heeft (zijn deskundigheid), b) of de versterker stabiel is onder de gekst denkbare belastingen en omstandigheden (zijn betrouwbaarheid). Dat zijn criteria die voor een uiteindelijk oordeel van wezenlijk belang zijn. Want de gebruiker moet er immers op kunnen vertrouwen dat hij/zij een goed apparaat heeft gekocht.

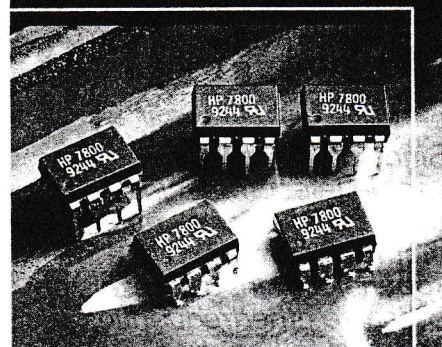
De test moet dus de fabriekpunten a) en b) helder in het daglicht stellen. Daarna komen de andere criteria aan bod die iets vertellen over het geluidsbeeld, de diepteweergave, de betrokkenheid, mijpart "het ritme" en andere subjectieve criteria. De fabrikant moet dus ook getest worden op: c) zijn muzikale inbreng en zijn rekening houden met de eigenschappen van het gehoor en de perceptie.

Vervolg

De vraag is nu: bezit tegenkoppeling alleen maar voordelen, of zijn er ook nadelen aan verbonden? Ook kan men de vraag stellen of tegenkoppeling eigenlijk wel iets met goede geluidskwaliteit heeft te maken. Immers een slecht geluid kan door een heel andere oorzaak of verschijnsel zijn ontstaan. In deel 2 gaan we dieper op deze vragen in en wordt vooral gekeken naar neven-effecten van tegenkoppeling, naar fouten en goede redeneringen over de gevolgen daarvan en naar objectieve meetmethodes om versterkers te evalueren.

Tot volgende maand in deel-2 dat heet: "Tegen Tegenkoppeling ?".

We are the champions...



Bijv. de kleinste scheidingsversterker ter wereld!

De kwaliteit en betrouwbaarheid van de componenten van Hewlett-Packard zijn bijna legendarisch.

En als een van de grootste optoelektronische producenten ter wereld zijn wij alle anderen steeds een stap voor.

Vraag naar de HCPL-7800, de kleinste scheidingsversterker tegen een zeer voordelige prijs!

Componenten van Hewlett-Packard zijn uitsluitend officieel verkrijgbaar bij:



België: Zaventem Tel. 02-7209936
 Nederland: Maarssenbroek Tel. 03465-62353



Elektronische Componenten

(*): zie de beoordelingsartikelen in HomeStudio

Vorige maand publiceerde RB Elektronica het eerste deel van een beschouwing over tegenkoppeling. De voordelen daarvan werden genoemd. Het artikel sloot af met de vraag of tegenkoppeling wel zo ideaal is als iedereen denkt (of niet denkt).

Tegenkoppeling van de werkelijkheidsweergave?

Deel 2 : tegen tegenkoppeling?

ir. Menno van der Veen

Het novemnummer van RB Elektronica besteedde aandacht aan tegenkoppeling. In dit eerste deel stond de beschouwing over tegenkoppeling met de voordelen van het gebruik van tegenkoppeling. Het artikel sloot af met de vraag of tegenkoppeling wel zo ideaal is als iedereen denkt (of niet denkt). In dit tweede deel worden de nadelen van tegenkoppeling onderzocht. Onder andere leidt dat tot de conclusie dat hoge dempingsfactoren absoluut niet noodzakelijk zijn. Moderne trends in de versterkertechniek, zowel bij de goedkopere versterkers als bij de duurste high-end, worden bekeken met het oog op hun benadering van tegenkoppeling. Dit alles leidt tot een aantal conclusies waaruit blijkt dat "alles niet zo schoon is als het op het eerste gezicht lijkt".

Voordat we dieper in deze materie duiken is het zinvol om kort te herhalen wat de positieve effecten van tegenkoppeling bij versterkers zijn. In de eerste plaats kan men met eenvoudige weerstanden iedere versterking instellen die men wenst. Daarnaast heeft een tegengekoppelde versterker een hoge dempingsfactor en dat is goed voor een 'droge' basweergave en een frequentie-karakteristiek zoals de luidsprekerfabrikant bedoeld heeft. Ook is de vervorming tot extreem lage waardes terug te brengen. Tot slot bereikt men met tegenkoppeling een groot frequentiebereik dat het hoorbereik verre overtreft. Dit zijn allemaal zulke positieve punten, dat men niets anders kan zeggen dan: "tegenkoppeling is fantastisch". Zoals gewoonlijk zitten er bij iedere fantastische maatregel wat addertjes onder het gras en daar gaan we het nu over hebben.

Onjuiste dempingsredenering

Deze bespreking begint met een beschouwing over de dempingsfactor (DF) omdat van daar uit een aardige start gemaakt kan worden met de behandeling van de nadelen van tegenkoppeling. Velen spreken over dempingsfactoren die minimaal 100 of 1000 moeten bedragen. Dat is fantastisch voor de

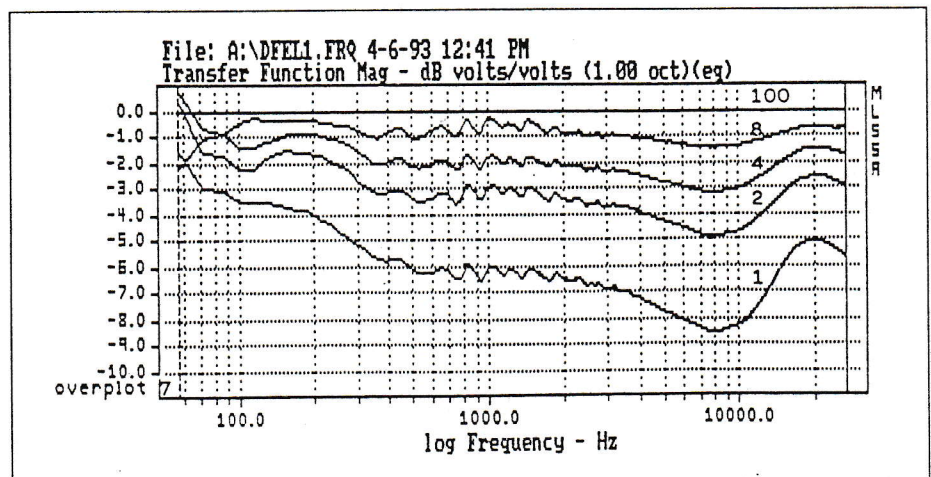
basweergave, zeggen ze. Ik heb altijd mijn reserves gehad bij deze uitspraken en die waren in eerste instantie ingegeven door een FOUTE redenering. Die luidde: "een speaker heeft van zichzelf altijd al een ohmse weerstand (dit is niet de impedantie) van enige Ohms. De effectieve dempingsfactor van versterker en luidspreker samen kan dus nooit groter worden dan 8 gedeeld door die paar Ohm. Stel bijvoorbeeld dat de luidspreker een ohmse weerstand heeft van 2 Ohm, dan hebben we

Fig. 7 ESL63 met Quad 306 met verschillende dempingsfactor-instellingen.

totaal te maken met een dempingsfactor van $8/2 = 4$. Ook al dempt de versterker oneindig goed, de effectieve dempingsfactor kan nooit groter worden dan 4. De versterker mag dus best een dempingsfactor hebben die ergens ligt boven 4. Totaal maakt het toch weinig uit". Het interessante was dat luisterproeven leerden dat zo'n redenering helemaal niet klopt. Duidelijk waren verschillen hoorbaar als de DF gewijzigd werd van bijvoorbeeld 4 tot 100. Die redenering is dus onjuist omdat ik geen rekening hield met de zogenaamde elektrische Q-factor (Q_e) die in samenwerking met de mechanische speakerdemping (Q_m) voor het laaggedrag van de speaker zorgt. De luidsprekerfabrikant gebruikt de ohmse speakerweerstand om Q_e optimaal af te stemmen. Een restweerstand van de versterker (lage dempingsfactor) mag daar niet extra aan toegevoegd worden omdat Q_e dan een onjuiste waarde krijgt met als gevolg dat de basweergave niet meer klopt.

Optimale demping?

De vraag is dan: "hoe groot moet de dempingsfactor minimaal zijn zodat de basweergave (en de totale frequentie karakteristiek) correct wordt?" Aan de hand van twee speakers (ESL63 en M3) heb ik dit onderzocht. Deze speakers stuurde ik aan met de Quad 306



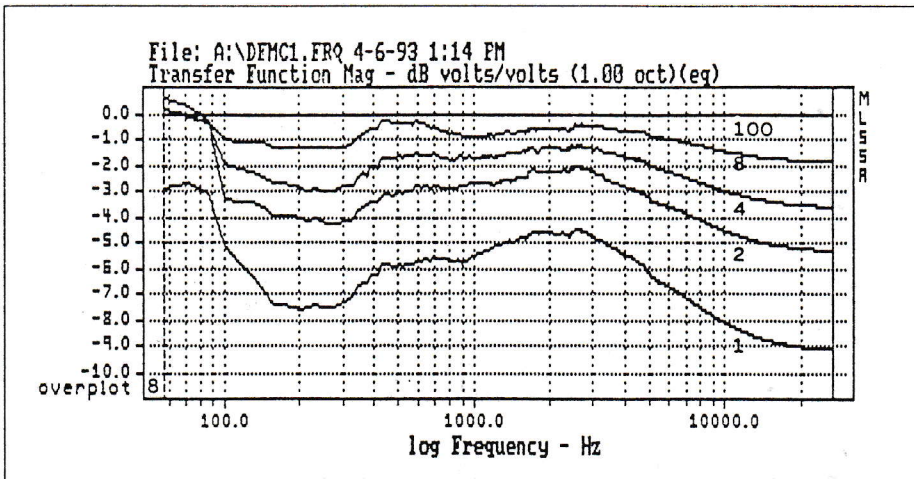


Fig. 8 M3 (Meyst-Corbier) met Quad 306 met verschillende dempingsfactor-instellingen.

eindversterker en door toevoegen en wijziging van enkele weerstanden kon ik iedere gewenste dempingsfactor instellen. De effecten daarvan op de frequentie karakteristiek in de luisterkamer werden met behulp van Melissa opgemeten. De figuren 7 en 8 geven de resultaten. Gebruik is gemaakt van dempingsfactoren met de waarden 100, 8, 4, 2 en 1. (Voor de duidelijkheid zijn de verschillende karakteristieken onder elkaar geplaatst). Omdat de speaker-fabrikant uitgaat van hoge DF-waarden is DF = 100 via computerberekening weergegeven door een rechte frequentie karakteristiek. Nu valt in de figuren af te lezen hoe de basweergave en de rest van de karakteristiek WIJZIGT bij een lagere DF. Wat blijkt: de bastonen reageren weinig op de waarde van de DF of "slingeren" zelfs op, terwijl de midden en hoge tonen sterk en wisselend verzwakt worden als de DF lager wordt. (Verklaring van het mid- hooggedrag: de restweerstand van de versterker gaat deel uitmaken van het speaker-filter en ontregelt daardoor dat filter).

Minimale dempingsfactor

De resultaten die men uit deze metingen kan afleiden zijn aardig. Logisch dat BUIZENVERSTERKERS donkerbruin klinken want hun lage DF (vaak in de buurt van 4) zorgt voor een verzwakte hoogweergave bij aansluiting van echte speakers. Daarnaast: een DF die ergens boven 8 ligt is als meer dan voldoende te beschouwen want de afwijking van het ideaal is dan kleiner dan 1dB. Kijken we hier de wat oudere literatuur op na, dan komt men aanbevelingen tegen om de DF groter of gelijk aan 15 te nemen. Dat zou dan ruim voldoende zijn. De hier verrichte metingen ondersteunen die opvatting en dat leidt tot de volgende conclusie:

Conclusie 6: "het streven naar zeer hoge dempingsfactoren (door gebruik

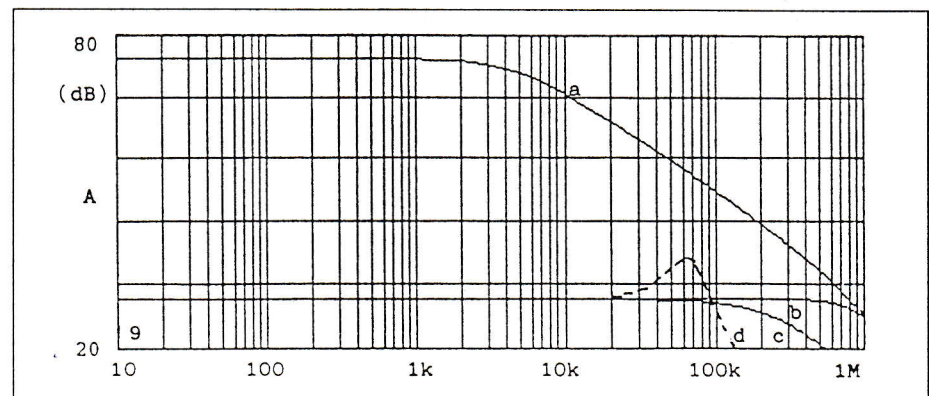
te maken van veel tegenkoppeling) kan als ZINLOOS beschouwd worden. Een dempingsfactor in de buurt van 15 of hoger is al voldoende. Dus extreem grote tegenkoppeling is dan ook niet nodig."

Ik sta overigens in deze opvatting niet alleen omdat een opmerkelijke trend van huidige hoogwaardige hi-end versterkers is, dat ze dempingsfactoren bezitten in de buurt van 50 of nog lager (ML no.20.6 evenals Krell). Dat is veel lager dan de waarden van DF = 100 of meer zoals men in de reclame-cretologie meervoudig tegenkomt.

Subjectieve evaluatie

De volgende vraag is een logisch gevolg van het vorige onderzoek. De dempingsfactor beïnvloedt de frequentie karakteristiek. Heeft de DF ook invloed op de ruimteafbeelding, het stereobeeld, de transientresponsie en dergelijke? Om dit te onderzoeken is de volgende proef verricht. Twee versterkers met totaal verschillende gehoorsmatige eigenschappen werden naast elkaar geplaatst. Versterker 1 had een doortekend ruimtebeeld en prachtige transientweergave en een DF van 2. Er was in deze versterker geen tegenkoppeling toegepast. Versterker 2 was daarentegen zwaar tegengekoppeld en had een heel hoge dempingsfactor.

Fig. 9 Standaard tegengekoppelde versterking als functie van de frequentie.



Deze versterker had een plat ruimtebeeld dat erg aan de speakers kleefde. In serie met versterker 2 werd een extra weerstand opgenomen (3,9 Ohm) zodat de totale dempingsfactor gelijk werd aan versterker 1. Via extra ingrepen werden ook nog de frequentiebereiken gelijk gemaakt. (NB: door deze twee maatregelen worden de twee versterkers binnen het algemeen aanvaarde versterkermodel (zie deel 1) onderling gelijk ingesteld). Wat bleek nu bij de beluistering van deze twee versterkers? Ze hadden precies hetzelfde klankkarakter (logisch want de DF was nu gelijk), maar het ruimtebeeld bleef totaal verschillend. Versterker 1 beeldde nog steeds ruim af en versterker 2 bleef even plat als die al was. De volgende conclusies liggen nu voor de hand.

Conclusie 7: "het klankbeeld wordt door de DF beïnvloed"

Conclusie 8: "de DF bepaalt niet het ruimtebeeld"

Vooral dat laatste is interessant omdat daarmee aangeduid wordt dat de interne elektronische opbouw van versterker 2 de oorzaak is van zijn platte ruimtebeeld. Het grote verschil tussen de twee versterkers was de tegenkoppeling, dus het is logisch om daar als eerste met de beschuldigende vinger naar te wijzen.

Complex rekenen

Men krijgt de indruk dat de enige taak van de versterker bestaat uit het vergroten van de spanning. Dat klopt ook, maar onderweg gebeurt er het een en ander met de signalen. De versterker reageert niet voor alle frequenties op precies dezelfde manier. Vooral bij hoge frequenties neemt de open-lus versterkingsfactor af en dat heeft verrassend veel invloed op de eigenschappen van die versterker. Bij hoge frequenties blijken de dempingsfactor en de vervorming sterk te veranderen. Ook gaat de versterker daar meer reageren op de impedantie van de aangesloten luidspreker. Deze gedragingen vallen volledig door te rekenen, maar dan moet zowel met het tijdgedrag als met het amplitudegedrag gelijktijdig rekening gehouden worden. Men noemt dat: re-

PARAMETERS VERSTERKER

```

=====
Ao      = 6000      [ ]
f-3    = 5000      Hz
f-e    = 1          MHz
R1     = 1          kOhm
R2     = 29         kOhm
R-uit  = 16         Ohm
C2//R2 = 2,7       pF
=====
  
```

```

(f-3=pool voortrap )
(f-e=pool eindtorren)
=====
  
```

Fig. 10 Parameters van tegengekoppelde versterker van de figuren 9, 11 en 12.

kenen in "het complexe vlak", vandaar dat dit stukje tekst "complex-rekenen" heet.

In fig. 9 staan de resultaten van berekeningen aan een standaard tegengekoppelde versterker (basisgegevens staan in fig. 10). De bovenste kromme (a) geeft de versterking (in dB) ZONDER tegenkoppeling. Duidelijk is zichtbaar dat boven 5 kHz de openlus-versterking afneemt. De middelste kromme (b) laat zien hoe de versterker zich MET tegenkoppeling gedraagt zonder aangesloten luidspreker. De onderste kromme (c) geeft de versterking terwijl er WEL een (Ohmse) luidspreker is aangesloten. Er is niets in dit fig. dat duidt op vervelende eigenschappen. Dat wordt echter totaal anders als we van deze versterker gaan berekenen hoe de dempingsfactor en de vervorming er uit zien. Fig. 11 toont die dempingsfactor en wat blijkt? Onder 5 kHz is de DF keurig 100, maar bij hoger wordende frequentie stort de dempingsfactor in.

Bijvoorbeeld: bij 20 kHz bedraagt de DF van deze versterker nog maar 6! Normaal lees je niets over deze verschijnselen in de specificaties van een versterker. Logisch, want men geeft de meetgegevens op die bij 1kHz bepaald zijn. Daar is alles nog keurig in orde terwijl er juist boven 5kHz fikse afwijkingen ontstaan. De volgende conclusie is dan logisch:

Fig. 11 Dempingsfactor als functie van de frequentie.

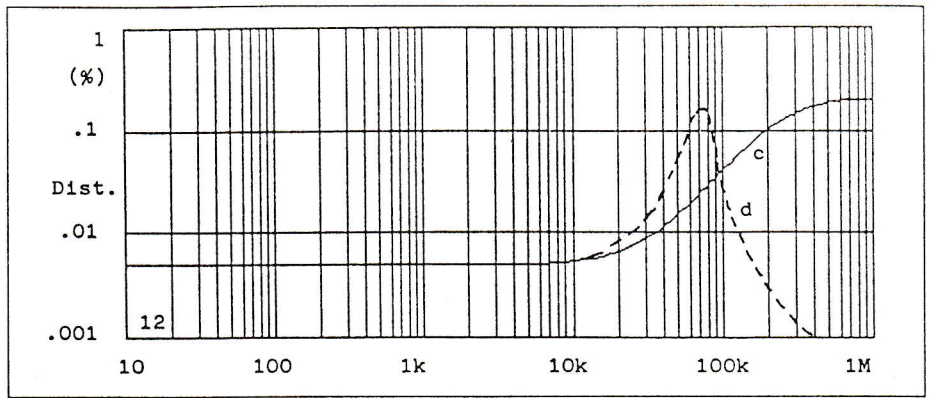
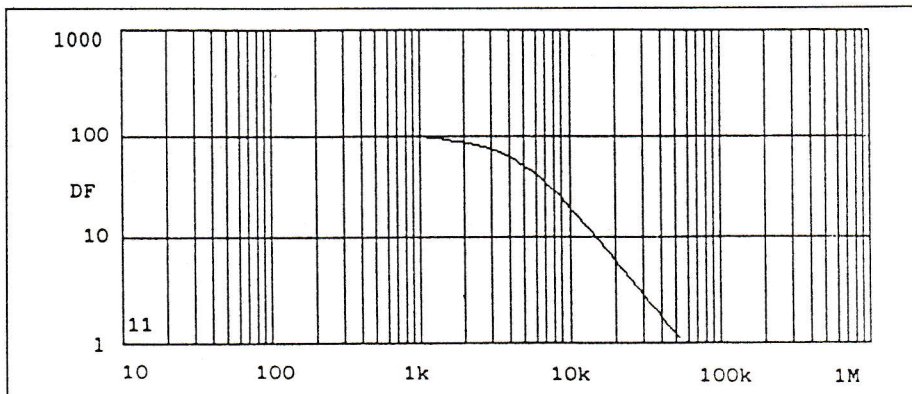


Fig. 12 Vervormingsreductie als functie van de frequentie.

Conclusie 9: "fantastische meetcijfers bij 1kHz ten gevolge van grote tegenkoppeling zeggen niets over het versterkergedrag bij hogere frequenties."

Complexe vervorming

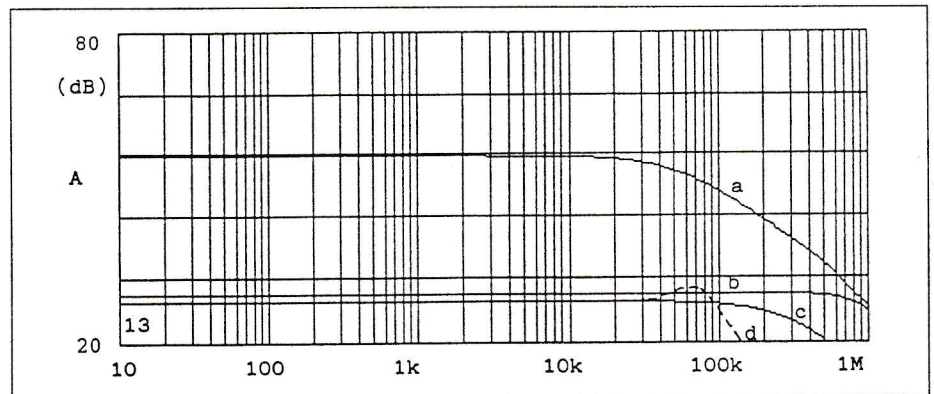
Op precies dezelfde manier kan ook doorgerekend worden hoe de vervorming zich bij hogere frequenties gedraagt. Dat staat in fig. 12. Hoe hoger de kromme in dit fig. staat, des te meer de versterker vervormt. Uitgegaan is van een versterker die zonder tegenkoppeling 1 % vervormt en op de verticale as ken men nu aflezen (kromme c) hoeveel de vervorming met tegenkoppeling wordt. Wat blijkt: tot ongeveer 10 kHz is de vervorming ongeveer 0,006 %, daarboven begint hij snel toe te nemen. Opnieuw is hier conclusie 9 op zijn plaats.

Complexe speakers

Maar de figuren hebben nog meer informatie in zich. Gestippeld staat getekend (kromme (d)) wat er verandert als we een normale luidspreker (dat is dus geen Ohmse weerstand) op die versterker aansluiten. Gerekend is met een voorbeeldspeaker die sterk lijkt op een elektrostaat. Fig. 9 laat nu zien dat de versterking opslinging ("ringing" genaamd) gaat vertonen. Fig. 11 blijft gelijk, terwijl vooral bij de vervorming (fig. 12) een fikse vervormings-TOENAME bij hogere frequenties optreedt. Ook over zulke verschijnselen lees je in de gemiddelde specificaties niets.

Conclusie 10: "ten gevolge van de beperkte open-lus bandbreedte vertoont de tegengekoppelde versterker bij hoge frequenties veel slechtere meetcijfers dan bij 1 kHz en reageert hij sterk op de impedantie van de speaker".

Fig. 13 Als fig. 9 met $A_o = 600$ en $f-3 = 50.000$.



Overigens streeft men er bij een goed ontwerp altijd naar om de hier genoemde neveneffecten zoveel mogelijk buiten het audiobereik te houden. Ook hier is daar rekening mee gehouden door uit te gaan van versterkereigenschappen (fig. 10) die vooral vervormingseffecten buiten de audioband drukken.

Alternatieve benadering

Het is in dit verband heel aardig om eens te onderzoeken wat er gebeurt als we een versterker drastisch anders gaan instellen. We streven dan niet meer

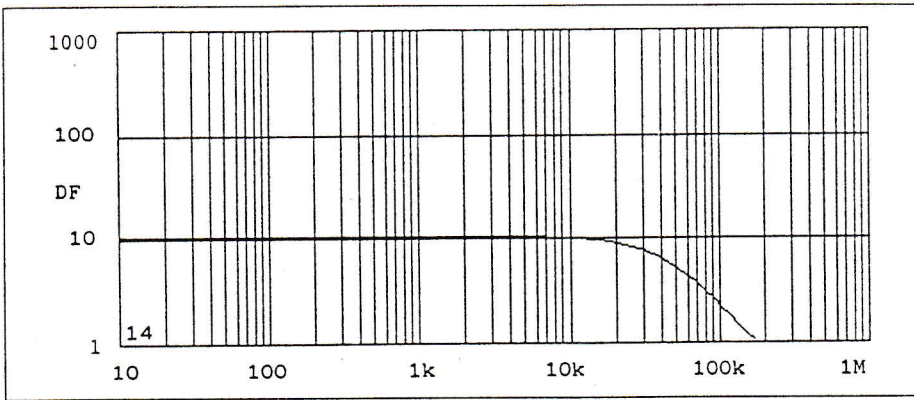
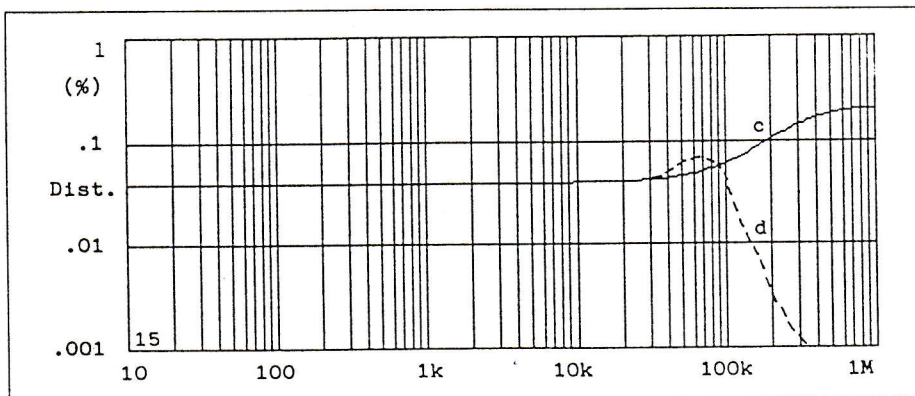


Fig. 14 Als fig. 11 met $A_o = 600$ en $f-3 = 50.000$.

naar fantastische meetcijfers bij 1 kHz maar naar CONSTATE meetcijfers in de gehele audioband. Twee maatregelen moeten daartoe genomen worden: de openlus versterking A_o is met een factor 10 verlaagd en de openlus-bandbreedte is met een factor 10 vergroot. Daarmee is de versterker nog steeds stabiel, maar het eindeffect is wel dat hij totaal andere eigenschappen krijgt. Het frequentiebreik is nog steeds groot (fig. 13) en reageert veel minder op elektrostatische speakers (vergelijk krommes (d) in figuren 9 en 13). De dempingsfactor (fig. 14) wordt lager maar blijft binnen de audioband volledig constant. Hetzelfde geldt voor de vervorming (fig. 15) die welliswaar meer bedraagt, maar binnen de audioband verrassend homogeen is. Ook treedt er nauwelijks reactie op bij belasting met een elektrostatische speaker. Subjectieve evaluaties met versterkers volgens deze instelling geven aan dat het ruimtebeeld opener en vriendelijker en gemakkelijker wordt. Zo'n versterker "hoort" minder stressig. Maar laten we wel wezen: de vervormingsreductie is nu minder. Dus er worden hogere eisen gesteld aan de schakeling, want de versterker mag nu van zichzelf maar weinig vervorming hebben. Bovendien genoemde experimenten leiden tot de volgende conclusie:

Conclusie 11: koppelen we een versterker minder tegen en geven we hem een

Fig. 15 Als fig. 12 met $A_o = 600$ en $f-3 = 50.000$.



grotere openlus bandbreedte, dan leidt dit tot een vriendelijker en minder stressig geluidsbeeld. De vervorming en dempingsfactor hebben in het audiobereik dan constante waarden.

Ook in deze benadering sta ik niet alleen zoals onlangs bij een press-meeting bij Pioneer bleek. Daar vertelde Mark R. Wood (assistant manager Design, verantwoordelijk voor de nieuwe reeks eindversterkers) dat de nieuwe trend bij Pioneer wordt om enkel-pool versterkers te maken met een openlus bandbreedte in de omgeving van 10 kHz of meer. Op mijn vraag waarom men nu niet direct de openlus bandbreedte op 20 kHz stelde, antwoorde hij dat "dit te maken had met het beperkte frequentiebereik van de eindtransistoren (2-e pool)" -en- "omdat de gemiddelde consument nog steeds fantastisch hoge dempingsfactoren wil zien ook al zegt dat niks". Zo zie je maar weer! (Siltech (STC) gaf vlak voor deze publicatie nog door dat in hun nieuwste versterker, de PJ10, wel een openlus bandbreedte van 20 kHz is gerealiseerd, omdat zij het van het grootste belang achten dat specificaties binnen het audiobereik constant blijven. Dit wordt natuurlijk door mij onderschreven).

7	$A(f) = A_o \cdot \left[\frac{1}{1 + j \cdot \frac{f}{f-3}} \right] \cdot \left[\frac{1}{1 + j \cdot \frac{f}{f-e}} \right]$	
8	$b(f) = \frac{R_1}{\sqrt{R_2^2 - X_{C_2}^2 + R_1}}$	9
	$V_\delta = \frac{R_u + R_L}{R_u + R_L \cdot (1 + b(f) \cdot A(f))} \cdot V_{in}$	

De versterker ziet geen muziek !

Een van de bekendste redeneringen van de tegenstanders van tegenkoppeling luidt als volgt: "Een versterker met tegenkoppeling heeft niet alleen te maken met het muzieksignaal aan zijn ingang, maar ook met het tegengekoppelde uitgangssignaal". "Omdat deze twee signalen altijd enigszins van elkaar afwijken krijgt de versterker ten gevolge van de tegenkoppeling extra complexe signalen aan zijn ingang aangeboden". "De versterker gaat daardoor vooral bezig met zijn eigen correctie en dat is hoorbaar aan een platgeslagen en dichtgewalst geluidsbeeld". Bovenstaande redenering lijkt heel redelijk en in deze studie onderzoeken we of hij klopt. De middelen zijn nu namelijk beschikbaar om te bepalen wat er intern in de versterker gebeurt. Daartoe zijn aan het volgende versterkermodel berekeningen uitgevoerd.

Muzikaal rekenmodel

In fig. 16 staat schematisch een versterker weergegeven met aan de linkerkant de ingang. Vervolgens is er een aftreklapje getekend (in wezen de plus- en min-ingangen van de versterker) en daarna treft men de eindversterker aan met versterking -A-. In deze versterking zijn twee filters (1-e orde) opgenomen die de -3dB-punten van de ingangstrap (f-3) en van de eindtransistoren (f-e) weergeven. Formule 7 geeft weer hoe A beschreven wordt. Zie ook fig. 10 waarin de tabel staat van parameters waarmee al eerder aan een versterker is gerekend.

Daarna heeft de versterker een uitgangsimpedantie -R_u-, hangt er een speaker -R_L- aan en is er sprake van tegenkoppeling door middel van R₁ en R₂ en C

(formule 8). In fig. 16 zijn de volgende spanningen van belang: het ingangssignaal -V_{in}-, het uitgangssignaal -V_{uit}-, het tegenkoppelsignaal -V_t- en het signaal -V_{delta}-. Dit laatste signaal is het belangrijkste want dat is precies het signaal dat de versterker op zijn echte interne ingang krijgt aangeboden en waarmee hij verder aan het werk gaat. Enig rekenwerk laat nu zien dat die spanning V_{delta} door de eenvoudige formule 9 beschreven wordt. Tot zover de uitleg van het rekenmodel met een paar belangrijke formules. Waar het nu

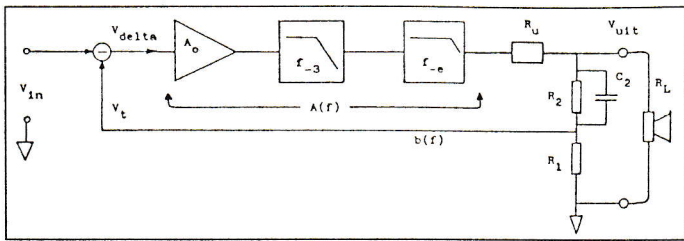


Fig. 16 Versterkermodel voor de bepaling van het karakter van de signalen die een tegengekoppelde versterker te verwerken krijgt.

echter om gaat, is wat er met dit rekenmodel gedaan kan worden en hoe dit model inzicht verschaft in de bekendste redenering van de tegenstanders van tegenkoppeling.

Vervormde pulsen

Gaat men met de versterker van fig. 16 aan het werk en meet men hem door met continue sinustonen, dan kan men keurig de frequentie karakteristieken afleiden zoals ze hiervoor al gegeven zijn. Dat is nu echter niet van belang, want die gegevens hadden we al. Wat we nu gaan doen is heel anders. Een puls vormig signaal wordt op deze versterker losgelaten en we gaan kijken of de versterker hier wel correct mee om gaat. Voor dit puls vormig signaal nemen we een ENKELVOUDIGE blok golf van 10kHz die eenmaal voorkomt en de rest van de tijd is er geen signaal aanwezig. Dit transiënt vormig signaal laten we door de versterker gaan. Het signaal is zo snel, dat merkbaar wordt dat de versterker zelf tijd nodig heeft om het signaal door zich heen te laten gaan. Per definitie vertraagt een versterker signalen altijd iets en dat komt doordat het frequentie bereik van de versterker in het hoog beperkt is. Fig. 17 geeft nu weer hoe we ons het een en ander voor moeten stellen. Bij de ingang is de blok golf getekend. Deze verschijnt sterk vergroot (en vertraagd) aan de uitgang. Het tegenkoppelsignaal V_t verzwakt die versterkte en vertraagde blok golf weer en vervolgens vindt er aftrekking plaats. Per definitie zal nu V_{delta} een piek vormig karakter krijgen en de vraag is nu hoeveel relatie die pieken nog hebben met de oorspronkelijke ingangsspanning. Voor een

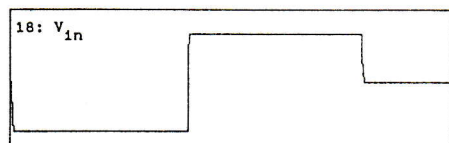


Fig. 18 Blok vormige ingangsspanning.

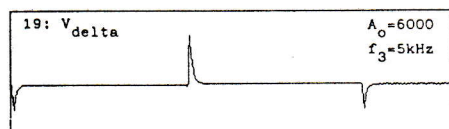


Fig. 19 V_{delta} bij $A_o = 6000$ en $f_3 = 5 \text{ kHz}$ en $f-e = 1 \text{ MHz}$.

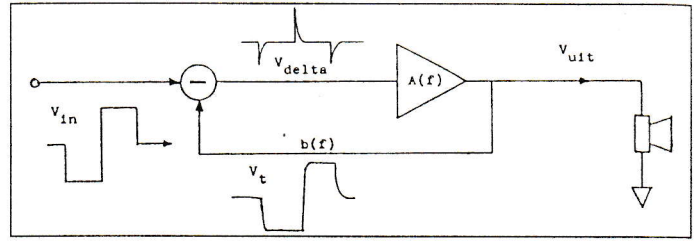


Fig. 17 Tijdgedrag van blokspanningen in een versterker.

aantal gevallen is dit met behulp van Fast Fourier Transformatie (FFT) en inverse-FFT uitgerekend. Fig. 18 geeft de ingangsblokspanning. Fig. 19 laat V_{delta} zien als $A_o = 6000$ en $f_3 = 5000 \text{ Hz}$. Duidelijk is nu een sterk piek vormig signaal zichtbaar met minimale resten van de eigenlijke blokspanning.

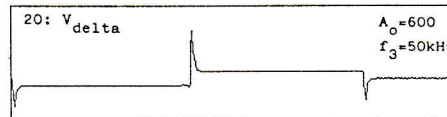


Fig. 20 V_{delta} bij $A_o = 600$ en $f_3 = 50 \text{ kHz}$ en $f-e = 1 \text{ MHz}$.

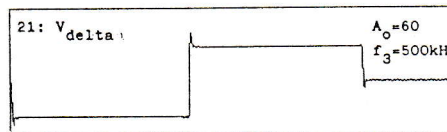


Fig. 21 V_{delta} bij $A_o = 60$ en $f_3 = 500 \text{ kHz}$ en $f-e = 1 \text{ MHz}$.

Fig. 20 laat V_{delta} zien bij $A_o = 600$ en $f_3 = 50.000 \text{ Hz}$ en fig. 21 doet hetzelfde voor $A_o = 60$ en $f_3 = 500.000 \text{ Hz}$. Wat dus opvolgend in de fig. 19, 20 en 21 gebeurt is dat de openlus-versterking steeds verder verlaagd wordt en dat de openlus-bandbreedte van de versterker steeds evenredig vergroot wordt. Dit is identiek met een steeds lagere tegenkoppeling. Hiervoor had ik al aangeduid dat dit subjectief tot een betere ruimteweergave aanleiding gaf. Uit de nu gepresenteerde berekeningen volgt echter ook dat het signaal V_{delta} dat verder door de versterker verwerkt wordt, bij steeds geringere tegenkoppeling en daarmee lagere openlus-versterking, steeds meer gelijkenis vertoont met het ingangssignaal.

Conclusie 12: tegenkoppeling zorgt er inderdaad voor dat de versterker signalen moet versterken die sterk puls vormig worden en danig gaan afwijken van het oorspronkelijke muziek signaal.

Dynamische problemen

De voorafgaande resultaten zijn ook zonder ingewikkelde berekeningen al eenvoudig boven tafel te halen. Men hoeft fig. 17 alleen maar in omgekeerde richting te lezen (van luidspreker naar ingang) om zich te realiseren dat bij correcte blok golf spanning aan de uitgang V_{delta} wel het piek vormig karakter moet vertonen zoals hiervoor berekend is. Er zijn nu echter iets meer resultaten te verkrijgen omdat formule 9 het mogelijk maakt om te berekenen

hoe groot de piek amplitude wordt ten opzichte van de blok golf amplitude. Daarmee krijgt men dan inzicht hoe sterk de ingang van de versterker door tegenkoppeling overstuurd kan raken (zie fig. 22). Voor het geval van fig. 19 wordt de verhouding $V_{\text{piek}}/V_{\text{blok}}$ gelijk aan 32 dB, voor de daarop volgende instellingen respectievelijk 14 en 2,9 dB.

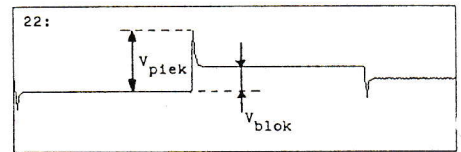


Fig. 22 Definitie van piekspanning en blok golfspanning in V_{delta} .

Uit deze getallen volgt dan dat: **Conclusie 13: bij zware tegenkoppeling krijgt de ingangstrap EXTRA GROTE dynamieksprongen te verwerken die aanleiding zullen geven tot extra invloed van vervorming (TIM) en van aardfouten (stromen in aardbanen) en voedingsvariaties en alineariteiten en dergelijke van de ingangstrap.** Dit betekent dus dat tegenkoppeling er voor zorgt dat vooral de ingangstrap van de eindversterker extreem onder druk gezet wordt en dat deze aan heel zware eisen moet voldoen. Goede ontwerpen houden hier natuurlijk rekening mee en door middel van slimme ingangsfitering vallen een aantal van de hier genoemde problemen te omzeilen. Ondanks dat is hier aangetoond dat tegenkoppeling er voor zorgt dat de eisen aan de amplitudezwaai, versterkerlineariteit en aarding en voeding bij de ingangstrap juist extra toe gaan nemen. Tegenkoppeling maakt het de versterker niet gemakkelijker, het wordt juist moeilijker.

Samenvattend

Tegenkoppeling bezit nadelen. Subjectief was dat allang bekend. Vanuit drie invalshoeken zijn enige nadelen van tegenkoppeling aangetoond. De dem-pingsfactor blijkt niet zo hoog te hoeven zijn als iedereen dacht. De dem-pingsfactor en vervormingsreductie blijken niet constant te zijn in het audiobereik. De ingangstrap blijkt het extra zwaar te krijgen als er tegenkoppeling wordt toegepast. Op deze manier kunnen nog meer nadelen van tegenkoppeling doorgerekend worden waarmee dan aangetoond kan worden dat alles "inderdaad niet zo schoon is als het op het eerste gezicht lijkt".

Volgende maand sluit ik deze studie af met een onderzoek naar de evaluatiemethoden die men heeft ontwikkeld om te bepalen of een versterker voldoet aan het criterium van werkelijkheidsweerafe. Dat artikel heet dan: "Meten aan werkelijkheidsweergave".

In dit laatste deel van de studie over tegenkoppeling en werkelijkheidsweergave worden de meetmethodes, die men ontwikkeld heeft om de kwaliteit van de geluidswaergave te toetsen, besproken.

Tegenkoppeling van de werkelijkheidsweergave?

Deel 3: Het meten aan deze waergave

Ir. Menno van der Veen

Dit is het derde en laatste deel van de studie over tegenkoppeling en werkelijkheidsweergave. Nu staan de meetmethodes centraal die men ontwikkeld heeft om de kwaliteit van de geluidswaergave te toetsen. Om dat goed te kunnen behandelen wordt eerst onderzocht wat er onderweg met "het geluid" gebeurt vanaf de microfoon tot aan de luidspreker. Daarna worden standaard en bijzondere meetmethodes besproken. Op grond van resultaten uit de methode wordt aangetoond hoe zwaar de eisen zijn waaraan een tegengekoppelde versterker moet voldoen. Tot slot wordt de essentie van mogelijke bezwaren tegen standaard tegenkoppeling verwoord.

De vorige twee delen van de studie over tegenkoppeling zijn als volgt samen te vatten en de gegevens ervan zijn belangrijk voor de rest van het verhaal. In deel 1 is aangetoond dat tegenkoppeling voordelen bezit: de versterking is eenvoudig en stabiel instelbaar met een paar weerstandjes. De dempingsfactor wordt groot en hetzelfde geldt voor het frequentiebereik. Daarnaast wordt ook nog de vervorming van de versterker sterk verminderd. Deel 2 behandelde de nadelen van tegenkoppeling. De dempingsfactor is welliswaar groot maar dat is hij maar in een beperkt frequentiegebied. Hetzelfde geldt voor de vervormingsreductie. Daarnaast kan bij toenemende tegenkoppeling de impedantie van de speaker de versterker instabiel maken. Aangetoond is dat bij groter wordende tegenkoppeling de versterker hoofdzakelijk bezig gaat met zijn eigen correctie. Subjectief (praktijkervaring) is de relatie gelegd tussen het dichtslippen van het geluidsbeeld en een grote tegenkoppeling.

De grondslag van HIFI

Helemaal aan de basis van de werkelijkheidsweergave staat een grondgedachte die ik als volgt verwoord: "bij een opname wordt de geluidsdruk in een ruimte opgemeten. Vervolgens wordt deze geluidsdruk in de luisterkamer gereproduceerd". Deze grondslag kan in een eenvoudige formule omgezet worden. Laat $p\text{-opname}(f,t,\Theta)$ de geluidsdruk in de opnameruimte zijn.

Die geluidsdruk hangt af van de frequentie (f), het tijdstip (t) en de ruimtelijke oriëntatie (richting) (Θ). Noemen we nu de geluidsdruk in de luisterkamer $p\text{-kamer}(f,t,\Theta)$, dan moet er gelden:

$$p\text{-kamer}(f,t,\Theta) = \text{constante} * p\text{-opname}(f,t,\Theta) \quad (10)$$

Ondanks de eenvoud van de formule, zegt deze heel veel. Omdat er sprake is van een echte "constante" die nergens van af hangt, moet iedere verandering van de geluidsdruk in de opnameruimte in een evenredige verandering in de luisterkamer vertaald worden. Verschijnselen als compressie zijn dus niet toegestaan. Frequenties mogen niet veranderen (denk aan de rotatiesnelheid van een platenspeler) evenals het tijdsdrag van de signalen (denk aan lage tonen die bijvoorbeeld later aankomen als hoge tonen). Ook mag de richtingsinformatie niet gewijzigd worden. Het enige wat wel mag, is dat in de luisterkamer de muziek harder of zachter klinkt dan in de opnameruimte.

Plaats van de versterker

Bij de opname meet een microfoon de geluidsdruk. De uitgangsspanning van de microfoon moet evenredig zijn met die druk en dit wordt weergegeven in de volgende formule:

$$V\text{-mike}(f,t,\Theta) = C1 * p\text{-opname}(f,t,\Theta) \quad (11)$$

We nemen aan dat de microfoon perfect werkt, dus is $C1$ een echte constante onder alle omstandigheden. Vervolgens gaat deze microfoonspanning door voorversterkers, mengpanelen en bijvoorbeeld de hele keten van CD-fabricage. Uiteindelijk draaien we dan thuis een CD en de spanning die van de CD-speler afkomt kunnen we nu omschrijven als:

$$V\text{-CD}(f,t,\Theta) = C2 * V\text{-mike}(f,t,\Theta) \quad (12)$$

Ook nu nemen we aan dat de hele signaalomzetting van microfoon tot aan de uitgang van CD-speler perfect verloopt en geen vervorming bevat. $C2$ is dus ook constant. Nu komt de versterker in beeld en die gaat de CD-spanning versterken en aan de luidspreker toevoeren. Noemen we de uitgangsspanning van de versterker $V\text{-uit}$, dan moet er gelden (als de versterker perfect foutloos werkt):

$$V\text{-uit}(f,t,\Theta) = C3 * V\text{-CD}(f,t,\Theta) \quad (13)$$

De omzetting van luidsprekerspanning naar geluidsdruk dient bij een perfecte luidspreker als volgt te verlopen:

$$p\text{-kamer}(f,t,\Theta) = C4 * V\text{-uit}(f,t,\Theta) \quad (14)$$

Bekijken we nu de reeks formules (11-14), dan kan de hele werkelijkheidsweergavelijn als volgt omschreven worden:

$$p\text{-kamer}(f,t,\Theta) = C1 * C2 * C3 * C4 * p\text{-opname}(f,t,\Theta) \quad (15)$$

Dit betekent dat de constante in formule 10 gelijk is aan $C1 * C2 * C3 * C4$. Omdat we het hier willen hebben over de invloed van de versterker, is nu alleen de constante $C3$ voor verdere studie van belang.

Eisen aan de versterker

De hiervoor gegeven formules maken het mogelijk om de functie van een versterker nauwkeurig te omschrijven. Formule 13 zegt namelijk dat de enige taak van de versterker is om de in-

gangsspanning met een constante versterkingsfactor groter te maken. De versterker mag niet comprimeren (aantasting C3), mag geen vervormingscomponenten opwekken (evenzo aantasting C3), mag geen fouten in het tijdsdomein bezitten (opnieuw aantasting C3) en mag geen richtingsfouten opwekken zoals bijvoorbeeld gebeurt bij overspraak tussen linker en rechter kanaal. Ook mag de versterker niet reageren op de luidspreker en moet hij ongevoelig zijn voor storingen van buitenaf (bijvoorbeeld afkomstig van het lichtnet). De versterker dient zich dus te gedragen als een ideale stuurbare SPANNINGSBRON. De eigenschappen van zo'n spanningsbron moeten als volgt zijn: de uitgangsimpedantie is nul Ohm voor alle frequenties (dat is een oneindige dempingsfactor) en de uitgangsspanning is een constante factor maal de ingangsspanning over een oneindig groot frequentiebereik en het faseverschil tussen in- en uitgangsspanning is nul en vervorming plus ruis zijn afwezig. Wat een ontwerper van versterkers nu doet is niets anders dan een apparaat te construeren dat die eigenschappen van de spanningsbron bezit. Het is dan ook logisch dat alle testen op hifi-gebied terug te voeren zijn naar de controle of de versterker wel een echte spanningsbron is. Met een aantal voorbeelden toon ik dat aan.

Testmethodes

Met normale standaard meetapparatuur kan men bepalen of de versterker vervormt, dus of er extra componenten opgewekt worden die oorspronkelijk niet aanwezig waren. Dit leidt dan tot cijfertjes over THD (Totale Harmonische Distorsie) en TIM (Transient Induced Distorsion) en IMD (Inter Modulatie Distorsie). Er zijn meer soorten vervorming te definiëren, maar steeds wordt er onderzocht of de constante C3 werkelijk constant is en niet afhangt van amplitude en frequentie en tijd. Ook bepaalt men het frequentiebereik om te onderzoeken of C3 voor alle van belang zijnde frequenties wel constant is. Moderne ontwikkelingen leiden in dit verband tot extreme frequentiebereiken vanaf DC (gelijkspanning = 0 Hz) tot aan MegaHertzen. Samenhangend hiermee wordt de fase of de differentiele fase en de groeplooptijd van signalen in de versterker gemeten om te bepalen of in het tijdsdomein afwijkingen optreden. Ook wordt de grootte van de dempingsfactor bij verschillende frequenties gemeten en worden de brom- en ruisgetallen bepaald. Zo zijn er nog meer controle methodes te omschrijven, maar deze voorbeelden zijn op dit moment wel voldoende. Heel fundamenteel is echter een totaal andere groep van testmethodes die in het verleden gedefinieerd zijn en die in dit verband beter licht werpen op de voorwaarden waaraan een versterker moet voldoen.

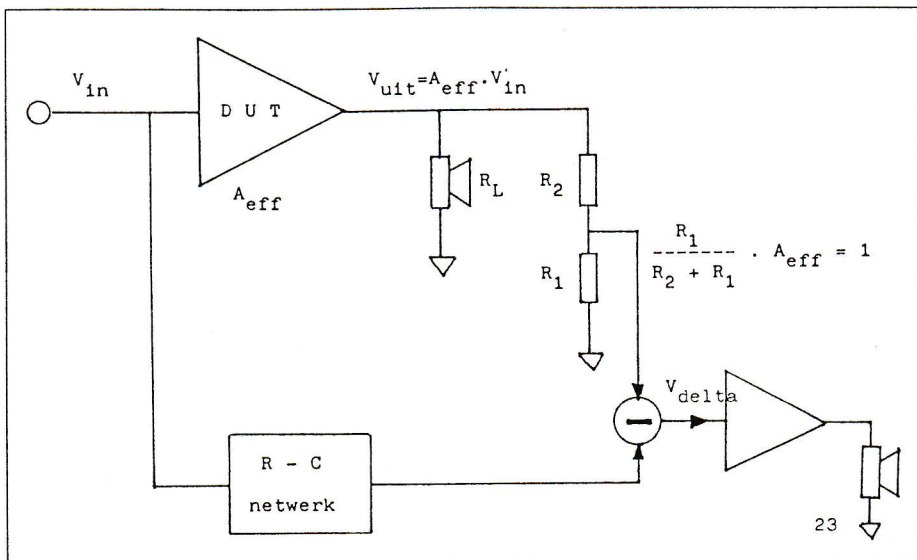


Fig. 23 Principe van de Baxandalltest.

Fundamentele testen

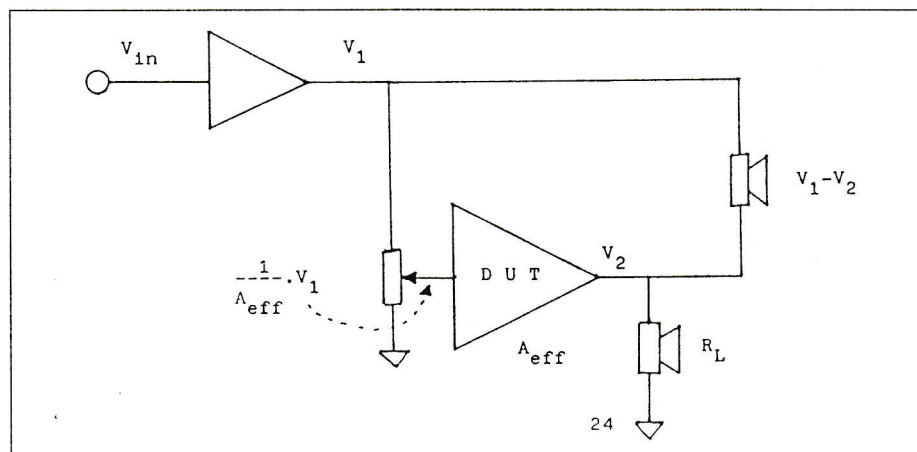
Zowel door Baxandall, Hafler en anderen zijn onderzoeksmethoden gedefinieerd die extreem goed kijken naar de eigenschappen van de versterker in praktijksituaties zoals we die in de huiskamer of studio aantreffen (zie lit.(1) en (2)). Deze testmethodes staan afgebeeld in de figuren 23 en 24. Wat gebeurt daar? Er wordt getest met muzieksignalen en niet met testtonen uit het laboratorium. De versterker wordt belast met een echte luidspreker zodat de impedantie-invloed van die speaker ook meegenomen wordt. Eventuele afwijkingen tussen in- en uitgangsspanningen worden hoorbaar gemaakt door middel van een aftrekschakeling. Bij Baxandall wordt daartoe eerst de uitgangsspanning afkomstig van de versterker onder test (DUT) verzwakt tot het niveau van de ingangsspanning door middel van twee weerstanden R1 en R2. Ook wordt het ingangssignaal nog via een zijschakeling (R/C-netwerk) gecorrigeerd voor eventuele tijdvervalsingen en frequentieafwijkingen in de versterker. De gedachte hierachter is dat deze correctie toegestaan is omdat

weerstand en condensatoren geen invloed hebben op het geluidsbeeld (opmerkelijk). Als op deze manier in- en uitgangsspanningen gelijk gemaakt zijn en vervolgens van elkaar worden afgetrokken, dan blijven alleen de vervormingsresten of andere versterkerfouten in het verschilsignaal over. Dat verschilsignaal versterkt men en voert het naar een extra luidspreker. Zo zijn de fouten, zoals ze in de praktijk voorkomen, hoorbaar te maken. Hafler (zie figuur 24) doet nagenoeg hetzelfde, maar hij corrigeert niet (of nauwelijks) voor frequentie en tijdafwijkingen in de versterker. Zie in dit verband de discussie die indertijd heeft plaatsgevonden (lit.(3) en (4)). Verdere uitleg van de methode waarmee Hafler de versterkerfouten hoorbaar maakt staat in formulevorm in figuur 24.

Tot de basis terugbrengen

Het opmerkelijke van beide testmethodes is, dat ze tot een grondgedachte terug te brengen zijn die berust op tegenkoppeling. Aan de hand van de Baxandalltest wordt dit verder uitgewerkt. In figuur 25 staat de Baxandalltest opnieuw getekend rondom de schakeling van een tegengekoppelde versterker. (Voor de eenvoud is het R/

Fig. 24 Principe van de Haflertest.



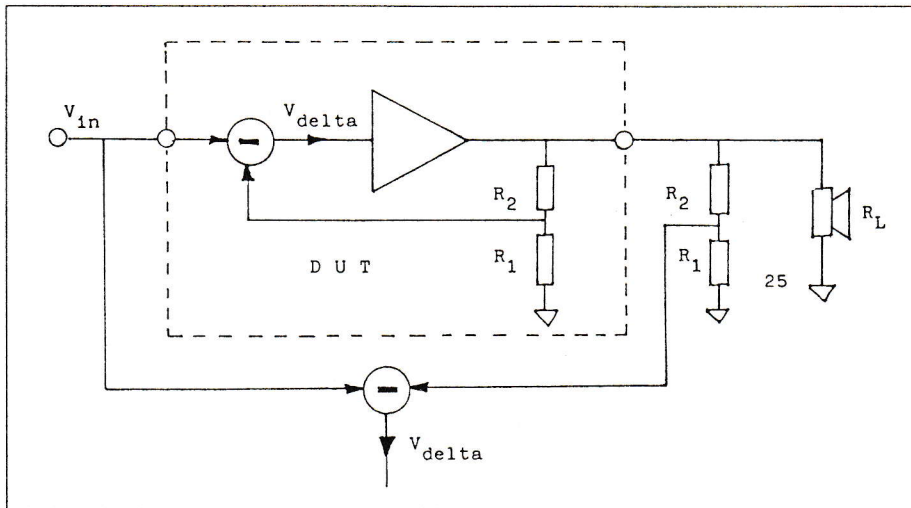


Fig. 25 Vergelijk tussen Baxandalltest en de tegengekoppelde versterker.

C-correctienetwerk van Baxandall nu weggelaten. Dit tast echter deze benadering niet aan). Wat blijkt nu: de in- en uitwendige schema's lijken sprekend op elkaar. Baxandall doet aan de buitenkant over wat er inwendig in de tegengekoppelde versterker al plaatsvindt. Baxandall onderzoekt uitwendig de verschillen tussen in- en uitgangsspanning. De tegengekoppelde versterker heeft INWENDIG deze verschilspanning al tot zijn beschikking. Dit betekent echter dat nu eenvoudig te berekenen valt hoe die verschilspanning er uit ziet en hoe die van de versterkerfactoren afhangt. De uitgangsspanning van de versterker wordt gegeven door de volgende formule:

$$V_{uit} = \left(V_{in} * \frac{A_o}{1+b*A_o} + \frac{D_o}{1+b*A_o} \right) * \frac{R_L}{\frac{R_u}{1+b*A_o} + R_L} \quad (16)$$

Zie voor verklaring van de gebruikte termen de delen 1 en 2 van deze studie. Deze uitgangsspanning wordt vervolgens met een factor b (de verzwakking door R1 en R2) verkleind en dan afgetrokken van V-in voor nadere analyse.

$$V_{\delta} = V_{in} - b * V_{uit} \quad (17)$$

Invulling van formule 16 levert dan het volgende resultaat op:

$$V_{\delta} = \frac{V_{in} * (R_u + R_L) - b * D_o * R_L}{R_u + R_L * (1 + b * A_o)} \quad (18)$$

Deze formule toont iets opmerkelijks aan. Hafler en Baxandall hebben groot gelijk dat ze de versterker testen onder belasting met een werkelijke luidspreker. Immers -RL- speelt een belangrijke rol in de formule. Daarnaast hebben ze opnieuw groot gelijk dat ze met dynamische signalen testen, omdat dan eventuele variaties van -Ru- als functie van het geleverde vermogen aan het daglicht treden. Voor een foutloze weerga-

ve is het nodig dat V-uit en V-in exact aan elkaar gelijk zijn. Dit houdt in dat V-delta nul moet zijn. Die situatie valt alleen te bereiken als we in formule 18 de openlus versterking Ao naar oneindig laten naderen. Dan wordt de noemer oneindig groot en nadert V-delta dus naar nul. Conclusie 17: Voor het gelijk maken van V-in en V-uit is het nodig dat de openlusversterking Ao naar oneindig nadert. Dit is identiek aan een extreem zwaar tegengekoppelde versterker.

Keren we nu terug naar de ervaringen die men heeft opgedaan met de Hafler en Baxandall-testen, dan blijkt dat daarmee inderdaad steeds minder afwijking tussen V-in en V-uit wordt waargenomen zodra de tegenkoppeling van de versterker wordt opgevoerd. Gezien bovenstaande formules is dat geen ver-

rassing meer. Maar waarnemingen hebben ook aangetoond dat bij steeds groter wordende tegenkoppeling het geluidsbeeld dreigt dicht te slippen. Dit lijkt in tegenspraak te zijn met de Baxandall/Hafler testen. Om dit vreemde effect te verklaren moet een andere weg gevolgd worden. Daartoe worden twee stappen genomen. De eerste is dat aangegeven wordt hoe laag de vervorming minimaal moet zijn om niet als storend te worden ervaren en dat dit leidt tot een bijna niet te verwezenlijken versterker. De tweede stap is dat het spectrale beeld van de vervorming onderzocht wordt en hoe dit wijzigt ten gevolge van tegenkoppeling.

Minimale vervorming

Hoe verder de ontwikkelingen in geluidstechniek voortschreden, des te extremer worden de eisen waaraan versterkers moeten voldoen. Het volgende voorbeeld maakt dat duidelijk. Op grond van waarnemingen bij de CD heeft men ontdekt dat een resolutie van 16 Bits

niet voldoende is om alle klank- en ruimtedetails van de muziek goed weer te geven. De Super Bit Mapping van Sony laat duidelijk horen dat een resolutie van 18 Bits essentieel is om alle klankelementen volgens de huidige hoor-norm onaagetast over te dragen. Evenzo heeft DCC aangetoond dat de 18 Bits resolutie wezenlijk bijdraagt tot diens goede eigenschappen. In studio's gaat men tegenwoordig zelfs zo ver dat opnames met een resolutie van 20 tot 24 Bits gemaakt worden om aan de hoogste eisen en de gevoeligste oren te kunnen voldoen. Evenzo heeft Stanley Lipshitz voldoende aangetoond dat goede signaaldithering (met driehoeksruis) leidt tot een 18 Bits resolutie zonder ruismodulatie en dat dit resulteert in een opmerkelijk schoon en doorzichtig geluidsbeeld. Nemen we al deze gegevens samen, dan kunnen we daaruit het volgende concluderen. Een goede moderne versterker mag maar heel weinig vervorming bevatten die minstens onder het 18 bits-niveau dient te liggen. Aan de hand van formule 16 kunnen we nu berekenen wat deze eis betekent voor Ao en de openlus bandbreedte van Ao.

Een resolutie van 18 Bits betekent een vervorming die 1/2^18 maal zwakker is dan het uitgangssignaal. Dit is identiek aan een vervormings-sigitaal afstand van 108dB en een vervorming van 0,00038%. Laten we voor deze berekening aannemen dat de versterker zonder tegenkoppeling een vervorming heeft van Do=1%. Laten we ook aannemen dat de voeding van de versterker voor alle frequenties perfect is, zodat -Ru- als constant beschouwd mag worden en tevens zo laag dat -Ru- ten opzichte van -RL- te verwaarlozen is. Dan moet er volgens formule 16 gelden:

$$\frac{D_{eff}}{V_{uit}} = \frac{1}{1+b*A_o} * \frac{D_o}{V_{uit}} = \frac{0,01}{1+b*A_o} = 2^{-18} \quad (19)$$

De meeste eindversterkers hebben een gemiddelde effectieve versterkingsfactor van 30, zodat voor -b- geldt: b=1/30. Berekening van Ao levert dan de volgende getalswaarde op: Ao=78643. We komen hier al in de buurt van het getal 100.000 dat eerder als noodzakelijke openlusversterking is genoemd. Echter, er is een extreem zware eis waaraan Ao extra moet voldoen. Deze openlusversterking dient een bandbreedte te hebben van minstens 20kHz (dus zonder tegenkoppeling) om de noodzakelijke vervormingsonderdrukking voor alle frequenties in het hoorbereik te realiseren (zie de argumentatie verderop). Nemen we nu voor de eenvoud aan dat de gehele eindversterker zich zonder tegenkoppeling gedraagt als een eerste orde laagdoorlaat filter met een

f-3 bij 20 kHz. Dan zal de tegengekoppelde versterker een frequentiebereik van 20kHz.(1+b.Ao) bezitten en dat is gelijk aan 52MHz!! Met de huidige beschikbare eindtransistoren is zo'n uitgebreid frequentiebereik volgens standaard technieken nog niet realiseerbaar! Dit leidt tot de volgende conclusie: Conclusie 18: Voor voldoende onderdrukking van de vervorming is een openlusversterking van ongeveer 100.000 keer nodig en een openlusbandbreedte van 20kHz. Met tegenkoppeling leidt dat tot een effectief frequentiebereik dat groter is dan enige tientallen MegaHertzen.

Spectraal vervormingsbeeld

Ervaringen in de praktijk hebben geleerd dat bij steeds hoger wordende tegenkoppeling het geluidsbeeld een hard en zelfs onaangenaam klankbeeld begint te krijgen. Het klankkarakter van de opname begint zelfs te wijzigen en te irriteren. Op grond van deze gegevens ontstond het volgende beeld. Het lijkt er op alsof vervormingsproducten door de tegenkoppeling naar hogere frequenties worden verschoven. Het lijkt erop alsof de vervorming van samenstelling gaat veranderen. Als dat zo is dan lijkt het er op alsof door tegenkoppeling de maskerende invloed van een hoofdsignaal ten opzichte van zijn vervormingsresidu wordt aangetast. Met het volgende rekenmodel wordt aangetoond dat de hier beschreven effecten ook werkelijk optreden. Figuur 26 toont een vervormingssignaal (blok golf) dat niet aan de ingang van de versterker wordt aangeboden (dus niet afkomstig van de CD-speler o.i.d.) maar ergens halverwege in de versterker ontstaat.

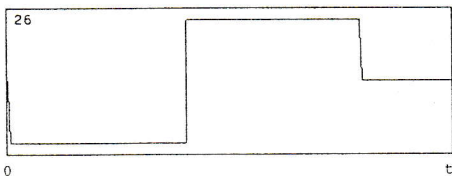


Fig. 26 Representatie van een vervormingssignaal.

Deze blok golf noemen we -Do-. De spectrale samenstelling ervan staat in figuur 27. Na toepassing van tegenkoppeling wordt het vervormingssignaal gegeven door:

$$Def f = \frac{Do * RL}{Ru + RL * (1 + b * Ao)} \quad (20)$$

Als een versterker NIET wordt tegengekoppeld, dan is b gelijk aan nul en wordt bij constante uitgangsimpedantie en nagenoeg constante speakerimpedantie het tijd- en frequentiekarakter van de vervorming niet aangetast. Zie figuur 28 met Ao=30, Ru=4 Ohm en RL=4 Ohm. Nemen we nu echter aan dat er WEL wordt tegengekoppeld, dan geeft figuur

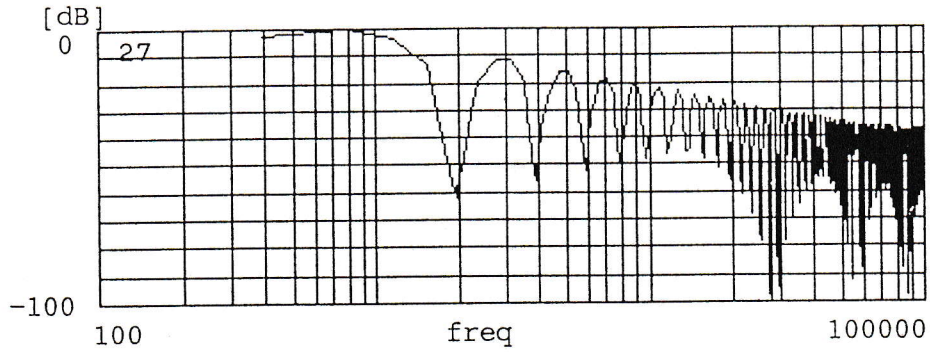


Fig. 27 Spectrale samenstelling van het vervormingssignaal.

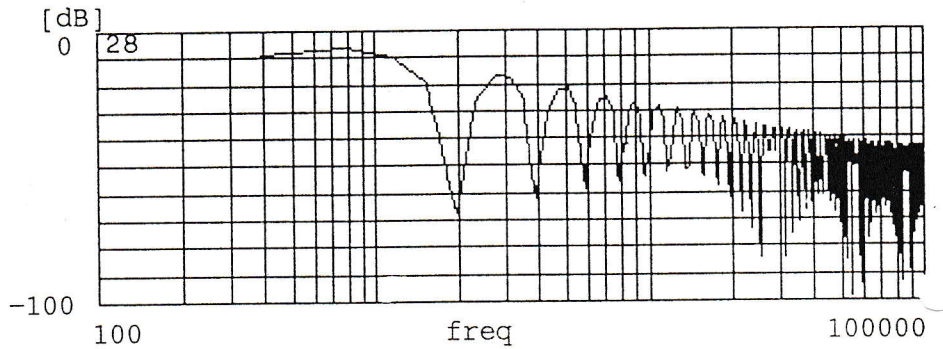


Fig. 28 Vervorming bij Ao=30, Ru=RL=4 Ohm.

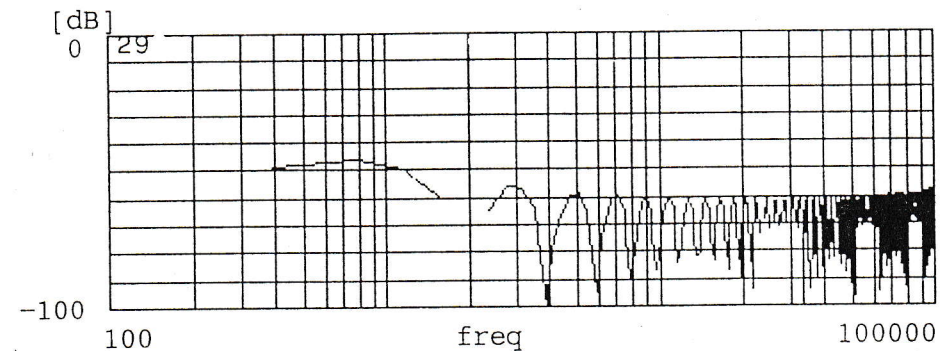


Fig. 29 Vervorming bij Ao=6000, fo=5kHz, b=1/30, Ru=RL=4.

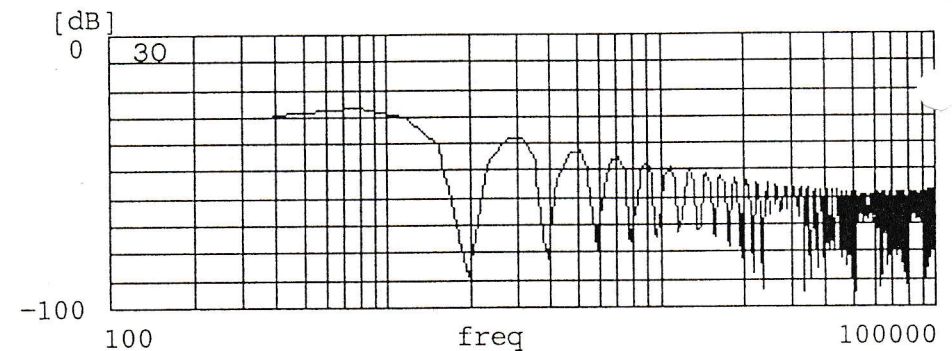


Fig. 30 Vervorming bij Ao=600, fo=50kHz, b=1/30, Ru=RL=4

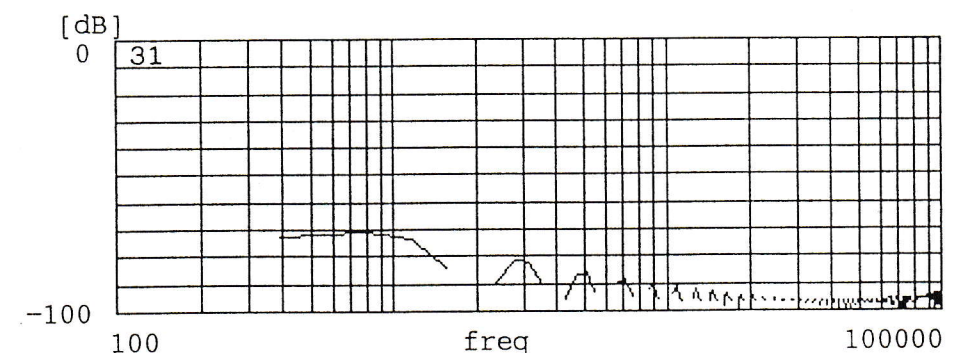


Fig. 31 Vervorming bij Ao=100.000, fo=20kHz, b=1/30, Ru=RL=4.

29 de spectrale samenstelling van de vervorming. Gerekend is hier met $A_0=6000$ en $f_3=5000\text{Hz}$. (Zie delen 1 en 2). Wat blijkt nu overduidelijk: de grondtoon van de blokgolf en de lagere harmonischen worden veel beter onderdrukt dan de hogere harmonischen van de blokgolf. Dus de spectrale samenstelling van de vervorming is fors gewijzigd. Een tweede berekening met $A_0=600$ en $f_3=50000\text{Hz}$ toont aan dat de harmonische structuur nu nauwelijks wijzigt. Zie figuur 30. Tot slot nog een berekening met $A_0=100000$ en $f_3=20000\text{Hz}$ zoals hiervoor als gunstige instelling werd aangenomen (figuur 31). Hier is duidelijk zichtbaar dat ondanks de hoge tegenkoppeling de harmonische structuur van de vervorming onaangetast is gebleven. Dit leidt tot de volgende conclusie: Conclusie 19: Als de openlusbandbreedte van een versterker laag (enige kHz) gekozen wordt, wijzigt de spectrale structuur van de vervorming onder invloed van de tegenkoppeling. Lagere harmonischen worden dan meer onderdrukt dan hogere. De maskerende invloed van de lagere harmonischen ten opzichte van de hogere neemt dan af. Dit kan leiden tot een hard en irritant klinkend geluidsbeeld. Bij een openlusbandbreedte groter dan 20kHz treedt, zelfs bij extreem hoge tegenkoppeling, dit effect niet op en behoudt de vervorming zijn oorspronkelijke spectrale structuur in de audioband.

Discussie

Men zou mogelijkerwijs de volgende tegenwerping bij conclusie 19 kunnen verwachten: "welliswaar verandert de spectrale structuur, maar de vervorming is toch veel zwakker geworden en daardoor minder hoorbaar?". Het antwoord op deze tegenwerping luidt mijns inziens dat vele onderzoeken en waarnemingen overduidelijk hebben aangevoerd dat het oor veel "dieper" in het geluidsbeeld kan luisteren dan we ooit zouden verwacht hebben. Het eenvoudige feit dat een 18 bits CD-speler een

veel betere klankdefinitie bezit (minder hard) dan een 16 bits CD-speler, toont al voldoende aan dat ons oor uiterst gevoelig is voor die kleinste geluidsstapjes. Dit betekent dat het van het grootste belang is dat de spectrale samenstelling van klanken en van vervorming gelijk blijft tot in het micro-signaalniveau.

Een tweede tegenwerping zou kunnen zijn: bij verhoging van de tegenkoppeling wordt de vervorming zo klein, dat deze onder de maskeringsdrempel komt van het hoofdsignaal. Ook hier voldoet weer een antwoord uit de praktijk. Als dit zou gelden, dan zou bij toename van tegenkoppeling het geluidsbeeld een zachter karakter moeten krijgen. De ervaring is juist omgekeerd!

Met behulp van conclusie 19 valt ook heel eenvoudig te verklaren waarom buizenversterkers, ondanks hun vaak hoge vervorming, zo'n aangenaam en acceptabel geluidsbeeld opleveren. De tegenkoppeling in buizenversterkers is vaak laag en daarom wordt de harmonische structuur van de vervorming nauwelijks aangetast. Dus tweede harmonischen maskeren derde, enzovoort. Vervorming is bij buizenversterkers met enige moeite waarneembaar, maar het stoort nauwelijks. Bovenstaand model verklaart dit verschijnsel.

Het is echt niet zo dat tegengekoppelde versterkers altijd slecht klinken. Binnen de beperking van de huidige tegenkoppeling streeft men naar het optimum en dat bereikt men door de openlus versterking niet te hoog te kiezen en door de vervorming zonder tegenkoppeling zo laag mogelijk te maken. Immers: hoe lager D_0 , des te evenredig kleiner A_0 gekozen kan worden. Hier komt weer een oude wijsheid uit de versterkerhistorie naar voren dat "zonder tegenkoppeling de versterker al helemaal goed moet klinken". Doordat A_0 niet al te groot is, zal men ook niet extreem tegenkoppelen en zal daardoor de al geringe vervorming weinig tot minimaal van karakter veranderen.

Slotconclusie

In deze drie studies zijn de voor- en nadelen van tegenkoppeling besproken. Als leidraad heeft steeds gegolden dat reken- en/of meettechnisch onderbouwd moest worden wat we subjectief ervaren. Brengen we de hele studie nu naar zijn essentie terug, dan blijkt het feit dat de versterker een beperkte openlus bandbreedte bezit de grootste "boosdoener" te zijn. Juist hierdoor is het versterkergedrag niet constant in het audiobereik. Nemen we ook nog aan dat de mens frequenties boven 20kHz op de een of andere manier kan waarnemen, dan wordt het helemaal duidelijk dat openlus bandbreedtes groter dan 20kHz zeer gewenst zijn. Tegenkoppeling op zich is niet onjuist. De voordelen daarvan zijn navenant en worden door iedereen erkend zolang we maar onder de openlus bandbreedte meten (zoals meestal gebeurd bij 1 kHz). Eisen we echter dat tot ruim 20kHz ALLE versterker eigenschappen constant zijn, dan wordt het construeren van goed werkende versterkers erg moeilijk en bijna onmogelijk volgens de huidige stand van de techniek. Tot slot: moderne ontwikkelingen bij sommige Hi-End versterkers gaan in de richting van versterkers die werken als een stroombron in plaats van als een spanningsbron of daar tussenin. De studie daarover stelt vraagtekens bij de formules 13 en 14 en ik hoop daarover later te kunnen berichten.

literatuurlijst:

- lit-1. D.R.G. Self; Science v. Subjectivism in Audio Engineering; Electronics & Wireless World; juli 1988; pp.692-696.
- lit-2. Andrew R. Collins; Testing Amplifiers with a Bridge; Audio-Our; March 1972.
- lit-3. Menno van der Veen; The Hafler Story; HomeStudio; 5/11; pp.28-30.
- lit-4. Menno van der Veen; Hafler verdedigt zijn visie; HomeStudio 6/5; pp.32-36.

Formule 8 in deel 2 is onjuist afgedrukt. Hier volgt de correcte versie. waarbij $Z(R_2//C_2)$ gelezen moet worden als de impedantie van de parallelschakeling van R_2 met C_2 . Verdere uitwerking van deze formule wordt aan de lezer overgelaten.

$$b(f) = \frac{R_1}{Z(R_2//C_2) + R_1}$$

IS EEN AUTOROUTER BETER DAN EEN PRINTONTWERPER?

Neel! Autorouters zijn weliswaar sneller, maar een goede printontwerper met een krachtig CAD-systeem is kwalitatief beter



Verkrijgbaar van een Low-cost DOS tot een 32 bit PC en SUN versies met onbeperkte ontwerpcapaciteit. In het bijzonder de REAL-TIME eigenschappen spreken de professionele ontwerper aan. Met ruim 10.000 gebruikers wereldwijd behoort ULTIboard tot de toonaangevende EDA-systemen. Vraag de gratis demo-disk!



(NL) Energiestraat 36 • 1411 AT Naarden • Tel. 02159-44444 • Fax -43345
 (B) Kard. Mercierplein 1 • 2800 Mechelen • Tel. 015-401895 • Fax -401879

• VAN CONCEPT TOT PLOT IN ÉÉN DAG •

Naar aanleiding van de serie artikelen van ir. Menno van der Veen over tegenkoppeling (RB 11 1993 en 12 1993 en in dit nummer deel 3) is een voor de lezer interessante reactie binnengekomen, die wij u dan ook niet willen onthouden.

Geachte RB-redactie

Dit is een reactie op het tweede deel van de artikelenserie van ir. Menno van der Veen, 'Tegenkoppeling van de werkelijkheidsweergave?' In RB-Elektronica van december 1993. Alhoewel de poging van ir. Van der Veen om zijn luisterervaring te onderbouwen met technische ideeën zeer aan te moedigen is, zijn wij het in de meeste opzichten met dit artikel oneens, en denken wij dit ook redelijk te kunnen beargumenteren.

Wij zijn het met ir. Van der Veen eens dat een dempingsfactor van 15 voldoende is, mits de impedantiekenmerken van de aangesloten luidsprekers niet al te gruwelijk zijn. Helaas worden er tegenwoordig elektrostaten op de markt gebracht met impedantieminima van 0,4 ohm...1 ohm rond 20 kHz ([1], [2]), die dus wel extreme eisen aan de dempingsfactor rond 20 kHz stellen.

Ook met conclusie 9, dat testresultaten bij 1 kHz niet veel zeggen, zijn wij het eens.

Wat de gevoeligheid voor afwijkende belastingsimpedanties betreft: in het algemeen is een tegengekoppelde versterker wat dit betreft beter dan een niet of minder tegengekoppelde versterker, dit komt ook tot uiting in de hogere dempingsfactor.

Overigens vermoeden wij dat er een foutje gemaakt is bij het berekenen van fig. 11 en fig. 14 van het artikel, waarschijnlijk is hier het product van het reële deel van de uitgangsadmittantie en 8 ohm uitgezet. Wanneer we van de modulus uitgaan of van het reële deel van de uitgangsimpedantie uitgaan, vinden we een verhouding van 24,37 resp. 96,82 bij 20 kHz voor de zwaar tegengekoppelde versterker. Voor de minder tegengekoppelde versterker wordt dit 9,748 resp. 10,46 bij 20 kHz. Eerlijk gezegd is het ons niet bekend of de dempingsfactor nu de verhouding tussen 8 ohm en de modulus van de impedantie of de verhouding tussen 8 ohm en het reële deel van de impedantie is, maar het reële deel van de admittantie heeft er in ieder geval niets mee te maken.

Gewoonlijk geven alleen belastingen die tot op hoge frequenties zwaar capacitef zijn meer problemen bij tegengekoppelde versterkers. Helaas heeft ir. Van der Veen niet vermeld wat voor model hij gebruikt heeft voor de luidsprekerimpedantie, maar we vermoeden

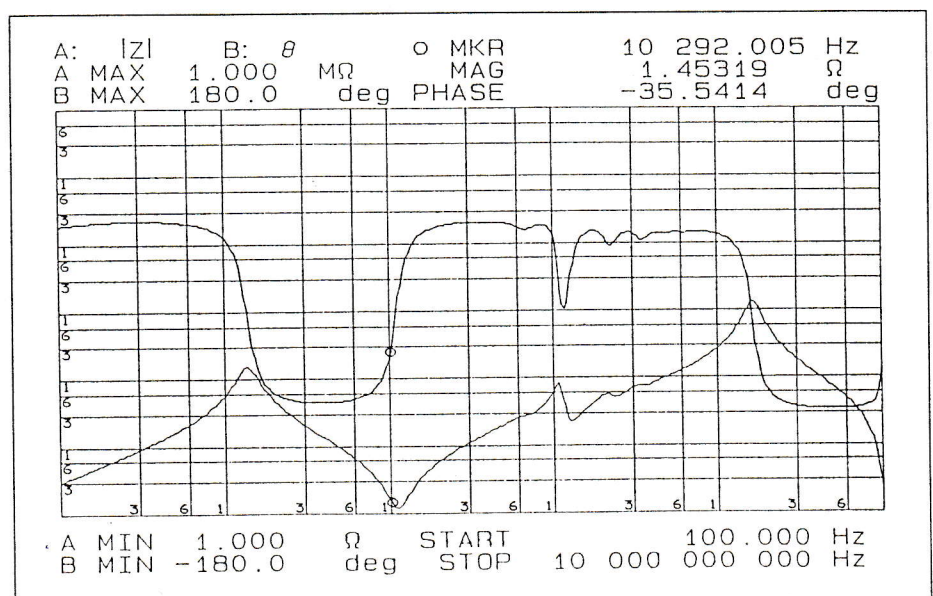
dat het op een eenvoudig RC-parallelnetwerk lijkt (met 2,55 μF // 4,5 ohm vinden wij ongeveer dezelfde karakteristieken als in het artikel, met 2 μF // 8 ohm komt het ook al aardig in de buurt). Dergelijke modellen zijn volgens ons geen realistische weergave van de impedantie van een elektrostatische luidspreker. In het gebied van grofwerk 2 tot 10 kHz hebben sommige elektrostatische luidsprekers een impedantie die ruwweg met een condensator van 10 μF overeenkomt ([1], [2]). Rond 20 kHz treedt er vaak een serieresonantie op, en daarboven begint de spreidingsinductie van de trafo te overheersen. Wat er ruim boven de audioband gebeurt wordt helaas meestal niet gespecificeerd. Ir. Giel Bremmers heeft metingen uitgevoerd met een hp4194 impedance/gain-phase analyzer aan een Uher BV.5A2 trafo met 1 nF belasting. (Omdat er geen elektrostaat beschikbaar was, heeft hij een gewone

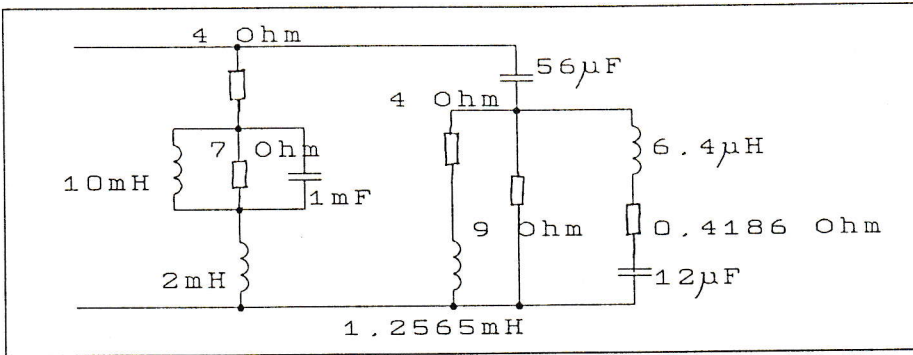
Figuur 1 De impedantie van een trafo met capacitieve belasting, de onderste lijn is de modulus, de bovenste de fase.

uitgangstrafo van een buizenversterker ('verkeerd' geschakeld) met een condensator gebruikt.) Deze metingen laten zien dat de impedantie tot ongeveer 3 MHz inductief blijft, en daarna met een capaciteit van rond 100 pF overeenkomt. Als we een extra condensator van 270 pF parallelschakelen om de kabel na te bootsen, wordt de impedantie rond 1,5 MHz capacitef. Zie onze figuur 1.

Een voorbeeld van een luidspreker met een gruwelijke impedantiekenmerken is de Van Medevoort EE 1.25 elektrostaat met dynamische EB 0.5 baskast. We hebben een model opgesteld voor de impedantie van deze luidspreker dat de impedantiecurve in [1] aardig benadert (zie onze figuur 2). Om de parasitaire capaciteit en de kabelcapaciteit te modelleren is een parallelcondensator van 1 nF toegevoegd. Computerberekeningen met dit model en met het versterkermodel van ir. Van der Veen laten een piek van +1,5 dB zien rond 13 kHz en een minimum van -4,3 dB rond 25 kHz, bij hogere frequenties ziet de kromme er redelijk netjes uit. Als A_0 wordt verlaagd tot 600 en f_{-3} wordt verhoogd tot 50 kHz zijn er diverse pieken en dalen te zien, de hoogste piek is +0,9 dB bij 49 Hz en het diepste dal is -8 dB bij 20 kHz. Zie ook onze figuren 3 en 4, de overdracht bij 0 Hz is gelijkgesteld aan 0 dB.

Overigens hebben transistorversterkers zonder over-all-tegenkoppeling gewoonlijk wel lokale tegenkoppeling in de eind-



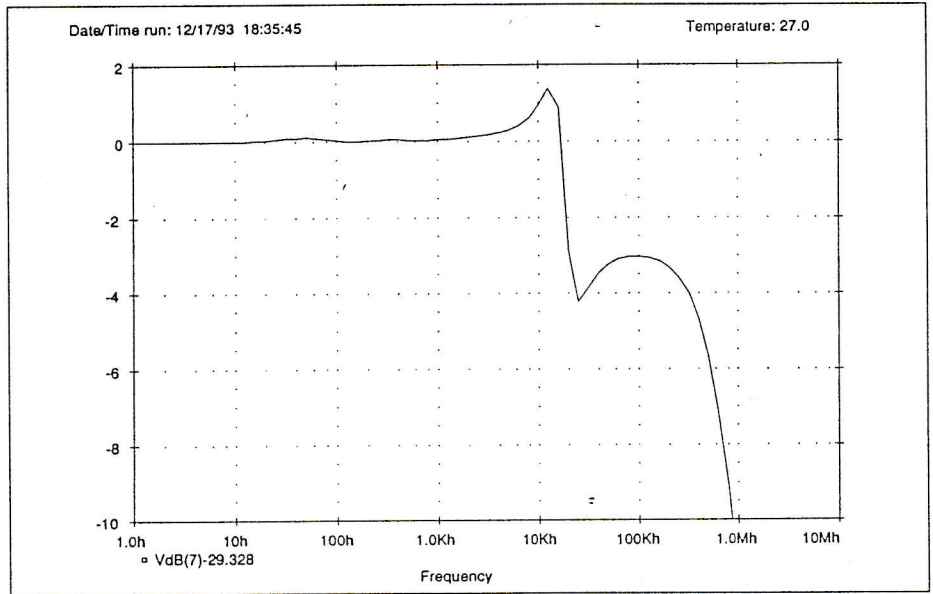


Figuur 2 Een model voor de impedantie van de EB/EE-luidsprekers

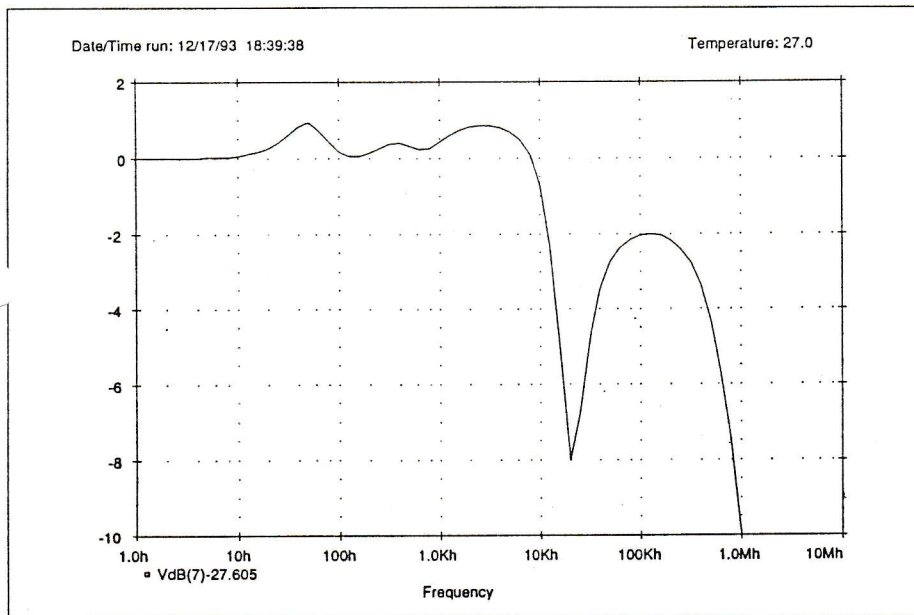
trap, transistorversterkers zonder enige vorm van tegenkoppeling zijn bij ons niet bekend. Zo kan men bijvoorbeeld een Darlington-emittervolger (die men veelvuldig in push-pullconfiguraties aantreft) zien als een tweetraps versterker die als spanningsvolger is tegengekoppeld (zie onze figuur 5 a, b en c) [3].

In figuur 5a staat een Darlington-emittervolger, in figuur 5b een vervangings-schema voor deze emittervolger en in figuur 5c is het gedeelte dat in figuur 5b tussen streepjes staat weergegeven door een versterkersymbool. Ook de alternatieve compound-schakeling kan men als een tweetraps lokaal tegengekoppelde versterker zien.

Aangezien de eindtrap vaak al uit zichzelf een tweetraps-tegengekoppelde versterker is, moet men ook bij verster-



Figuur 3 Een zwaar tegengekoppelde versterker.



Figuur 4 Een licht tegengekoppelde versterker.

kers die niet of nauwelijks over-all-tegenkoppeling hebben uitkijken voor instabiliteit bij capacatieve belasting.

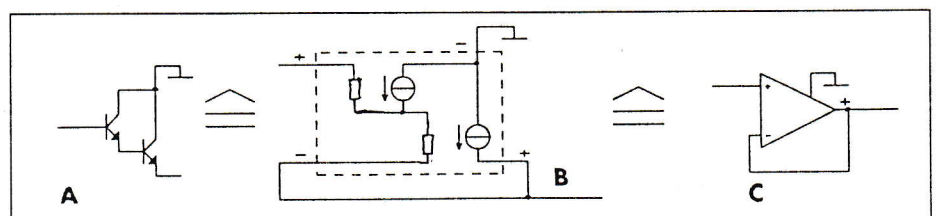
De stabiliteitsproblemen vallen aanzienlijk te verminderen door een uitgangsfILTER te gebruiken, zoals in veel versterkers dan ook gebeurt. Dergelijke filters bestaan meestal uit een spoel, een condensator en één of twee weerstan-

den. Een dergelijk filter heeft één nadeel: als gevolg van het uitgangsfILTER begint de uitgangsimpedantie nog wat eerder te stijgen, dit kan in bepaalde gevallen tot grotere resonantiepieken aanleiding geven dan zonder filter wanneer men meet achter het filter. De overdracht tot vlak voor het uitgangsfILTER wordt gewoonlijk echter aanzienlijk mooier.

Op het 'De versterker ziet geen muziek!'-verhaal kunnen wij zeggen dat dit

ook niet de bedoeling is. Het is bij een tegengekoppelde versterker de bedoeling dat het uitgangssignaal bij zo goed mogelijke benadering gelijk wordt aan het ingangssignaal gedeeld door de overdracht van het tegenkoppelnetwork.

In dat geval kan de overdracht door een klein aantal nauwkeurige en goed lineaire passieve componenten worden vastgelegd, en heeft het onnauwkeurige en niet-lineaire actieve deel weinig invloed. Dit betekent dat het foutsignaal V_s bij zo goed mogelijke benadering nul moet zijn. Wanneer men nu naar fig. 19, fig. 20 en fig. 21 van het artikel van ir. Van der Veen kijkt, ziet men dat het in alle drie de gevallen kort na een zeer snelle verandering van het ingangssignaal mis gaat. In fig. 19 komt het foutsignaal echter weer snel in de buurt van de ideale waarde (nul), terwijl het in fig. 21 groot blijft. De piekwaarde van V_s kan volgens Garde [4] bij een tegengekoppelde versterker die een ongefilter-



Figuur 5 Een Darlington-emittervolger als tegengekoppelde versterker.

de blokgolf moet verwerken groter worden dan bij een versterker die niet of nauwelijks ($Ab \ll 1$) tegengekoppeld is, maar dit scheelt slechts een factor twee.

Muzikale transiënten hebben in tegenstelling tot blokgolven altijd een vrij grote stijgtijd van enige tientallen microseconden of langer ([5], [6]). Bij signalen met een relatief grote stijgtijd kan de tegenkoppeling ook tijdens de transiënt het foutsignaal klein houden en een forse verbetering van de lineariteit geven.

Merk op dat de vervorming van de ingangstrap in principe afhangt van de bouw van deze trap en van de absolute grootte van het signaal dat deze trap moet verwerken, zodat er geen reden is om te gaan normeren naar een blokgolfrestand. Wanneer men het foutsignaal wel normeert naar het blokgolfrestand komt men op dezelfde foute conclusies uit die Ojala in 1970 al trok [7] en die naar onze mening door de artikels van Garde ([4], [8], [6]) ontzenuwd zijn. Garde heeft ontwerpcriteria afgeleid waarmee men zwaar tegengekoppelde versterkers kan ontwerpen die bij willekeurige amplitude-begrensd ingangssignalen nooit intern begrenzen. (Met 'intern begrenzen' bedoelen wij het vastlopen van een trap in de versterker zonder dat de eindtrap vastloopt.)

Merk verder op dat versterkers met een spanningsuitgang last kunnen krijgen van TIM als de belasting zwaar capacitef is, of ze nu over-all-tegenkoppeling hebben of niet. Zo treedt er als de versterker bij een snel veranderend ingangssignaal de stroom begrenst slewing op, wat een extreme vorm van TIM is.

Al met al blijken de objectieve argumenten van ir. Van der Veen niet erg overtuigend te zijn. Wat over blijft zijn de subjectieve argumenten: hij heeft de indruk dat versterkers met een openlusbandbreedte van een sterkere L.F.-tegenkoppeling. Volgens ir. Van der Veen zou dit verband kunnen houden met de kleinere variaties van de vervorming van de versterker over de audioband. (Merk op dat de frequentieafhankelijke belastingsimpedantie er voor zorgt dat van een echt constante vervorming geen sprake zal zijn. Ook zullen, als de lusversterking bij 20 kHz begint af te vallen, vervormingscomponenten boven 20 kHz minder onderdrukt worden dan vervormingscomponenten binnen de audioband.) Er zijn echter nog een aantal andere verklaringen denkbaar, zoals:

A. Als ir. Van der Veen bij zijn luistertest geen grondige maatregelen tegen suggestie (bijvoorbeeld dubbelblind testen [9]) heeft genomen, is het niet verbaasd dat versterkers met een grote open-lusbandbreedte beter be-

oordeeld worden. In audiofiele kringen wordt namelijk ten onrechte nog vaak gedacht dat versterkers met een lage open-lusbandbreedte en veel tegenkoppeling altijd een slecht transiëntgedrag hebben. Wanneer iemand uit deze kringen naar een versterker luistert waarvan hij weet dat de open-lusbandbreedte laag is, zal hij deze versterker sneller slecht beoordelen dan wanneer hij niet geweten zou hebben hoe groot de open-lusbandbreedte is (of zou hebben gedacht dat deze bandbreedte groot was). Overigens worden bijvoorbeeld Accuphase-eindversterkers vaak wel goed beoordeeld, alhoewel ze stroomgestuurde vermogens-MOS-sourcevolgers als drivertrap hebben [10] en daardoor nooit een erg grote open-lusbandbreedte kunnen hebben.

B. Versterkers die minder tegengekoppeld zijn zullen gewoonlijk meer vervormen. Wanneer dit een soort vervorming is die lekker in het gehoor ligt, is het heel goed mogelijk dat het vervormde signaal beter klinkt dan het origineel (denk aan de overstuurde buizenversterkers die mensen die elektrische gitaar spelen gebruiken). In dat geval heeft het echter weinig met werkelijkheidsweergave te maken, maar meer met effectapparatuur.

C. Als de versterkers met grote en kleine openlus-bandbreedte die men vergelijken wil ook op andere punten van elkaar verschillen, zegt de vergelijking erg weinig. Voor een eerlijke vergelijking zou men dan ook het beste een versterker kunnen gebruiken waarbij de open-lusbandbreedte kan worden vergroot door een weerstand parallel te schakelen aan de capaciteit die de meest dominante pool veroorzaakt. Voor zover wij weten is een dergelijk onderzoek nog nooit gepubliceerd.

Wanneer iemand harde bewijzen heeft dat de verklaring van ir. Van der Veen klopt of dat onze opmerkingen niet kloppen, en dat een wat hogere maar minder frequentieafhankelijke vervorming dus echt minder irritant klinkt, is het subjectieve 'het "hoort" minder stressig'-argument een goede reden om een openlus-bandbreedte van 20 kHz te kiezen.

Conclusie

Ir. Menno van der Veen heeft gelijk als hij schrijft dat specificaties bij 1 kHz niet veel zeggen. Zijn theoretische argumenten tegen tegenkoppeling / tegen zware over-all-tegenkoppeling zijn echter niet overtuigend.

Het subjectieve argument dat versterkers met een grote open-lusbandbreedte minder 'stressig' klinken is ook niet

overtuigend, aangezien het niet duidelijk is hoe betrouwbaar de luistertest zijn uitgevoerd (dubbelblind, enkel blind, helemaal niet blind, bestaan er nog andere verschillen tussen de versterkers?). Als bij betrouwbare luistertest regelmatig hetzelfde resultaat zou worden gevonden, zou dit echter wel een goede reden kunnen zijn om een open-lusbandbreedte van 20 kHz te kiezen, ondanks de technische nadelen hiervan (onder andere grotere L.F.-vervorming). Een audioversterker is nu eenmaal bedoeld om naar te luisteren.

Met dank aan Joep Bosch en ir. Giel Bremmers voor hun bijdrage aan deze brief.

ir. Marcel van de Gevel
ir. Richard Visée

[1] Hans Beekhuizen, 'Van Medevoort EB/EE elektrostaten: Lastig maar het loont', *HIFI Video Test 6*, 1990

[2] Menno van der Veen, 'Het 'finale' op elektrostaat-gebied?', *Home Studio*, nummer is ons helaas niet bekend

[3] Ernst H. Nordholt, *Design of high-performance negative-feedback amplifiers*, Delftse Uitgevers Maatschappij, Delft, 1993, ISBN 90 6562 142 3 cip, eerder uitgegeven door Elsevier, Amsterdam en New York, 1983

[4] Peter Garde, 'Transient Distortion in feedback amplifiers', *Journal of the Audio Engineering Society*, vol. 26, nr. 5, mei 1978, pag. 314...321, oorspronkelijk gepubliceerd in *Proceedings of the IREE Australia*, vol. 38, oktober 1977, pag. 151...158

[5] Robert R. Cordell, 'Comments on "A method for measuring Transient Intermodulation Distortion (TIM)", *JAES*, vol. 27, nr. 4, april 1979, pag. 295...297

[6] Peter Garde, 'Amplifier first-stage criteria for avoiding slew-rate limiting', *JAES*, vol. 34, nr. 5, mei 1986, pag. 349...353

[7] Matti Ojala, 'Transient distortion in transistorized audio power amplifiers', *IEEE Transactions on Audio and Electroacoustics*, vol. AU-18, no. 3, september 1970, pag. 234...239

[8] Peter Garde, 'Slope distortion and amplifier design', *JAES*, vol. 26, nr. 9, september 1978, pag. 602...608, oorspronkelijk gepubliceerd in *Proceedings of the IREE Australia*, vol. 38, no. 12, december 1977, pag. 200...207

[9] Stanley P. Lipshitz & John Vanderkooy, 'The great debate: subjective evaluation', *JAES*, vol. 29, nr. 7/8, juli/augustus 1981, pag. 482...491

[10] Accuphase consumentenfolder 1990, hierin is het schema van de eindversterker opgenomen