

## **Waarom klinken versterkers verschillend?**

Dr. Hans R.E. van Maanen (Temporal Coherence)

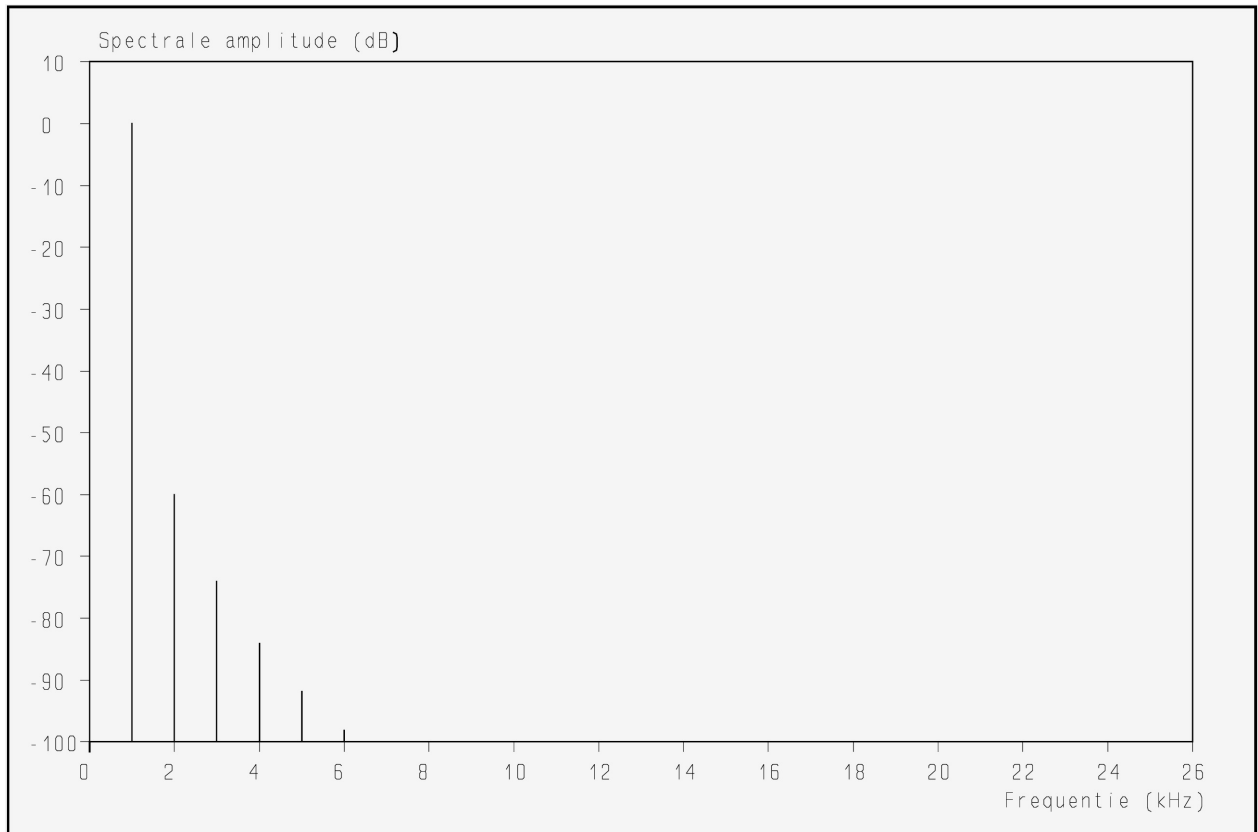
30 augustus 2015

---

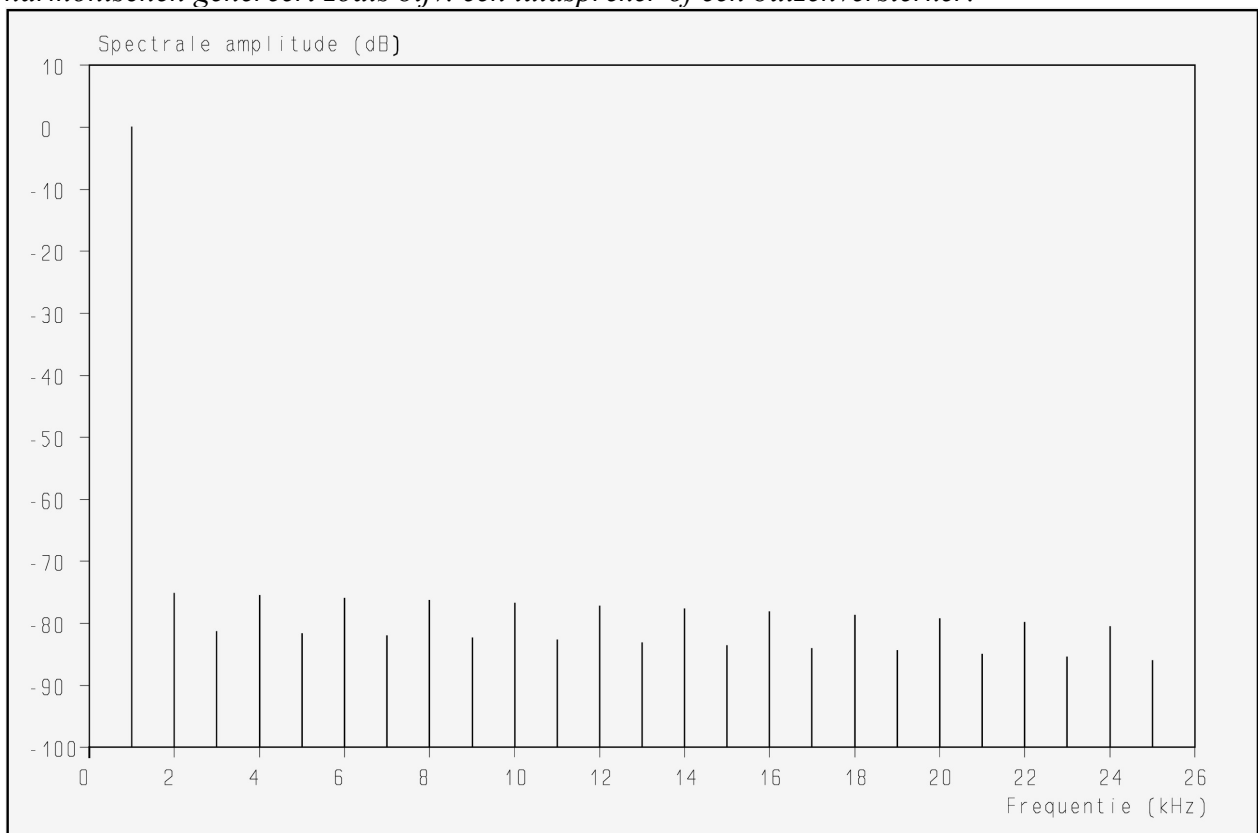
### **1. Inleiding**

Eindversterkers zijn een essentieel onderdeel van de weergaveketen. En hoewel halfgeleiderversterkers al meer dan 60 jaar gebruikt worden, gaan de ontwikkelingen nog steeds door. De vervormingscijfers van “high-end” vermogensversterkers zijn zeer indrukwekkend (bijv. < 0,001% harmonische vervorming) en zijn orden van grootte beter dan die van microfoons en luidsprekers. Desondanks, als het op luisteren aankomt, worden verschillen tussen versterkers waargenomen, hoewel luidsprekers gebruikt worden die veel hogere vervormingscijfers hebben. In deze notitie zal ik een aantal aspecten bediscussiëren die een rol spelen bij dit –op het eerste gezicht onbegrijpelijke- verschijnsel, zij het dat ik maar een deel van de puzzel zal behandelen. Niet alle waargenomen verschillen kunnen worden verklaard met de punten die ik naar voren zal brengen, gedeeltelijk omdat ik ook niet alles weet en gedeeltelijk omdat, denk ik, nog niet alle oorzaken achterhaald zijn. Gelieve daarom dit als een bijdrage aan de discussie te beschouwen, niet als het finale antwoord op deze complexe vraag. Bijdragen van anderen zijn daarom van harte welkom, want, zoals het spreekwoord zegt, “twee weten er meer dan één”.

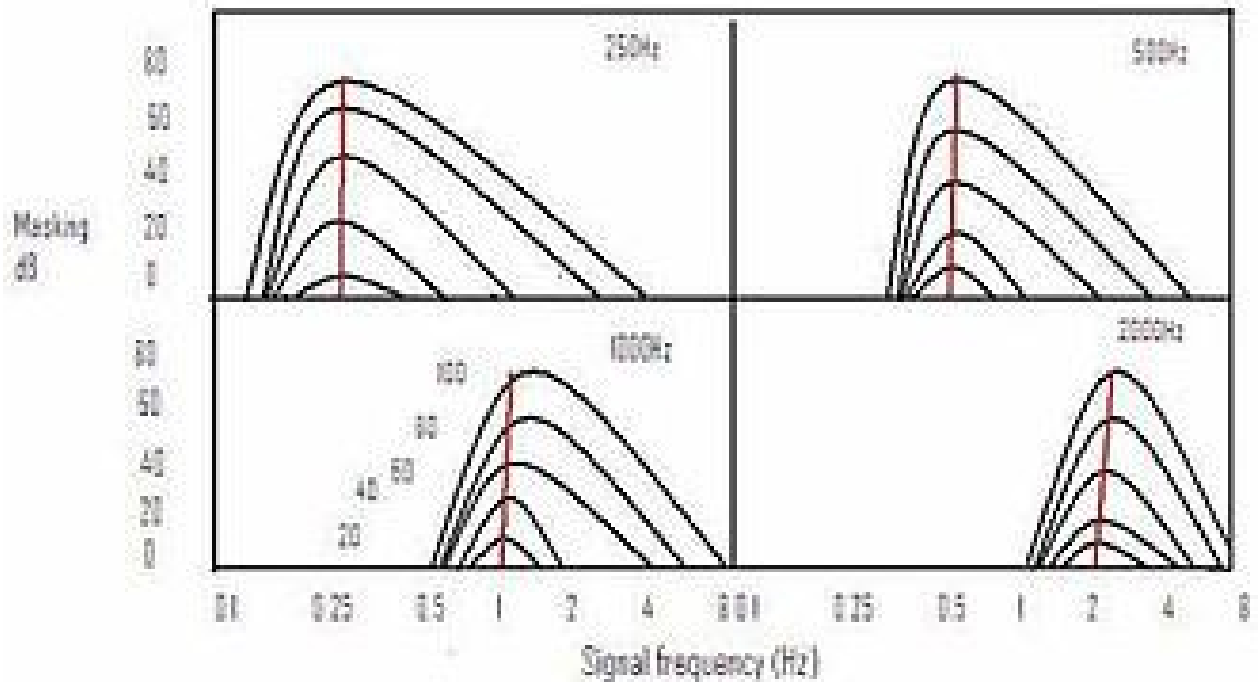
Eén van fundamentele problemen is dat we de vervorming in een enkel getal willen “vangen”. Maar je kunt je afvragen of dat wel mogelijk is. Om een eenvoudig voorbeeld te geven: zou het gehoormatige effect van 1% vervorming van uitsluitend 2<sup>e</sup> harmonische net zo waarneembaar en storend zijn als 0,1% harmonische vervorming van de 2<sup>e</sup> t/m 11<sup>e</sup> harmonische? Of vergelijkbaar zijn met 1% vervorming van alleen de 10<sup>e</sup> harmonische? Ik weet het antwoord ook niet (omdat ik het nooit heb kunnen proberen omdat zo’n vergelijking erg moeilijk te realiseren is), maar er is een ander voorbeeld: buizenversterkers worden vaak geprezen om hun muzikale kwaliteiten, hoewel hun vervormingscijfers gruwelijk zijn, vergeleken met die van halfgeleiderversterkers. Zijn er overeenkomsten in de eigenschappen van de vervorming tussen buizenversterkers en luidsprekers? Zowaar, die is er: beiden produceren voornamelijk lagere harmonischen (tot aan de 5<sup>e</sup>) met vrijwel geen bijdrage van de harmonischen daarboven, zoals is geïllustreerd in figuur 1. Halfgeleiderversterkers daarentegen genereren heel veel hogere harmonischen, weliswaar op een laag niveau, zoals te zien is in fig. 2. In de literatuur over de eigenschappen van het menselijk gehoor, is er consensus dat ons gehoor frequenties relatief dichtbij de exciterende toon beter maskeert dan frequenties die er verder vandaan liggen. Of, met andere woorden, de lagere harmonischen worden gemakkelijk gemaskeerd door de exciterende toon, de hogere harmonischen daarentegen niet, zoals te zien is in fig. 3. Daar komt bij dat meeste mechanische muziekinstrumenten slechts boventonen genereren tot de 5<sup>e</sup> harmonische van de grondtoon, dus de vervormingsproducten introduceren slechts een kleine verandering in de verhouding van de boventonen, gewoonlijk minder dan die, veroorzaakt door de lineaire vervorming van luidsprekers. Het is dan ook niet verwonderlijk dat elektronica die slechts lage harmonischen opwekt minder irriteert dan elektronica die hoge harmonischen genereert, zelfs als die op een lager niveau liggen. Dus het vervormingscijfer van een versterker is –op zichzelf- van weinig nut. Een spectrale specificatie zou beter bruikbaar zijn, maar deze wordt zelden verstrekt.



**Figure 1:** *Spectrum van het signaal van een component welke hoofdzakelijk lagere harmonischen genereert zoals bijv. een luidspreker of een buizenversterker.*

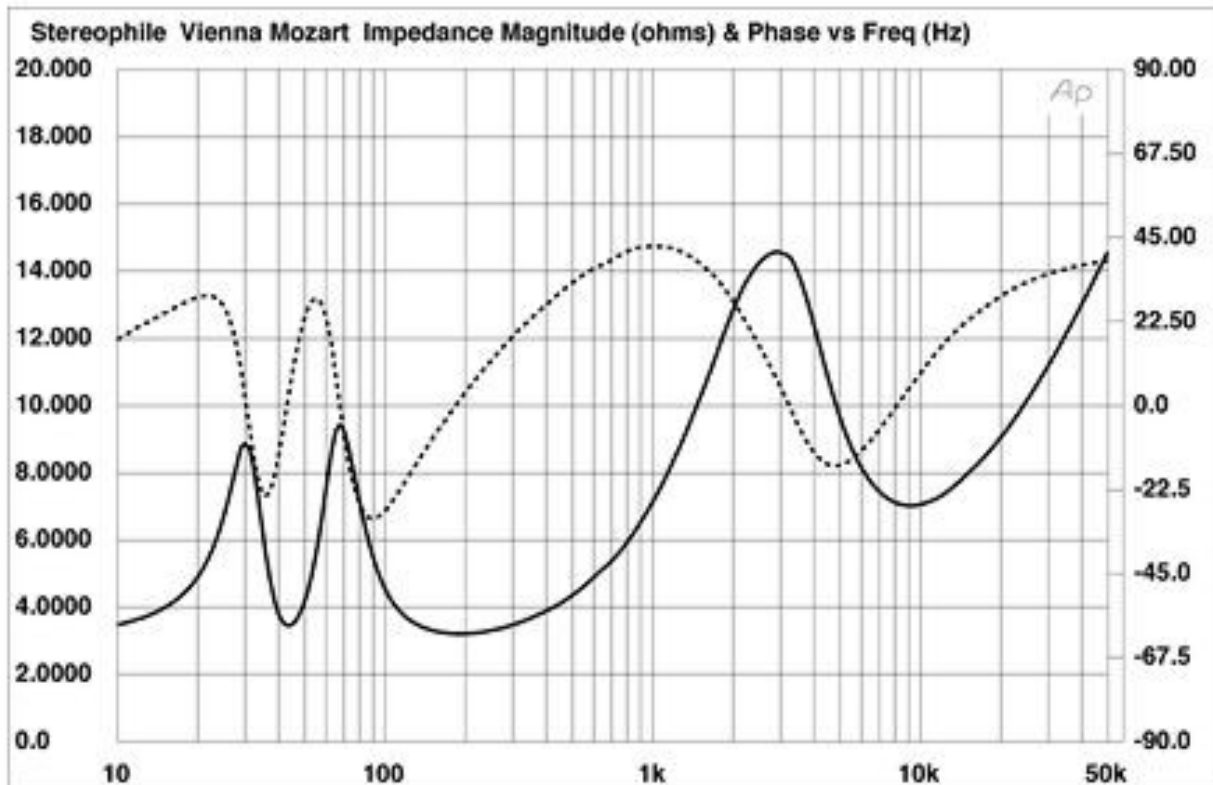


**Figure 2:** *Spectrum van het signaal van een component welke veel hogere harmonischen genereert, zij het op een lager niveau, zoals bijv. een halfgeleiderversterker.*

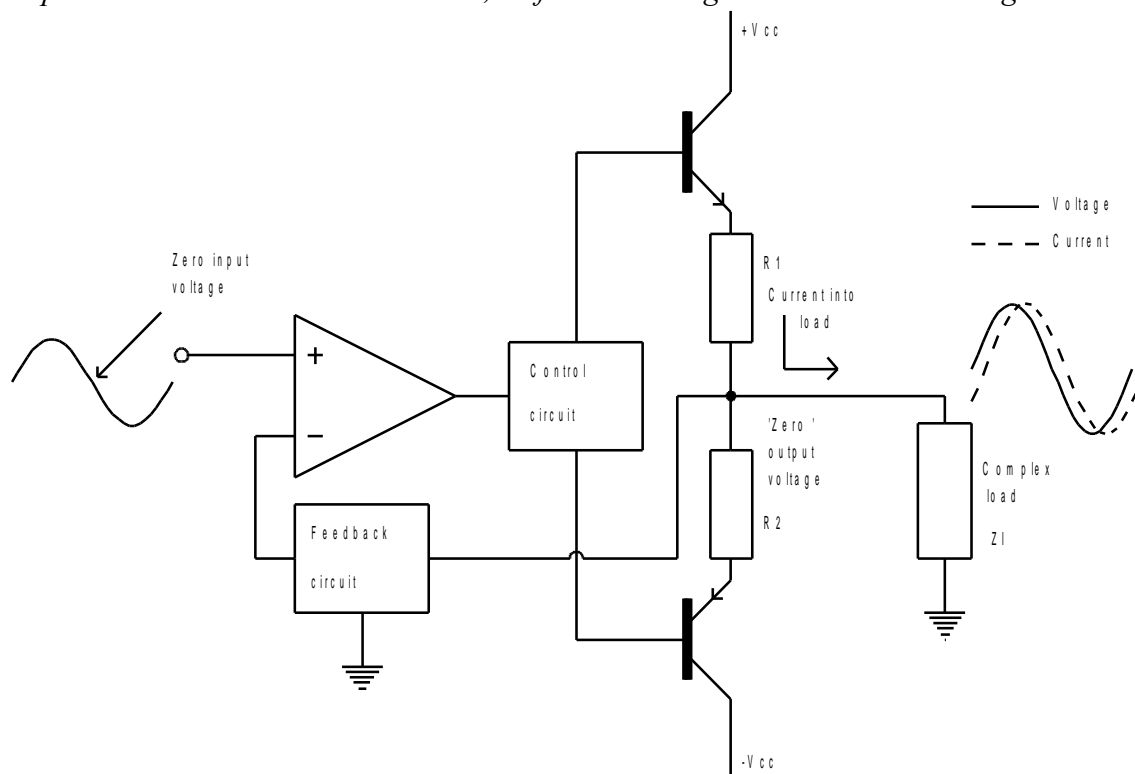


**Figure 3:** Maskeringscontouren van het menselijk gehoor (van het Internet). Rood = exciterende toon, zwart = markerende contouren op verschillende niveaus.

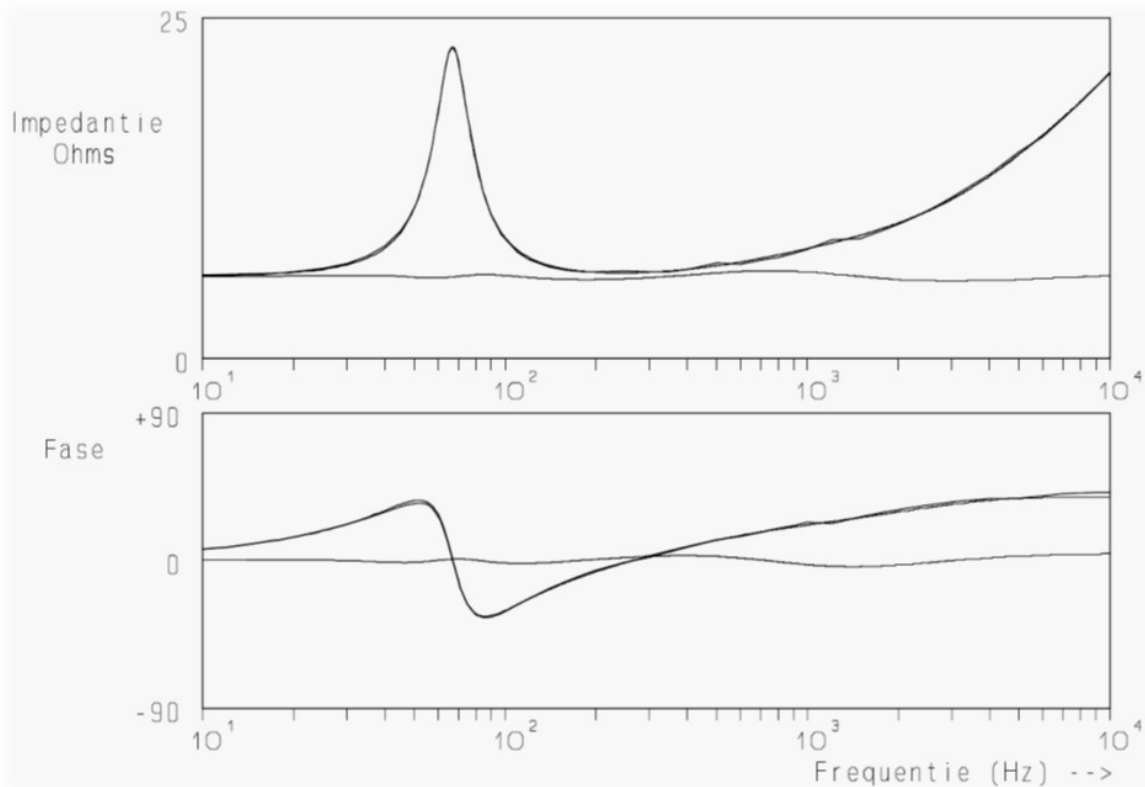
De vervormingsmeting van vermogensversterkers wordt gewoonlijk uitgevoerd met een zuivere weerstand als belasting. Dit betekent dat de uitgangsspanning en de uitgangsstroom altijd in fase zijn. Maar met realistische belastingen, zoals luidsprekers, is dit niet het geval. De absolute waarde (modulus) van de impedantie kan gemakkelijk met een factor vijf (!) variëren en de fasehoek tussen spanning en stroom kan meer dan 45 graden bedragen (zie fig. 4), hetwelk, in het algemeen, repercussies heeft op de gedragingen van de versterker en dus op zijn specificaties. Dit is te begrijpen door het basisontwerp van een vermogensversterker, zoals te zien is in fig. 5, te bestuderen. Neem de nuldoorgang van de spanning aan de uitgang. Als door een faseverschuiving tussen spanning en stroom de laatste niet nul is, moet één van de twee uitgangstransistoren deze stroom leveren. Maar dat is alleen mogelijk als een foutspanning aan de uitgang één van de uitgangstransistoren “open” zet. Op deze wijze wordt vervorming geïntroduceerd en dit effect heeft de neiging om overnemingsvervorming te benadrukken, die er om bekend staat als irritant te worden ervaren door zijn brede spectrale distributie van de harmonischen zoals getoond in fig. 2. Klasse A versterkers zijn veel minder gevoelig voor dit verschijnsel (domweg omdat er altijd stroom loopt door de uitgangstransistoren), maar deze zijn erg inefficiënt, worden daardoor erg heet, waardoor hun levensduur wordt bekort. Ik ben van mening dat het beter is om “impedantiecompensatie” toe te passen zodat de belasting voor de versterker veel dichter bij de ontwerp-belasting komt (en de versterker beter aan zijn specificaties voldoet!). Dit vereenvoudigt ook het ontwerp van het scheidingsfilter, dat daardoor betere eigenschappen krijgt. Een dergelijke compensatie is te zien in fig. 6. Kortweg, de wijze waarop de versterker complexe belastingen kan aansturen en de eigenschappen van de belasting zelf, kunnen een majeure invloed hebben op de gehoormatig ervaren kwaliteit van versterkers, zelfs als de specificaties identiek zijn.



**Figure 4:** Impedantie zoals gemeten en gepubliceerd door Stereophile. Merk op dat de impedantie varieert tussen 3 en 15  $\Omega$ , de fasehoek slingert tussen -30 en +45 graden.



**Figure 5:** Basisontwerp van een halfgeleider vermogensversterker. Let op de noodzaak van een foutspanning om stroom te kunnen leveren als spanning en stroom niet in fase zijn.



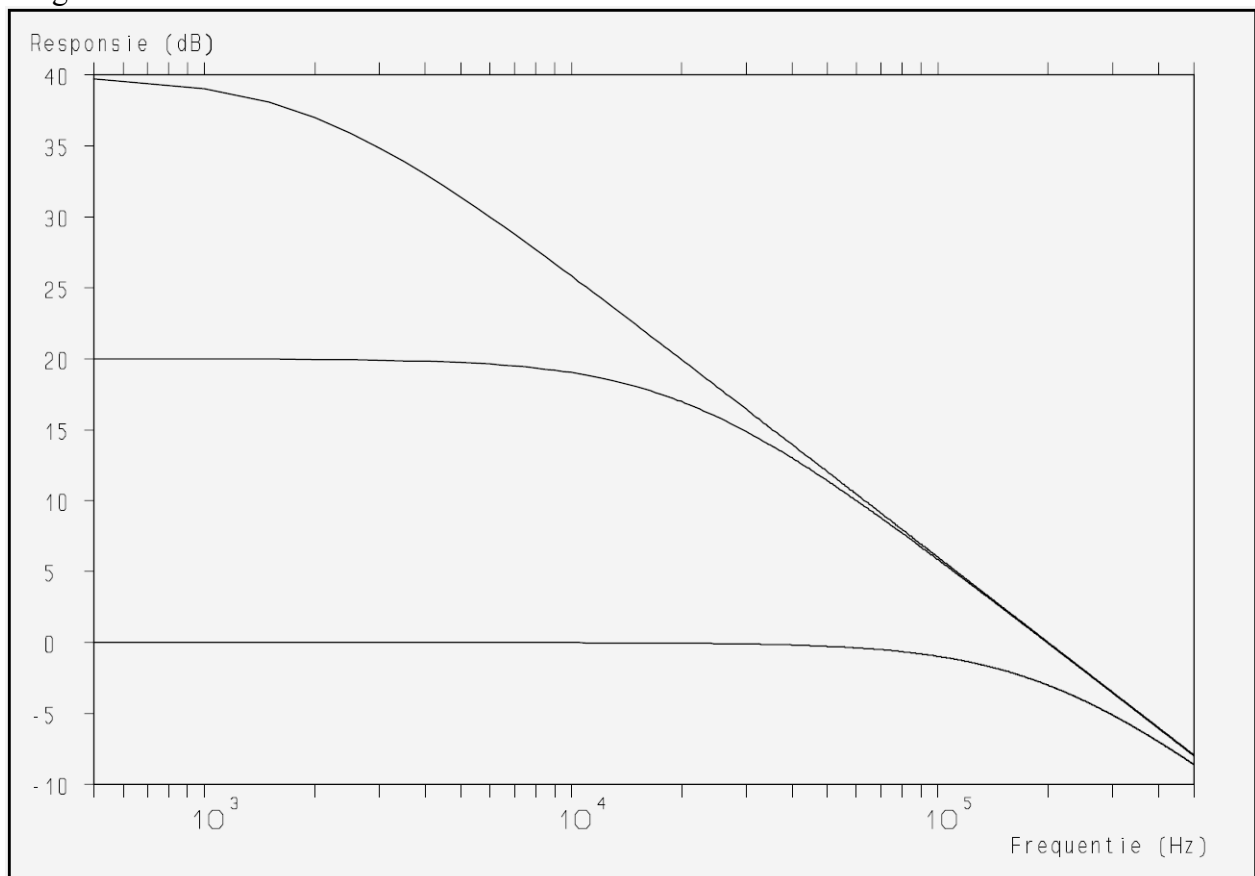
**Figure 6:** *Impedantiecompensatie van electro-dynamische luidsprekers. Bovenste blok: gemeten, gemodelleerde en gecompenseerde impedantie, onderste blok: idem voor de fase. Het oorspronkelijke artikel kan gevonden worden op [www.temporalcoherence.nl/papers](http://www.temporalcoherence.nl/papers).*

De vervorming wordt ook beïnvloed door terugkoppeling, zowel “lokale” als “integrale”. Er bestaan echter een aantal misverstanden over terugkoppeling. Als de ontwerper niet goed weet wat hij (m/v) aan het doen is kan het middel erger zijn dan de kwaal. Terugkoppeling kan behulpzaam zijn om de kwaliteit verder te verbeteren, maar in de eerste plaats moet de kwaliteit van het ontwerp al zo hoog mogelijk zijn voordat terugkoppeling wordt toegepast. De voornaamste reden hiervoor is dat het niet mogelijk is om de terugkoppelfactor tot elk gewenst niveau op te voeren. Laat me proberen om dit in meer detail toe te lichten.

Elk systeem (dus ook een versterker) kan instabiel worden (gaan oscilleren) als terugkoppeling wordt toegepast. Regeltheorie beschrijft dit verschijnsel en in het kort komt het erop neer dat aan de volgende voorwaarden voldaan dient te zijn:

- De “open-lus versterking” (= versterking zonder terugkoppeling) moet afnemen met (bij voorkeur) 6 dB/oct.
- De “gesloten-lus versterking” (= versterking met terugkoppeling) kan vrij worden gekozen (zij het dat in de praktijk er grenzen zijn vanwege de eigenschappen van de componenten), maar het wordt aanbevolen om de bandbreedte te beperken tot zeg 200 kHz om interferentie met lange golf radio uitzendingen te vermijden.
- The verhouding tussen de “open-lus” en “gesloten-lus” versterkingen is de terugkoppelfactor. De vervorming wordt onderdrukt met de terugkoppelfactor.
- Het is wenselijk dat de “open-lus versterking”, en dus ook de terugkoppelfactor, constant is in the audioband tot 20 kHz.

Deze vereisten / wensen betekenen dat de terugkoppelfactor tot ongeveer een factor 10 (= 20 dB) beperkt moet blijven zoals te zien is in fig. 7 om te voorkomen dat de ongewenste distributie van harmonischen, zie fig. 2, ontstaat. Dit betekent ook dat de onderdrukking van de vervorming tot een factor 10 beperkt blijft, dus een lage “startwaarde” is vereist om de uiteindelijke waarde op “high-end” specificatie te krijgen. Merk op dat het mogelijk is om de terugkoppelfactor op te krikken tot een factor 200 bij 1 kHz door een andere tijdconstante voor het afvallen van de open-lus versterking te kiezen. Daardoor wordt de vervorming bij 1 kHz (de frequentie waarbij de vervorming gewoonlijk wordt gemeten en gespecificeerd) een factor 20 lager, maar ten koste van een toename van de hogere harmonischen in de vervormingsbijdrage. Het is niet echt verbazingwekkend dat versterkers met een constante terugkoppelfactor in de audioband hoger scoren op zaken als “muzikaliteit en “hardheid van het geluid”.



**Figure 7:** Verschillen tussen open-lus en gesloten-lus versterkingen. Bovenste lijn: open-lus versterking met een terugkoppelfactor van 40 dB, middelste lijn: open-lus versterking met een terugkoppelfactor van 20 dB en de onderste lijn: gesloten-lus versterking. Merk op dat een hogere terugkoppelfactor vereist dat het afvallen al in de audioband optreedt.

De terugkoppeltheorie wordt gewoonlijk afgeleid door alle parameters ideaal te veronderstellen, op eentje na. Het effect van terugkoppeling hierop wordt berekend en zo worden de resultaten verkregen. Maar dit is niet de werkelijke situatie: het is niet “of, of, of”, maar “en, en, en”! Dit verandert de situatie, vooral als met hoge terugkoppelfactoren het eigenlijke signaal dat de versterker moet verwerken meer het foutsignaal is dan het oorspronkelijke muzieksignaal. Het kan dan gemakkelijk gebeuren dat de onderliggende aannamen van de terugkoppeltheorie niet langer geldig zijn en dus ook de uitkomsten niet.

Een ander, vaak over het hoofd gezien of genegeerd, aspect is de voeding van de versterker. Eén van mijn boute beweringen is dat geen versterker beter is dan zijn voeding. De ideale voeding kan zoveel stroom leveren als nodig zonder *enige* verandering in de voedingsspanningen, noch op de korte, noch op de lange termijn. Dit is natuurlijk onmogelijk want iedere voeding zal beperkt zijn in de stroomleverantie en stroomvariaties zullen hun weerslag hebben in de voedingsspanningen. De vraag is dan: wat is hoorbaar en wat niet? Deze vraag is niet gemakkelijk te beantwoorden, maar er kunnen wel enige algemene opmerkingen over de problematiek van voedingen gemaakt worden.

Als de voedingsspanningen van de versterker (we zullen een positieve, een negatieve en een nul spanning aannemen) variëren, betekent dit ook dat de werkpunten van de verschillende transistortrappen veranderen gedurende het verwerken van het ingangssignaal (lees: muziek). Zeer waarschijnlijk merk je dit niet als je de versterker met een sinussignaal van een constante amplitude doormeet, omdat dit alleen een verschuiving geeft naar een nieuwe evenwichtswaarde. Maar met de dynamische signalen van muziek blijven de werkpunten continu verschuiven en zo wordt een soort van gecorreleerde laagfrequente “ruis” opgewekt, in stereoversterkers met een gezamenlijke voeding ook met componenten van het andere kanaal. Dit kan leiden tot “vermoeiing” zonder dat deze “ruis” bewust wordt waargenomen. Je kunt hiertoe de voedingsspanning eens op een oscilloscoop bekijken als de versterker een muzieksignaal of een toneburst verwerkt. De perfecte voeding laat hier geen spoor van na, maar je kunt voor een onaangename verrassing komen te staan. Zorg er bij deze test wel voor dat de versterker stroom moet leveren aan een belasting, zodat de voeding wel moet werken! Ook de “nul” volt kan flinke zwaaien maken als het ontwerp van de gedrukte bedrading te wensen overlaat en dit kan tot vergelijkbare verschijnselen leiden.

De vermogensversterking van een versterker is al gauw  $10^6$  tot  $10^7$ . Het is derhalve betrekkelijk eenvoudig om parasitaire terugwerking van de uitgang naar de ingang te krijgen. Dit kan aanleiding geven tot gecorreleerde “narigheid” die de “muzikaliteit” en de “detaillering” van het weergegeven geluid negatief beïnvloedt. Zulke verschijnselen zijn uitermate moeilijk te meten, maar kunnen wel gehoord worden en kunnen het verschil maken tussen een “goede” en een “uitmuntende” versterker. Het is verrassend dat twee versterkers die wat betreft het ontwerp geheel identiek zijn, maar die op verschillende manieren opgebouwd en bedraad zijn, duidelijk verschillend kunnen klinken!

Het zou geen verrassing moeten zijn dat in het ontwerp van de versterkers van “Temporal Coherence” alle bovengenoemde aspecten meegenomen en geoptimaliseerd zijn om voor onze oren het beste te klinken. Dit is aangetoond bij verschillende vergelijkingstesten met andere commerciële versterkers voor de consumentenmarkt met ons systeem, bestaande uit de stuur- en eindversterker. Maar wij zijn uiteraard altijd bereid om dit in Uw eigen omgeving te demonstreren, als het tenminste niet te ver weg is.

In deze notitie hebben we een aantal aspecten beschreven die in staat zijn om duidelijk hoorbare verschillen tussen versterkers met vergelijkbare specificaties te veroorzaken. Hoewel het –op het eerste gezicht- verrassend is dat versterkers zich zo verschillend kunnen gedragen, hoop ik dat nu duidelijk is dat er technische zaken zijn die in ogenschouw dienen te worden genomen om de gehoormatige “kwaliteit” van versterkers te begrijpen. Ik ben me zeer wel bewust dat de lijst, beschreven in deze notitie, onvolledig is, maar voor mij is het een doorlopend verhaal van versterkerontwikkeling. In de afgelopen 45 jaar heb ik veel verschillende probleemgebieden van versterkers ontdekt en ik ben er zeker van dat er meer zullen zijn. Daarom zijn suggesties van harte welkom! Vragen? [info@temporalcoherence.nl](mailto:info@temporalcoherence.nl) !