

Is terugkoppeling de Haarlemmer olie voor high-end audio?

Dr. Hans R.E. van Maanen (Temporal Coherence, info@temporalcoherence.nl)

Datum van uitgifte: 14 mei 2017, uitgebreid 31 januari 2019

Samenvatting en conclusies

Terugkoppeling lijkt Haarlemmerolie voor alle tekortkomingen van audioapparatuur. Toch zijn in het “high-end” audio wereldje veel critici van terugkoppeling te vinden. Het is boven iedere twijfel verheven dat de *specificaties* van veel halfgeleiderversterkers veruit superieur zijn aan die van luidsprekers en buizenversterkers, maar die correleren niet best met de *gehoormatige* kwaliteit van deze apparatuur. Hoe kan dat? Worden sommige verschijnselen over het hoofd gezien en, zo ja, wat kunnen we daarvan leren om de *gehoormatige* kwaliteit van apparatuur te verbeteren? Dit artikel analyseert een aantal voetangels en klemmen, veroorzaakt door parasitaire effecten van terugkoppeling en geeft de richting aan voor het verbeteren van de gehoormatige kwaliteit. Dit werd bevestigd door het ontwerpen van versterkers langs onconventionele lijnen, afgeleid van deze analyse, waarbij het luisteren door muziekkenners als belangrijker beschouwd werd dan meetresultaten.

Gebleken is dat in een teruggekoppelde versterker parasitaire effecten optreden die veelal veronachtzaamd worden omdat deze bij de gebruikelijke wijze van afleiding van de formules van teruggekoppelde systemen niet tevoorschijn komen. Deze parasitaire effecten leiden tot de *introductie* van artefacten die *specifiek* zijn voor teruggekoppelde systemen. Dit staat haaks op de veronderstelling dat terugkoppeling uitsluitend ongewenste effecten onderdrukt, maar het volgt ondubbelzinnig uit de analyse, die in dit artikel wordt gepresenteerd.

Het onderdrukken van deze parasitaire effecten vereist het zoveel mogelijk lineariseren van de individuele versterkertrappen in combinatie met een constante, maar matige, terugkoppelfactor over het gehele audiogebied.

Het doormeten van apparatuur met continue sinussen legt deze parasitaire effecten vaak niet bloot omdat veel pas tevoorschijn komen in het *dynamisch* gedrag van de versterker bij muzieksignalen. De simplistische benadering, dat de sinusresponsie het mogelijk maakt om het gedrag onder alle omstandigheden te voorspellen, gaat geheel voorbij aan de voorwaarden die de Fourier theorie hiervoor stelt en leidt derhalve tot onjuiste resultaten en conclusies. Er is daarom grote behoefte aan goed-gedefinieerde dynamische testsignalen, maar zolang deze niet beschikbaar zijn blijft het menselijk gehoor het beste “meetinstrument” dat beschikbaar is.

1. Inleiding

Het blijft een intrigerende vraag: waarom klinken versterkers verschillend, zelfs als hun specificaties vergelijkbaar zijn? Hetzelfde geldt voor andere elektronica: we hebben twee SACD spelers van hetzelfde merk, maar met een significant prijsverschil, vergeleken. Hun vrijwel identieke specificaties waren drie orden van grootte beter dan die van goede luidsprekers, maar het verschil in geluidskwaliteit was overduidelijk. In de (populaire) literatuur over “high-end” audio zijn sterk tegenstrijdige meningen over terugkoppeling te vinden. Sommigen zijn van mening dat “je niet genoeg terugkoppeling kunt hebben” (ref. 1), terwijl anderen beweren dat “versterkers met sterke terugkoppeling niet ‘muzikaal’ klinken”. Vanwege het tekort aan technische onderbouwing van dergelijke kritiek en de eisen van de high-end gemeenschap, hebben meer technisch en wetenschappelijk georiënteerde personen al gauw de neiging om dit alles hooghartig terzijde te schuiven als opmerkingen van mensen die teveel hasj gerookt hebben, omdat hun meters een ander verhaal vertellen. Maar omdat de omvang van de kritiek op versterkers met terugkoppeling zo omvangrijk is, is het ontkennen dat er op z'n minst een kern van waarheid in zit, niet realistisch. Waar verstoppen de problemen met terugkoppeling zich en kunnen we hierover niet meer duidelijkheid krijgen? In “Audio Power Amplifiers” (ref. 2), werden twee interessante stellingen aangetroffen:

“Veel transistorversterkers produceren zo weinig harmonische vervorming dat het onwaarschijnlijk is dat dit de grond voor subjectieve verschillen tussen types is. Dit leidt dan tot de conclusie dat er andere foutenbronnen moeten zijn dan die gewoonlijk worden geanalyseerd, maar een majeure invloed hebben op de gehoormatige kwaliteit”.

“De meeste hedendaagse versterkers vertrouwen op zware negatieve terugkoppeling. Als de open-lus versterking hoog genoeg is, draait de ingangsschakeling op lage signaalniveaus, waardoor eenvoudige schakelingen kunnen worden gebruikt zonder de lineariteit in gevaar te brengen. Deze aanname is correct als de werking wordt geanalyseerd met een enkele toon en een constant en continu ingangssignaal. Het is echter mogelijk dat deze ontwerpfilosofie resulteert in versterkers met een slecht dynamisch, impuls en oversturingsgedrag.”

Van een ander artikel (ref. 3) is de volgende interessante samenvatting gevonden:

“De subjectieve en objectieve evaluatie van 5 hoge-kwaliteits buizenversterkers wordt in dit artikel gepresenteerd. Als referentie is de professionele transistorversterker gebruikt. De subjectieve evaluatie is uitgevoerd door een team van beoordelaars. Het bleek dat de beste geluidskwaliteit werd verkregen met de buizenversterkers, de slechtste met de referentieversterker. De resultaten van de subjectieve evaluatie zijn inconsistent met de kwaliteitsbepaling, zoals verkregen door het meten van objectieve parameters: alle versterkers hebben een vergelijkbare kwaliteit, maar de beste is de transistorversterker vanwege het laagste niveau van THD+N.”

Beide bronnen laten zien dat de gewoonlijk gemeten eigenschappen, diplomatiek uitgedrukt, niet goed correleren met de gehoormatige kwaliteit van versterkers. Daarom zullen we “de andere foutenbronnen” moeten identificeren. De *temporele* responsie op *dynamische* signalen, zoals deze in muziek voorkomen, wordt zelden in ogenschouw genomen met dit soort metingen, maar als terugkoppeling wordt gebruikt zou dit wel eens cruciaal kunnen zijn voor het begrijpen van de *gehoormatige* kwaliteit. Ook is het, op het eerste gezicht,

onduidelijk waarom de gebruikelijke testen de dynamische en temporele eigenschappen van de elektronica niet blootleggen. Het ophelderen van de oorzaak van deze paradox zou ook wel eens licht op de bovengenoemde eisen van de high-end gemeenschap kunnen werpen.

Na de definitie van de verschillende parameters van de analyse zullen we in meer detail kijken naar de punten van kritiek van de high-end gebruikers, gevolgd door een uitgebreide analyse van tegen- en terugkoppeling in een versterker. Vervolgens zullen we kijken naar andere foutenbronnen in versterkers en hun belasting en de consequenties voor het ontwerpen van versterkers.

2. Nomenclatuur / definities gebruikt in dit artikel

In dit artikel zullen we een aantal variabelen gebruiken, die soms anders gedefinieerd zijn dan gebruikelijk. Om verwarring te voorkomen zullen we deze hier definiëren:

Open-lus versterking μ :

$$\mu = \frac{V_{out}}{V_+ - V_-}$$

Open-lus versterking bij lage frequenties (ver onder de open-lus afsnijfrequentie) μ_0 :

$$\mu_0 = \frac{V_{out}}{V_+ - V_-}$$

De terugkoppelfactor β :

$$\beta = \frac{V_-}{V_{out}}$$

N.B. Merk op dat zowel μ als β complexe getallen en een functie van de frequentie kunnen zijn.

De gesloten-lus versterking A :

$$A = \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{\mu}{1 + \mu\beta}$$

De terugkoppelmarge M :

$$M = \frac{\mu}{A} = 1 + \mu\beta$$

De open-lus bandbreedte:

Deze parameter wordt bepaald door de -3 dB (open-lus afsnij-)frequentie (relatief t.o.v. de maximum waarde van μ) van de dominante pool van de open-lus versterking.

De gesloten-lus bandbreedte:

Deze parameter wordt bepaald door de -3 dB (gesloten-lus afsnij-)frequentie van de versterking A (relatief t.o.v. de nominale waarde van A).

Terug- en tegenkoppeling worden vaak verward. In dit artikel zal met *terugkoppeling* worden bedoeld het over (bijna) de hele versterker terugvoeren van het signaal ("global feedback" in de Engelstalige literatuur), met *tegenkoppeling* enige actie die op een veel kleiner gedeelte

van de versterker (bijv. een enkele trap) van toepassing is (“local feedback” in de Engelstalige literatuur).

3. Opmerkingen op high-end audio fora

Op fora, waar high-end audio en de bijbehorende apparatuur worden bediscussieerd, kunnen vaak opmerkingen als

- Versterkers met zware terugkoppeling klinken niet ‘muzikaal’
- Als een versterker meer foutsignaal dan muziek aan het verwerken is, klinkt deze niet natuurlijk
- Versterkers met een constante terugkoppelfactor in de audioband klinken beter
- Terugkoppeling heeft tijd nodig om te reageren, dus het is altijd te laat
- Versterkers moeten snel zijn (zelfs tot 100 V/ μ s)
- Versterkers moeten ‘uitsturingsruimte’ hebben

worden aangetroffen. Op het eerste gezicht zijn deze opmerkingen nogal verwarrend. Voor de eerste opmerking worden allerlei argumenten aangevoerd, waarvan sommige meer hout snijden dan andere, maar het *waarom* wordt nooit duidelijk. Sommigen gaan zelfs zo ver dat ze geen versterker met terugkoppeling meer willen. Het paradoxale is dat meestal dezelfde mensen vinyl prefereren boven digitale audio, maar er is geen snijtafel in de wereld die geen bewegingsterugkoppeling toepast.

Het foutsignaal kan, uiteraard, verschillen van hetingangssignaal, dat is zelfs de “raison d’être” van terugkoppeling. Maar als het foutsignaal sterker wordt dan hetingangssignaal? Zou dat kunnen betekenen dat er (te?) veel gecorrigeerd moet worden? Men kan zich afvragen wat er eigenlijk aan de hand is en waar het foutsignaal vandaan komt. Dit is een onderwerp dat in meer detail hieronder bestudeerd zal worden.

Waarom versterkers met een constante terugkoppelfactor in de audioband beter zouden moeten klinken is niet triviaal. Maar er zijn tenminste twee goede redenen voor, die hieronder zullen worden besproken.

Terugkoppeling kan van invloed zijn op de temporele eigenschappen van de versterker, die tot hoorbare tijdversmering leidt. De toepassing van terugkoppeling dient in overeenstemming te zijn met de temporele vereisten van geluidswaergave.

De -absurde- eis van snelheden (slew rate) tot zelfs 100 V/ μ s vindt waarschijnlijk zijn oorsprong in andere ongewenste eigenschappen. Dit is te begrijpen als men zich realiseert dat 5 V/ μ s al resulteert in 100 W in 8 Ω bij 20 kHz, een 20-voudige toename zou 40 kW bij deze frequentie betekenen. Voor een huiskamersysteem is dat ver boven wat haalbaar is en waarom zou dat nodig zijn?

De noodzaak voor uitsturingsruimte is ook nogal verwarrend omdat een versterker goed zou moeten werken tot aan zijn oversturingsniveau. Dus zolang er geen oversturing optreedt, zou er geen verschil dienen te zijn in de gehoormatige kwaliteit van de versterker en daarom zou

er geen noodzaak zijn voor uitsturingruimte, hetwelk niets anders is dan het onderbenutten van de versterker. Als mensen dit wel nodig vinden moet er iets in het "lineaire" bereik van de versterker misgaan dat niet gemakkelijk te detecteren is.

In de loop van dit artikel zullen deze aspecten worden opgespoord.

4. Terug- en tegenkoppeling in de versterker

Het uitgangspunt van de discussie is dat er niets *fundamenteel* fout is met zowel terug- als tegenkoppeling (ref. 4), maar dat er in de praktijk parasitaire verschijnselen kunnen optreden die vaak over het hoofd worden gezien, dus is een meer gedetailleerde blik in (versterker) terug- en tegenkoppeling noodzakelijk.

4.1 De ingangverschilversterker

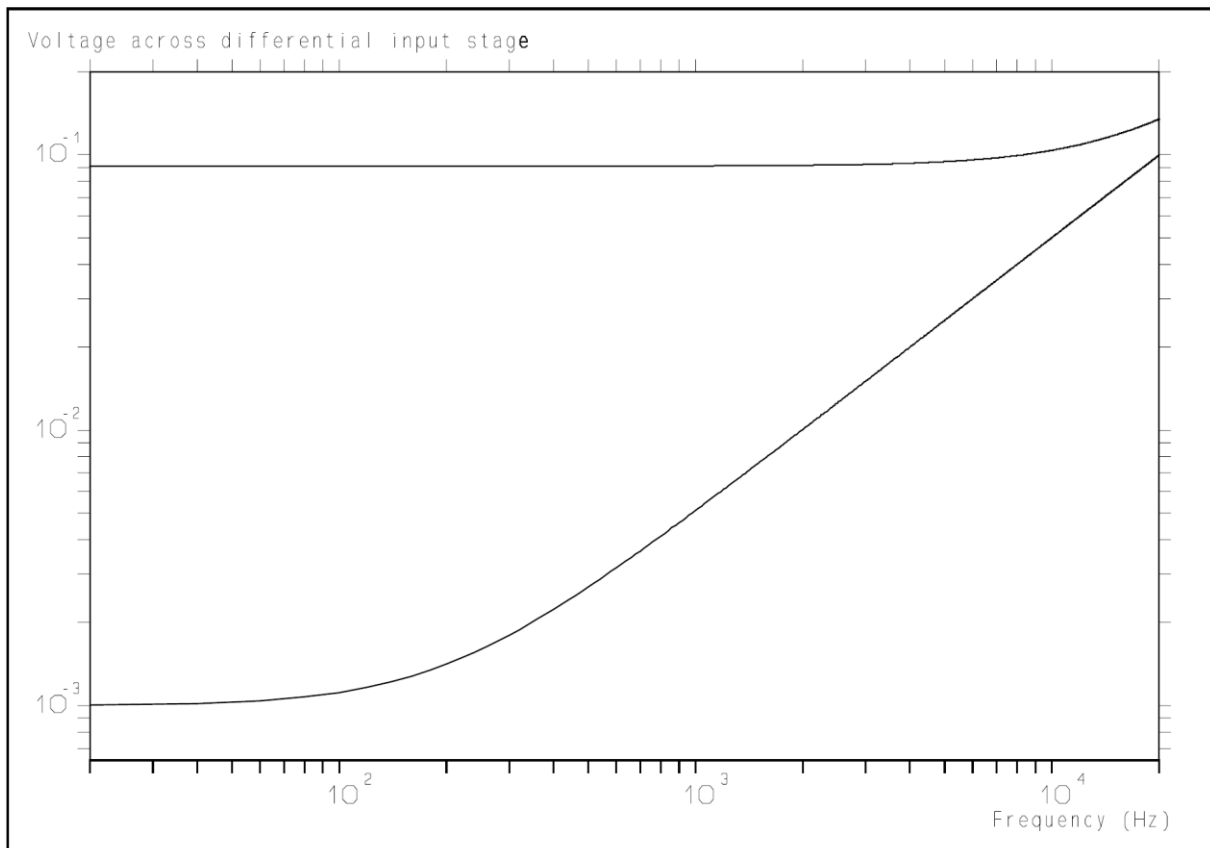
De eerste trap is gewoonlijk een verschilversterker die de functies van aftrekschakeling en versterking combineert. Merk op dat de aftrekschakeling *buiten* de terugkoppellus zit. Er zijn drie voetangels met deze schakeling. Allereerst neemt het signaalniveau *toe* met *toenemende* frequentie ten gevolge van de *afnemende* open-lus versterking μ , hetwelk eenvoudig kan worden afgeleid van de vergelijking voor terugkoppeling:

$$V_+ - V_- = \frac{V_{out}}{\mu} = \frac{V_{in}}{1 + \mu\beta} = \frac{V_{in}}{M}$$

Aannemende dat de open-lus versterking met 6 dB/oct afneemt (eerste orde filtering) boven de open-lus afsnijfrequentie, vastgelegd door de tijdconstante τ , is het spanningsverschil over de ingangverschilversterker gelijk aan:

$$V_i - \beta V_o = \left[\frac{V_i}{1 + \mu_0\beta} \right] \cdot \left[\frac{1 + j\omega\tau}{1 + j\omega\tau / (1 + \mu_0\beta)} \right]$$

In fig. 1 worden twee voorbeelden getoond onder verschillende condities om het verschijnsel te illustreren:



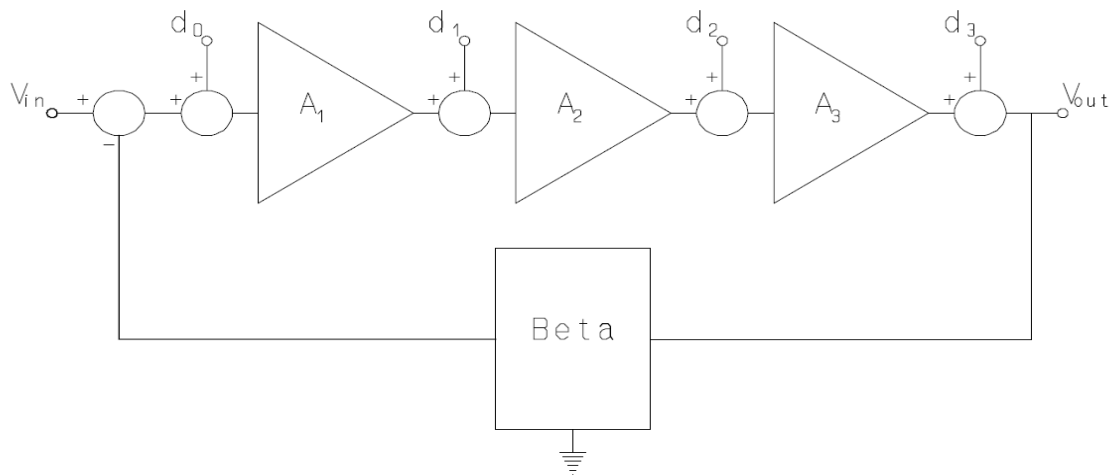
Figuur 1: Het spanningsverschil aan de ingang van de versterker hangt af van de open-lus versterking bij lage frequenties μ_0 , de terugkoppelfactor β , de gesloten-lus bandbreedte van de versterker f_{max} en -natuurlijk – deingangsspanning V_{in} . Onderste spoor: $\mu_0 = 10\,000$; $\beta = 0,1$; $f_{max} = 200\text{ kHz}$; $V_{in} = 1\text{ V}$, bovenste spoor: $\mu_0 = 100$; $\beta = 0,1$; $f_{max} = 200\text{ kHz}$; $V_{in} = 1\text{ V}$.

Merk op dat de verschilspanning over de ingang van de versterker sterk kan toenemen met de frequentie, dus de tweede aanname van Kolinummi (ref. 2, zie boven) is wellicht correct voor lage frequenties, maar kan voor hogere onjuist zijn. Het zal sowieso tot een toename van de vervorming met de frequentie leiden, tenzij de ingangsvoltersterker perfect lineair is of dat de terugkoppelmarge M constant is in de audioband. Maar dit geeft een begrenzing aan de terugkoppelmarge M , zoals verderop zal worden besproken. Het bepalen van de eigenschappen van de ingangsvoltersterker, gebaseerd op de vereisten bij lage frequenties, leidt waarschijnlijk tot rampspoed.

Ten tweede variëren de collector-emitter spanningen van de transistoren van de verschilversterker als dezelfde (in fase) wisselspanning aan beide bases wordt aangeboden. De transistoreigenschappen hangen af van V_{ce} , dus een “common mode” spanning zal een uitgangsspanning genereren als de transistoren niet identiek en/of de collectorbelastingen verschillend zijn. **N.B.** Merk op dat met grote waarden van de terugkoppelfactor, de common mode spanning erg groot wordt in vergelijking met de verschilspanning:

$$\frac{V_{in}}{V_+ - V_-} \approx \mu\beta$$
 en de common mode spanning $\approx V_{in}$. De common mode spanning is dus ongeveer $\mu\beta$ maal groter dan de verschilspanning.

Beide effecten zijn het sterkst bij verschilversterkers met direct gekoppelde emitters, waarbij de niet-lineariteit van de basis-emitter diode zich, zelfs bij kleine (mV) uitsturingen, duidelijk manifesteert in de gehoormatige kwaliteit (ref. 5, zie ook fig. 1). Ten gevolge van de exponentiële karakteristiek van de basis-emitter diode worden veel hoge harmonischen (boven de 5^e) opgewekt, die erom bekend staan al snel irritant voor het oor te worden, zelfs op een laag niveau (ref. 6). Vervolgens wordt het signaal van de verschilversterker verder versterkt door de volgende trappen. Een wijdverbreid misverstand is dat de vervorming van alle versterkertrappen met de terugkoppelmarge M wordt onderdrukt. Dit is onjuist (ref. 2) en dit kan eenvoudig worden aangetoond door de versterker op te splitsen in zijn verschillende trappen. Neem even drie aparte versterkertrappen aan, dat iedere versterkertrap perfect is en dat na iedere trap de "narigheid", die deze genereert, wordt toegevoegd. Op deze wijze wordt de benadering van fig. 2 verkregen:



Figuur 2: De benadering van een versterker met meerdere trappen om de eigenschappen te berekenen bij toepassing van terugkoppeling.

De versterking van de i^e trap is A_i en de "narigheid" ervan is d_i . Meteen na het aftrekken van het ingangssignaal en het teruggekoppelde signaal wordt d_0 toegevoegd. Dit vertegenwoordigt de "narigheid" van de verschiltrap, omdat die ook niet perfect is. (**N.B.** "Narigheid" omvat meer dan alleen vervorming, maar ook ruis, brom, stoorsignalen van de voedingslijn, etc. Voor de eenvoud zullen we meestal over vervorming praten, maar de lezer moet in het achterhoofd houden dat het ook andere ongewenste signalen omvat). Het is nu eenvoudig in te zien dat:

$$\mu = A_1 \cdot A_2 \cdot A_3$$

$$V_{out} = (((V_{in} - \beta V_{out} + d_0) \cdot A_1 + d_1) \cdot A_2 + d_2) \cdot A_3 + d_3$$

Herschikken levert:

$$V_{out} = \frac{\mu \cdot V_{in}}{1 + \mu \cdot \beta} + \frac{\mu \cdot d_0}{1 + \mu \cdot \beta} + \frac{A_2 \cdot A_3 \cdot d_1}{1 + A_1 \cdot A_2 \cdot A_3 \cdot \beta} + \frac{A_3 \cdot d_2}{1 + A_1 \cdot A_2 \cdot A_3 \cdot \beta} + \frac{d_3}{1 + A_1 \cdot A_2 \cdot A_3 \cdot \beta}$$

$$V_{out} = \frac{\mu \cdot V_{in}}{1 + \mu\beta} + \frac{\mu \cdot d_0}{1 + \mu\beta} + \frac{A_2 \cdot A_3 \cdot d_1}{1 + \mu\beta} + \frac{A_3 \cdot d_2}{1 + \mu\beta} + \frac{d_3}{1 + \mu\beta}$$

$$V_{out} = \frac{\mu \cdot V_{in}}{M} + \frac{A_1 \cdot A_2 \cdot A_3 \cdot d_0}{M} + \frac{A_2 \cdot A_3 \cdot d_1}{M} + \frac{A_3 \cdot d_2}{M} + \frac{d_3}{M}$$

Dus de onderdrukking van de vervorming van de voorversterkingstrappen is minder dan de terugkoppelmarge M en de vervorming van de verschiltrap wordt evenveel versterkt als het ingangssignaal (**N.B.** Dit is equivalent met het plaatsen van de verschiltrap buiten de terugkoppellus). De consequentie is dat de vervorming van de voorgaande trappen door de volgende trappen wordt versterkt en dat de vervormingsproducten ook weer worden vervormd, waardoor de harmonischen van de harmonischen toe gaan nemen. Merk op dat dit ook geldt voor de gevoeligheid voor voedingsspanningsvariaties en de andere contribuanten aan de "narigheid" omdat deze allemaal eerst worden versterkt alvorens de terugkoppeling in actie kan komen. De verbeteringen, die aan terugkoppeling worden toegeschreven, dienen in meer detail te worden geanalyseerd omdat het klakkeloos toepassen van de welbekende vergelijkingen te kort door de bocht is, dat tot incorrecte resultaten aanleiding geeft. Reden waarom de interne werking van een versterker nu aan de orde zal komen. Als bonus zal worden aangetoond dat de terugkoppelvergelijkingen fundamenteel onjuist zijn. Dit heeft vergaande consequenties voor het ontwerp van versterkers.

4.2 De modulatie diepte van de versterkertrappen

De derde valkuil vereist een uitgebreidere beschrijving. Er kunnen twee bijdragen aan het uitgangssignaal van de verschiltrap worden onderscheiden: allereerst het verschil tussen het ingangssignaal en β maal het ideale (= narigheidvrije) uitgangssignaal en als tweede de narigheid aan de uitgang van de versterker, ook met β vermenigvuldigd. Als vergelijking, waarin $V_{sub} = V_+ - V_-$:

$$V_{sub} = \frac{1}{1 + \mu\beta} V_{in} - \beta \cdot d_t$$

en d_t alle narigheid aan de uitgang van de versterker is.

De bijdrage van de vervorming op zichzelf kan significant zijn in vergelijking met die van het ingangssignaal. Hoe hoger de open-lus versterking, hoe ongunstiger de verhouding tussen het "signaal" en de "narigheid" wordt. Dus zijn alle onderliggende aannames van de terugkoppeltheorie (zoals de quasi-lineariteit van de individuele versterkertrappen) nog steeds geldig? In de populaire high-end lectuur valt te lezen dat "als een versterker meer vervorming dan muziek aan het verwerken is, eindig je met een niet-muzikaal systeem". Dit zou wel eens meer dan gebakken lucht kunnen zijn:

als $\frac{d_t}{V_o} \geq \frac{1}{\mu\beta}$ dan verwerkt de versterker meer narigheid dan signaal.

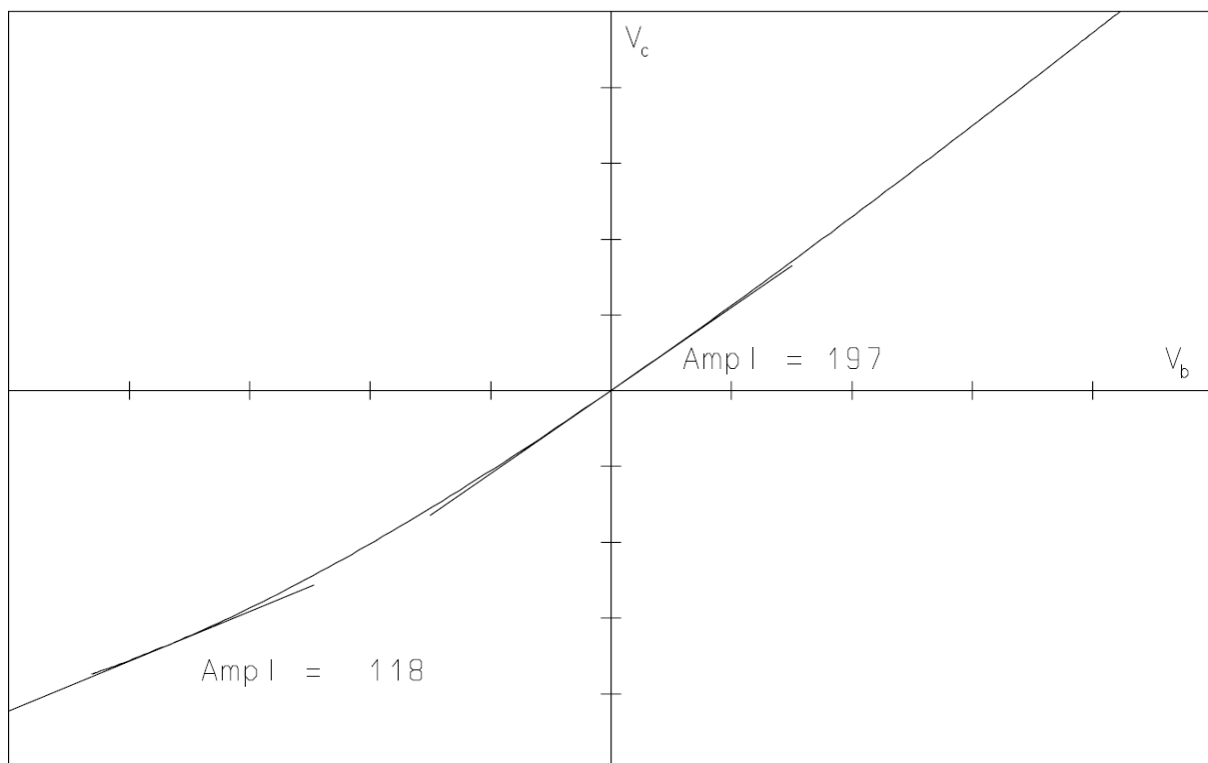
Vaak wordt de opmerking gemaakt dat dit niet kan optreden omdat de narigheid met de terugkoppelmarge wordt onderdrukt, maar dat is onjuist. Zoals we boven hebben gezien

hangt de onderdrukking van de naringheid af van waar deze in de versterker wordt opgewekt en dat de onderdrukking vermindert met het toenemen van de frequentie terwijl μ juist afneemt (zie fig. 1). Dus aan de hierboven genoemde voorwaarde kan worden voldaan, afhankelijk van het ontwerp van de versterker, met complexe signalen die uit meerdere frequenties bestaan. Deze voorwaarde moet in gedachten worden gehouden bij het ontwerpen van een versterker en wanneer een ontwerp wordt geëvalueerd.

De sterkte van het verschilsignaal neemt toe met toenemende frequentie (zie fig. 1). Alle versterkertrappen, voorafgaand aan de afsnij-condensator, moeten derhalve een signaal verwerken waarvan de sterkte toeneemt met de frequentie. Dit kan betekenen dat deze trappen sterk niet-lineair bedreven worden en hoe lager de open-lus afsnijfrequentie is, des te eerder begint dit verschijnsel op te treden. Daar de gesloten-lus bandbreedte wordt bepaald door de open-lus versterking met zijn afsnij-tijdconstante en β , kunnen deze niet geheel onafhankelijk van elkaar worden gekozen, maar de gemaakte keuzes hebben invloed op de niet-lineariteit van de individuele versterkertrappen en de vermindering van hun vervorming. Hieronder zullen we een aantal opties bespreken om deze keuzes te optimaliseren.

4.3 Fundamentele fout in de gewoonlijk gebruikte terugkoppelvergelijkingen

De aanname, die ten grondslag ligt aan de afleiding van de gewoonlijk gebruikte terugkoppelvergelijkingen, is dat u_0 , de open-lus versterking van de versterker bij lage frequenties, een constante is. Maar vervorming wordt veroorzaakt door een niet-lineair verband tussen de ingangs- en uitgangsspanningen van de versterker zonder terugkoppeling (zie fig. 3).



Figuur 3: Met een niet-lineaire ingang-uitgangskromme hangt de "instantane" versterking af van de waarde van hetingangssignaal. Rond 0 Volt is deze ongeveer 197, bij lagere spanningen zakt deze tot onder de 120.

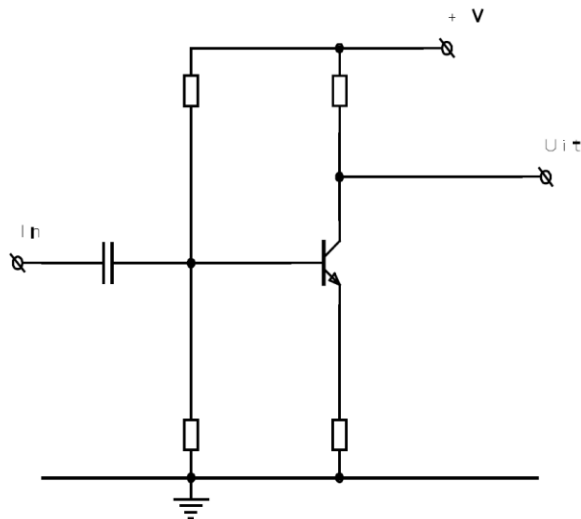
Dus is u_0 **geen** constante en is de basale aanname onjuist en derhalve zijn de vergelijkingen ook onjuist: de vergelijkingen beschrijven de vermindering van de vervorming van de versterker, veroorzaakt door het niet constant zijn van u_0 , door het aannemen dat u_0 , een constante is. Wiskundig is dat vloeken in de kerk. (**N.B.** Een constante waarde van u_0 en een vervormende versterker sluiten elkaar wederzijds uit!). Het beste dat bereikt kan worden is een benaderend resultaat, maar het ligt voor de hand dat hoe groter het verschil tussen de aanname en de realiteit (oftewel hoe krommer de curve van het ingang-uitgang verband), hoe slechter de benadering en sterker interacties zullen zijn. Enige voorbeelden van ongewenste interacties zullen hieronder worden beschreven.

4.4 Interactie tussen de niet-lineaire karakteristiek en de begrensde bandbreedte

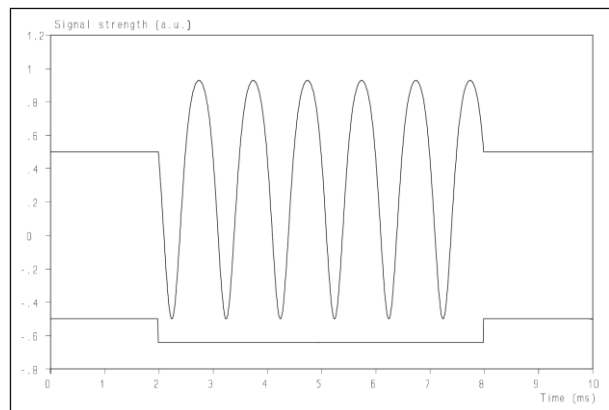
De niet-lineaire (open-lus) ingang-uitgangskromme van een versterker betekent ook dat de “instantane” μ ($= dV_{out} / dV_{sub}$) geen constante is, maar (ook) een functie is van de ingangsspanning (ref. 6) en zoals getoond wordt in fig. 3. Gewoonlijk worden de vergelijkingen voor terugkoppeling afgeleid door de verschillende effecten te scheiden. Maar dat is onjuist omdat dan de *interactie* tussen de twee onder het tapijt wordt geschoven. Een voorbeeld van een interactie kan als volgt worden geïllustreerd: neem een signaal met een lage frequentie en een grote amplitude en een hoge frequentie en een kleine amplitude. Dan wordt intermodulatie tussen de “lage” en de “hoge” frequentie opgewekt, maar omdat de “instantane” bandbreedte van de *gesloten-lus* versterker varieert (gemoduleerd met de lage frequentie, zie fig. 3), ontstaat ook een *fasemodulatie* van de “hoge” frequentie (**N.B.** Fase modulatie lijkt veel op frequentiemodulatie). Dit is al eerder opgemerkt (ref. 7). Maar de aannames in dit artikel betreffende de gesloten-lus bandbreedte zijn nogal optimistisch, zoals verderop zal worden besproken. Vergelijkbare interacties kunnen worden verwacht tussen bijv. voedingsspanningsvariaties en het ingangssignaal. Zulke interacties zijn moeilijk in vergelijkingen te “vangen”, maar desondanks kunnen ze, en moeten ze, niet genegeerd worden. Numerieke simulaties kunnen deze laten zien en semi-kwantitatieve resultaten leveren, die nuttig zijn voor optimalisaties. (**N.B.** Dit effect is een direct gevolg van het gebruik van terugkoppeling en is een voorbeeld van een artefact dat door terugkoppeling wordt *geïntroduceerd*.) Deze interacties pleiten voor een lineaire (open-lus) ingang-uitgangsrelatie en een hoge open-lus afsnijfrequentie. (**N.B.** Deze effecten zullen *niet* met een *continue sinustoon test* worden gedetecteerd, eenvoudigweg omdat het twee frequenties simultaan vereist, hetwelk niet optreedt met een continue sinustoon test.)

4.5 Geheugeneffecten, veroorzaakt door de niet-lineaire ingang-uitgangsrelatie

De niet-lineaire open-lus ingang-uitgangsrelatie geeft aanleiding tot een ander parasitair effect: de vervorming wekt een (kleine) DC component in het uitgangssignaal op. De oorzaak hiervan kan het beste worden begrepen middels een voorbeeld, waarvoor de basale schakeling van fig. 4 zal worden gebruikt. **N.B.** De getoonde voorbeelden zullen in zekere mate overdreven worden om de effecten duidelijker te illustreren.

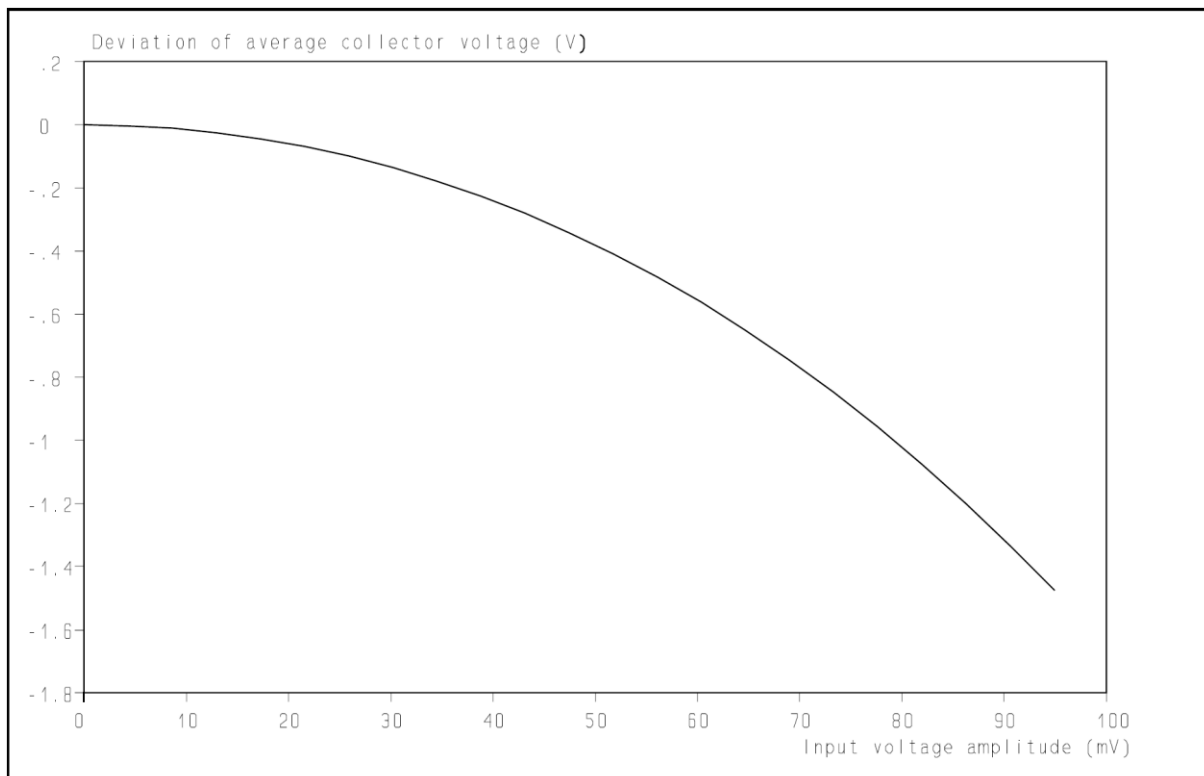


Figuur 4: De basale schakeling die gebruikt wordt om het opwekken van een DC component t.g.v. vervorming te illustreren.



Figuur 5: Bovenste spoor: het vervormde uitgangssignaal van een toneburst. Onderste spoor: de over een periode gemiddelde waarde van het signaal van het bovenste spoor.

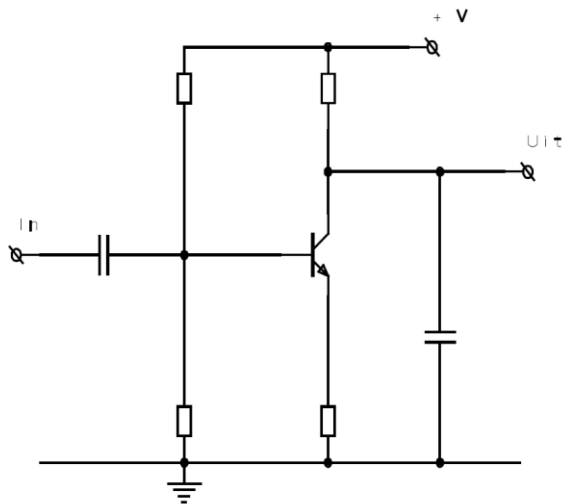
De vervorming wordt veroorzaakt door de niet-lineaire eigenschappen van de basis-emitter diode. In de positieve fase van het ingangssignaal geleidt deze *meer* boven het werkpunt dan dat deze *minder* geleidt in de negatieve fase. Het gevolg hiervan is dat de collectorspanning verder onder het werkpunt daalt tijdens de positieve fase van het ingangssignaal dan dat deze stijgt in de negatieve fase. Dit is getoond in fig. 5 (bovenste spoor) en het gevolg is dat de collectorspanning, gemiddeld over een volle periode, lager is dan het werkpunt (onderste spoor). Dus een niet-stationair signaal (zoals gebruikelijk is bij muziek) wordt vergezeld door een “DC” component, gerelateerd aan het ingangssignaal, maar dit is een nogal laagfrequent signaal, dat samenhangt met de omhullende van het ingangssignaal en dat niet bestaat uit harmonischen ervan. De grootte van de “DC” component zal, uiteraard, toenemen met de amplitude van het ingangssignaal en dat gaat sterker dan proportioneel. Dit verschijnsel wordt getoond in fig. 6. **N.B.** Alleen als de ingang-uitgangsrelatie perfect symmetrisch is, treedt dit effect niet op. Dit zal in de praktijk niet voorkomen. **N.B.** In vrijwel alle moderne versterkers zijn de individuele versterkertrappen DC-gekoppeld. Verschuivingen in de werkpunten van de ene trap zullen dus doorwerken in de werkpunten van alle volgende trappen en tevens aan de uitgang van de versterker merkbaar zijn.



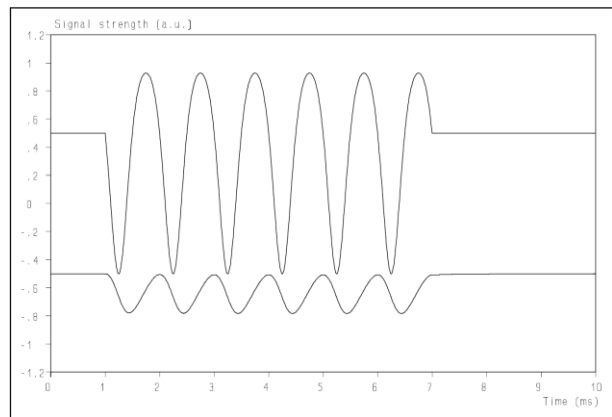
Figuur 6: *Verschuiving van de gemiddelde collector potentiaal als functie van de ingangsspanning. Versterking van de trap ≈ 200 maal, voedingsspanning 36 V.*

Dit is een onwenselijk artefact omdat het laagfrequente signalen introduceert, die niet in het originele signaal (muziek) aanwezig zijn en de ervaring leert dat dit leidt tot een onrustig geluidsbeeld. Het is mogelijk ook de reden van het verlangen van high-end luisteraars voor "uitsturingsruimte": omdat het verschijnsel snel sterker wordt met toename van de sterkte van hetingangssignaal, zal het verschijnsel betrekkelijk klein zijn als de versterker ver beneden zijn maximum vermogen wordt bedreven en zal het niet zo irritant zijn. Dat neemt niet weg dat het een artefact is die kan worden voorkomen door een gedegen ontwerp van de versterker.

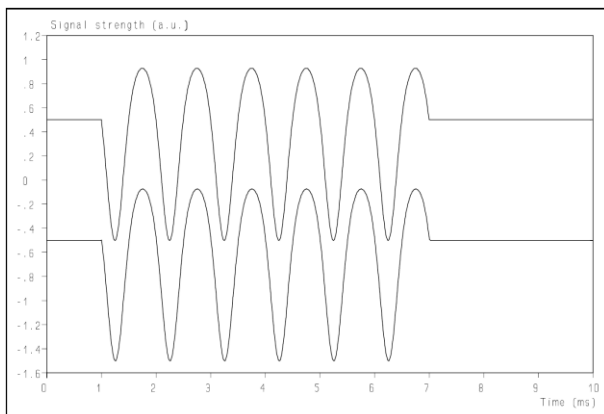
De gevolgen van dit mechanisme worden vergroot door het geheugen-effect van de condensator, die wordt gebruikt om de open-lus bandbreedte van de versterker te beperken, zoals getoond wordt in fig. 7. Fig. 8 laat zien dat de collectorspanning wordt ongevormd tot een soort gemoduleerd DC signaal, hetwelk niet echt verrassend is omdat de opgewekte DC component niet wordt verzwakt door de laagdoorlaatfiltering, terwijl de AC component wél wordt verzwakt. In dit voorbeeld is de frequentie van hetingangssignaal 1 kHz en de afsnijfrequentie is vastgelegd op 200 Hz. Het ligt voor de hand dat dit verschijnsel erger wordt naarmate de afsnijfrequentie lager wordt gekozen. Dus dit is een andere reden om de afsnijfrequentie zo hoog mogelijk te kiezen, hetwelk tendeeert naar een situatie waarin de terugkoppelmarge in de audioband constant gehouden wordt. Zoals in fig. 9 te zien is blijft, als de afsnijfrequentie op 20 kHz wordt gekozen, de AC component dominant.



Figuur 7: Het toevoegen van een condensator om de open-lus bandbreedte te beperken, creëert een geheugen voor de "DC" component, opgewekt door de vervorming. Vergelijk met fig. 4.



Figuur 8: De collectorspanning zonder (bovenste spoor) en met de condensator van fig. 7 toegevoegd (onderste spoor). Merk op dat de collectorspanning van het onderste spoor meer een gemoduleerd DC signaal is dan een AC signaal. Ingangssignaal 1 kHz, afsnijfrequentie 200 Hz. Vergelijk met fig. 5.



Figuur 9: Dezelfde situatie als in fig. 8 is getoond, alleen is de open-lus afsnijfrequentie op 20 kHz i.p.v. 200 Hz gesteld.

N.B. Dit effect zal *evenmin* worden gedetecteerd met metingen met continue sinussen, eenvoudigweg omdat het wordt veroorzaakt door korte-termijn variaties van de amplitude van hetingangssignaal, zoals dat optreedt bij muziek, maar wat niet gebeurt met continue sinustonen. Een toneburst signaal zou het, in meer extreme gevallen, bloot kunnen leggen.

N.B. Merk op dat dit mechanisme een artefact opwekt die *specifiek* is voor teruggekoppelde versterkers omdat de noodzakelijke afname van de versterking met de frequentie de introductie van de afsnijfcondensator vereist. We mogen dus concluderen dat terugkoppeling niet altijd "narigheid" onderdrukt, maar ook nieuwe "narigheid" kan *introduceren*! Een ander voordeel van een hoge afsnijfrequentie van de open-lus versterking is dat de hersteltijd na oversturing kort is.

Figuur 6 toont dat de verschuiving snel toeneemt met de amplitude van het ingangssignaal, een kwadratische fit benadert de kromme best goed. Dit kan duiden op de eis dat een versterker “uitsturingsruimte” nodig heeft omdat dit effect meer uitgesproken is als de versterker dichter naar (maar nog niet in!) oversturing wordt uitgestuurd. Omdat het ook aanleiding geeft tot de variërende lading van de afsnij-condensator en derhalve resulteert in relatief langzame omhullende signalen aan de uitgang van de versterker, zou het ook geïnterpreteerd kunnen worden als een “trage” responsie, niet gerelateerd aan de stijgtijd. Dus als dit verschijnsel wordt onderdrukt, zou de versterker zich een stuk beter gedragen tot aan het niveau van oversturing en zou een “normale” stijgtijd voor weergave in de huiskamer volstaan.

Het verlagen van de versterking van een versterkertrap door het verhogen van de emitterweerstand, een bekende vorm van (lokale) tegenkoppeling (zie fig. 4), vermindert, verrassend genoeg, dit effect niet proportioneel. Als alle beschikbare versterking gebruikt zou worden voor terugkoppeling verergert dat de situatie juist. Dit blijkt uit tabel 1, hieronder:

Nominale versterking	Verschuiving van de gemiddelde collector potentiaal	Minimale waarde bij gebruik versterking voor terugkoppeling
240	1,6 V	6,67 mV
43	0,46 V	10,70 mV
9.83	0,13 V	13,22 mV

Tabel 1: *Verschuiving van de gemiddelde collectorpotentiaal van een enkele versterkertrap als functie van de versterking als deze wordt bepaald door (lokale) tegenkoppeling d.m.v. een emitterweerstand. $V_{cc} = 36\text{ V}$, $I_c = 1\text{ mA}$.*

Het onderdrukken van dit verschijnsel vereist derhalve andere methoden om de individuele versterkertrappen te lineariseren dan het aanbrengen van een relatief grote emitterweerstand. Het ontwerpteam van “Temporal Coherence” is er in geslaagd om een oplossing voor dit probleem te vinden.

Een andere beperking, geïntroduceerd door terugkoppeling, is bekender: de ‘snelheid’ (slew rate) van een versterker (de maximale dV_{out}/dt). Deze wordt veroorzaakt door de stroom, nodig voor het laden van de afsnijcondensator door de versterkertrap. Hoe groter de condensator, hoe lager de slew rate is. Ook dit pleit voor een kleine condensator (en dus voor een brede open-lus bandbreedte). Merk op dat de slew rate beperkingen oplegt voor de spectrale inhoud van de signaalbron en / of een ingangfilter vereist om dit onder normale operationele omstandigheden te garanderen.

4.6 Beperkingen aan de terugkoppelmarge

We zijn inmiddels verschillende effecten tegengekomen die pleiten voor een lineaire open-lus versterking met een hoge afsnijfrequentie. Dit wordt vaak genoemd in de populaire high-end literatuur, gebaseerd op luisterervaringen, maar zonder technische of wetenschappelijke onderbouwing die de moeite van het noemen waard is. In het hierboven besprokene kunnen echter tenminste enige indicaties worden aangetroffen die dit ondersteunen en die het

plausibel maken dat de uitwisseling van (lokale) tegenkoppeling en (globale) terugkoppeling *niet* tot versterkers leidt met dezelfde *gehoormatige* kwaliteit. Het lijkt er eerder op dat het beter is om de open-lus versterking zoveel mogelijk te lineariseren en dan een matige (globale) *terugkoppeling* toe te passen. De bijkomende voordelen zijn dat i) de afsnijfrequentie van de open-lus versterking hoog kan worden gekozen zodat een constante terugkoppelmarge in het audiogebied (< 20 kHz) haalbaar wordt, ii) dat de versterker hoofdzakelijk signaal i.p.v. naringheid aan het verwerken is en iii) de hersteltijd na oversturing kort is.

De terugkoppelmarge en de gesloten-lus bandbreedte van een versterker zijn gekoppeld om de stabiliteit met (globale) terugkoppeling te handhaven. Optimale stabiliteit wordt verkregen als de open-lus versterking vanaf een zekere frequentie met 6 dB/oct. daalt en dat de faseverschuiving -90° bedraagt. De consequentie is dat de maximale terugkoppelmarge bij 20 kHz gelijk is aan de gesloten-lus bandbreedte gedeeld door 20 kHz. Dit volgt rechtstreeks uit de vergelijking voor het versterking-bandbreedte product. Dus als een hoge terugkoppelmarge bij 20 kHz vereist wordt, moet de versterker een brede gesloten-lus bandbreedte hebben. Hoewel dit -theoretisch- geen probleem is, zijn er echter wel een aantal praktische problemen zoals i) de afsnijfrequentie van de vermogenstransistoren en ii) de verwerking van de signalen van radiozenders (en wat er nog meer aan hoogfrequente troep rondwaart die bijdraagt aan de naringheid), welke aanleiding kunnen geven tot irritante en waarneembare artefacten. Omdat de versterker met het toenemen van de frequentie steeds minder lineair wordt, zullen meer harmonische en intermodulatieproducten van de hoge frequenties worden opgewekt die, op zichzelf, wellicht niet waarneembaar zijn, maar wel degelijk een nadelige invloed op het totale geluidsbeeld kunnen hebben. (**N.B.** Merk op dat door lineariseren van de individuele versterkertrappen dit effect kleiner wordt!). Daarom kan de terugkoppelmarge niet “tot in het oneindige” worden opgevoerd, zelfs niet tot maar “stratosferische hoogten”. In zekere mate kan de strikte relatie tussen de terugkoppelmarge en de gesloten-lus bandbreedte worden omzeild: indien (in de Nyquist presentatie) het punt $(-1, 0)$ niet binnen de kromme van het $\mu\beta$ product valt, zal de versterker stabiel zijn. Met slimme trucs kan dit worden gerealiseerd, zelfs als de helling geen nette -6 dB/oct. is en/of de faseverschuiving afwijkt van -90° . Maar de prijs is dat de stabiliteit van de versterker afhankelijk wordt van zijn belasting (en een luidspreker is zelden een zuivere weerstand, zie onder) en dat zijn impulsresponsie degradeert, dus wordt additionele tijdversmering geïntroduceerd. (**N.B.** Artikelen over tijdversmering kunnen worden gevonden op www.temporalcoherence.nl). Voor een extreem geval: zie fig. 10 en 11. **N.B.** Een vergelijkbare tijdversmering als die van fig. 10, veroorzaakt door een tweeter, getoond in fig. 12, bleek verantwoordelijk voor een duidelijke achteruitgang van de gehoormatige kwaliteit (ref. 8)). Een verminderd tijdoplossend vermogen zou wel eens de basis kunnen zijn voor de eis van “snelle” versterkers omdat het aanleiding geeft tot verlies van detail, hetwelk eenvoudigweg geïnterpreteerd zou kunnen worden als “trage” responsie.

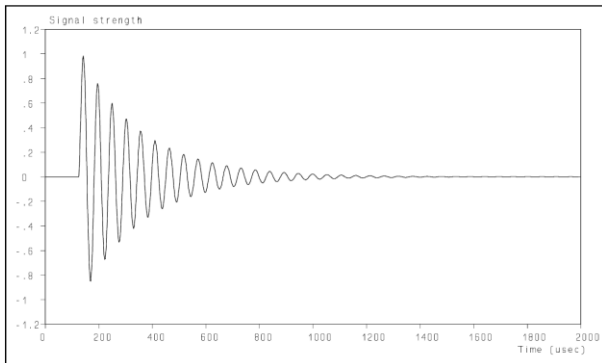


Figure 10: Impulsresponsie van een versterker met terugkoppeling op de rand van stabiliteit.

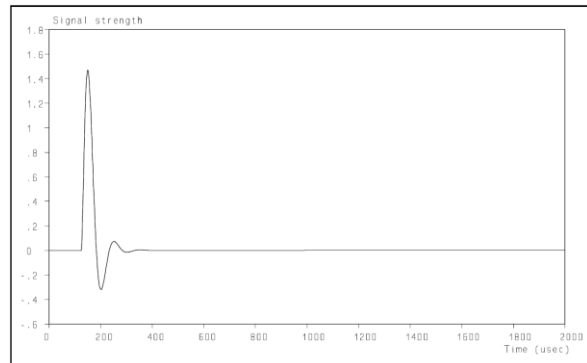


Figure 11: Impulsresponsie van een versterker met een lagere terugkoppelfactor, en dus een hogere vervorming, maar met een hoger temporeel oplossend vermogen.

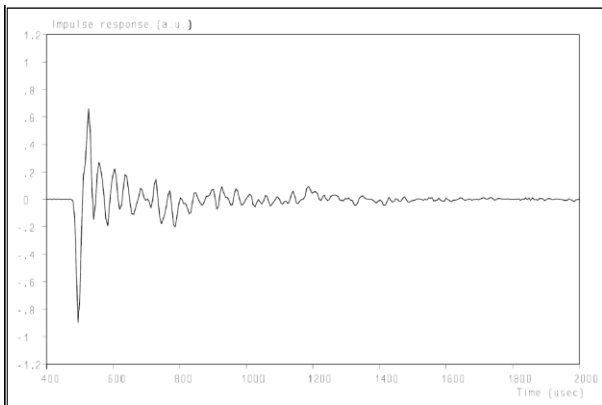


Figure 12: Een vergelijkbare responsie als die van fig. 10, ditmaal van een tweeter, die verantwoordelijk bleek voor een duidelijk hoorbare achteruitgang van de gehoormatige kwaliteit.

Dus het is mogelijk om wat extra terugkoppelmarge te realiseren, maar er zijn grenzen aan wat bereikt kan worden bij 20 kHz. Het is mogelijk om deze bij lagere frequenties omgekeerd evenredig met de frequentie te laten toenemen, maar met de bovenbeschreven nadelen. Kolinummi (ref. 2) vond dat boven de open-lus afsnijfrequentie, de vervorming veel sneller toenam dan mocht worden verwacht op basis van -6 dB/oct. helling, waarschijnlijk veroorzaakt door de vervorming van de vervormingsproducten, die minder en minder door de terugkoppeling worden onderdrukt en door het toenemen van de vervorming van de ingangsvorstversterker (zie fig. 1). Dus, wederom, het is waarschijnlijk het beste om te streven naar een constante terugkoppelmarge over het hele audiogebied.

5. De consequenties van de luidspreker impedantie

De impedantie van een luidspreker is complex, hetwelk inhoudt dat spanning en stroom bij de meeste frequenties niet in fase zijn, hetwelk nogal verschillend is van de eigenschappen van een weerstand. Dus het kan voorkomen dat de versterker bijv. een *positieve* uitgangsspanning en een *negatieve* uitgangsstroom moet leveren. Dit veroorzaakt problemen met de stuurspanningen van de vermogenstransistoren, welke aanleiding kunnen geven tot hoorbare artefacten omdat e.e.a. middels de terugkoppeling geregeld moet worden. Hiermee hangt samen dat een luidspreker *bij dynamisch gebruik* niet tijd-invariant is

omdat deze vermogen op kan slaan (in tegenstelling tot een weerstand), dat op ieder moment aan de versterker teruggeleverd kan worden. Hoe de versterker op dit verschijnsel reageert zal sterk afhangen van het ontwerp. Maar impedantiecompensatie is altijd aantrekkelijk. **N.B.** Meer informatie over de impedantie van luidsprekers en hoe de variaties erin gecompenseerd kunnen worden kan in ref. 9 worden gevonden, evenals op de website van “Temporal Coherence” www.temporalcoherence.nl

6. Voedingen

Alle versterkers hebben een voeding nodig, die in staat is om het benodigde vermogen en piekstromen te leveren. Maar hoe *stabiel* dient de *spanning* op de voedingslijn te zijn? Opgemerkt kan worden dat een variërende spanning op de voedingslijn zal leiden tot het verschuiven van de werkpunten van de individuele versterkertrappen. We hebben al gezien dat (globale) terugkoppeling minder effectief is voor de eerste versterkertrappen. Onbekend is hoe variaties in de voedingslijnsparingen interageren met de niet-lineariteiten van de verschillende versterkertrappen. Ook wordt er een geheugeneffect opgewekt: de geschiedenis van hetingangssignaal is ook bepalend voor de spanning op de voedingslijn vanwege de hoeveelheid stroom die aan de versterker is geleverd. Dit kan aanleiding geven tot “onrust” in het geluidsbeeld en tot een vorm van overspraak als beide kanalen van een stereoversterker gebruik maken van dezelfde voeding. (**N.B.** Alweer, deze effecten worden niet gevonden bij het gebruik van continue sinussen, domweg omdat het een variërende amplitude van hetingangssignaal vraagt, wat niet optreedt met een analyse middels continue sinussen). Het gebruik van gestabiliseerde voedingen zal het gros van deze problemen oplossen, cq. voorkomen. De vraag is alleen hoe goed de stabilisatie zijn moet.

N.B. Opgemerkt dient te worden dat er ook een frequentieafhankelijkheid is, die vaak over het hoofd wordt gezien. De ongestabiliseerde voedingslijn wordt bijgeladen met de (dubbele) lichtnetfrequentie (50 Hz in Europa, 60 Hz in Noord-Amerika) en dit is traag t.o.v. de gebruikelijke testfrequentie van 1 kHz. Maar bij lage frequenties, bijv. 20 Hz, treedt het omgekeerde op: de stroom, die de versterker vraagt, verandert langzaam in vergelijking met de bijlaadfrequentie. Daardoor heeft de belasting op de voedingslijn meer het karakter van gelijkstroom als de geluidsfrequentie laag is omdat deze, in de buurt van de maxima, vrijwel de dubbele waarde heeft die een belasting van een 1 kHz signaal met dezelfde amplitude geeft.

N.B. Een belangrijke werkhypothese, die volgt uit deze analyse, is dat verschuivende werkpunten van de individuele versterkertrappen zeer nadelig zijn voor de gehoormatige kwaliteit van het weergegeven geluid. Het geeft aanleiding tot “onrust” in het gereproduceerde geluid, waarschijnlijk omdat het zaken, als de omhullende van hetingangssignaal, toevoegt aan het uitgangssignaal. Dus de werkpunten van de individuele versterkertrappen moeten “rotsvast” worden gehouden onder *dynamische* condities (**N.B.** Met *dynamisch* wordt hier bedoeld de eigenschappen van signalen zoals muziek, niet van een wisselspanning met een constante amplitude!). Twee belangrijke oorzaken van dergelijke verschuivingen zijn geïdentificeerd: i) de niet-lineaire eigenschappen van de individuele versterkertrappen en ii) een variërende voedingsspanning. Het elimineren van beide leidt, in het algemeen, tot een beter klinkende versterker.

7. Eigenschappen die niet bepaald kunnen worden middels continue tonen

Hoewel er al enige hierboven zijn genoemd, zijn er een aantal verschijnselen, welke niet middels een meting met continue sinussen van een constante amplitude kunnen worden vastgesteld, dit in strijd met het gangbare idee dat dit mogelijk zou moeten zijn, op basis van de Fourier theorie. De onderstaande lijst is niet volledig, maar een aantal belangrijke eigenschappen worden vermeld:

- Het verschuiven van de werkpunten van de individuele versterkertrappen
- Veranderingen in de lading van de afsnij-condensator t.g.v. het verschuiven van de werkpunten
- Fasemodulatie veroorzaakt door een variërende gesloten-lus bandbreedte
- Tijdversmering, geïntroduceerd door de versterker
- Variaties van de voedingsspanningen t.g.v. veranderingen in hetingangssignaal / afgegeven vermogen

Op basis van de verklaringen, hierboven gegeven, zou duidelijk moeten zijn waarom deze effecten niet bepaald kunnen worden middels metingen met continue sinussen van een constante amplitude. De reden, waarom het in strijd is met het gangbare idee, is dat het toepassen van de Fourier theorie een aantal voorwaarden vereist, die veelal worden genegeerd. Dit verklaart ook de punten die Kolinummi (ref. 2) naar voren brengt. Dit zal verder worden toegelicht in de Appendix.

8. Onconventionele ontwikkelingsprocedure

Het ontwikkelteam van “Temporal Coherence” wordt ondersteund door een luisterteam, wier leden geen technische achtergrond hebben, zij zijn derhalve niet in staat om de technische reden te noemen van de dingen die ze horen. Maar ze hebben wel een achtergrond in muziek (als musici) en zijn derhalve erg vertrouwd met “natuurlijke” geluiden. Dus als ze een mening vormen over onze producten, is deze altijd gebaseerd op de *gehoormatige* kwaliteit. Door de jaren hebben ze ons gewezen op hoorbare verschijnselen die werden opgewekt in onze apparatuur. In de meeste gevallen was de oorzaak eerst een groot mysterie en deze te identificeren was een uitdaging, de resultaten van een aantal zijn in dit artikel terug te vinden.

Als het ontwikkelteam meende de boosdoener te hebben gevonden, werd er actie ondernomen om het probleem op te lossen en de lessen werden in de loop van de tijd gebruikt om versterkers te ontwikkelen langs de lijnen, zoals beschreven in dit artikel. Dit heeft geresulteerd in apparatuur met een duidelijk hoger niveau van de *gehoormatige* kwaliteit. De verbeteringen waren merkbaar in bijv. een betere controle over het laag, meer dynamiek, meer detail, betere weergave van s-klanken en, ja, een meer “muzikaal” geluid. Of, zo U wilt, het klonk minder als gereproduceerd geluid en meer als het origineel. Dit werd bevestigd door zowel ons eigen luisterteam als door anderen (die op geen enkele wijze betrokken waren bij “Temporal Coherence”, zoals recensenten van HiFi bladen). Het is verleidelijk om aan te nemen dat de hier gepresenteerde verklaringen op correcte wijze de oorzaken van de verbeteringen beschrijven, maar dat is niet zonneklaar. We weten dat de verbeteringen er zijn, maar we hebben geen sluitend bewijs dat de gepresenteerde

verklaringen realistisch en volledig zijn. Dat zal aanvullende experimenten vereisen, die niet noodzakelijkerwijs door onszelf hoeven te gebeuren. Dus als iemand andere of aanvullende redenen kan geven waarom het ontwerpen van versterkers, langs deze lijnen, tot verbeteringen in de gehoormatige kwaliteit leiden, zullen we deze verwelkomen.

9. Conclusies

Geconcludeerd kan worden dat er niets fundamenteel verkeerd is aan (negatieve) terugkoppeling, maar dat systemen met terugkoppeling vatbaar zijn voor een aantal parasitaire effecten, die gewoonlijk weinig of geen aandacht krijgen. Dus terugkoppeling is *geen* Haarlemmerolie voor alle onvolkomenheden voor een versterker, *het kan zelfs nieuwe onvolkomenheden introduceren*. Het beheersen en beperken van deze parasitaire effecten vereist een zorgvuldig ontwerp van de versterker met impliciete linearisatie van de individuele versterkertrappen op straffe van hoorbare artefacten die de geluidswaergeving aantasten. De ontwerper dient zich te realiseren dat (globale) terugkoppeling slechts tot op zekere hoogte kan worden toegepast en dat het dynamische gedrag van de versterker bij muzieksignalen (veel) belangrijker is dan vervormingscijfers, in overeenstemming met de bevindingen van refs. 2 en 3. Dit verklaart waarschijnlijk de hoorbare verschillen tussen versterkers en andere audioapparatuur, die niet begrepen kunnen worden door de vervormingscijfers en die terugkoppeling in sommige high-end kringen een slechte naam heeft bezorgd. Dit soort artefacten zijn derhalve moeilijk, en in veel gevallen in het geheel niet, te meten middels *continue* sinussen. Omdat muziek bij uitstek een voorbeeld is van een *dynamisch* proces, is dit waarschijnlijk cruciaal voor de gehoormatige kwaliteit van een versterker. Dit vereist meer complexe testsignalen, die niet-stationaire omstandigheden, zoals deze in muziek optreden, representeren. Zolang hier echter geen overeenstemming over is, blijft het menselijk gehoor nog steeds het best beschikbare "meetinstrument".

Het merendeel van de parasitaire effecten, besproken in dit artikel, worden veroorzaakt door de niet-lineariteit van de individuele versterkertrappen. Deze dienen te worden onderdrukt door linearisering van de individuele versterkertrappen middels lokale tegenkoppeling of andere maatregelen. Door de open-lus versterking zo breedbandig mogelijk te maken, maar desondanks een niet te brede gesloten-lus bandbreedte te realiseren, kan een constante terugkoppelfactor in de hele audioband worden bereikt. Een matige globale terugkoppeling zal leiden tot een optimaal ontwerp voor de elektronica voor high-end audio toepassingen door het verbeteren van de dynamische responsie op muzieksignalen.

De werkpunten van de individuele versterkertrappen dienen "rotsvast" te blijven en dat vereist ook gestabiliseerde voedingen. Dit is een essentiële voorwaarde voor high-end versterkers.

Hoewel de ontwikkelingen bij "Temporal Coherence" geresulteerd hebben in een significante verbetering van de gehoormatige kwaliteit door het invoeren van de modificaties, beschreven in dit artikel, is er geen bewijs dat de aangevoerde verklaringen correct of volledig zijn. Desondanks is aangetoond dat deze verschijnselen optreden en het lijkt logisch om te concluderen dat deze een negatieve invloed op de gehoormatige kwaliteit van versterkers hebben. Anders is het moeilijk te begrijpen dat er verbetering zou optreden als ze worden onderdrukt.

Opgemerkt kan worden dat kritische opmerkingen van high-end enthousiasten veelal door technologie experts hooghartig terzijde worden geschoven als “niet-wetenschappelijk” geklets van freaks die geen snars van de theorie snappen. De auteur deelt die mening niet, omdat te vaak kritische opmerkingen van mensen met “gouden oren” wel degelijk hout snijden, alhoewel het aanvankelijk volstrekt onduidelijk was wat er de technische of wetenschappelijke achtergrond van was. Zulke opmerkingen hebben het ontwikkelteam geholpen om de apparatuur te verbeteren, hoewel de effecten van de individuele stapjes moeilijk wetenschappelijk aantoonbaar waren. Maar de vooruitgang over de jaren is boven iedere twijfel verheven.

Dankbetuiging

De auteur wil zijn speciale dank uitspreken voor Menno van der Veen, Jan Didden en Guido Tent voor hun bijdragen aan de vruchtbare discussies die tot dit artikel geleid hebben. Hij wil ook Prof. Dr. Ir. Ronald van Zolingen bedanken voor zijn kritische beoordeling van het concept en zijn aanbevelingen voor verbeteringen, die zonder twijfel geholpen hebben om de kwaliteit van dit artikel te verhogen. In het bijzonder worden de leden van het luisterteam van “Temporal Coherence” bedankt voor hun zorgvuldige luisteren naar de producten. Hun kritische commentaren zijn essentieel geweest voor de verdere ontwikkeling en de continue verbetering van de *gehoormatige* kwaliteit van de producten. Hun oren zijn nog steeds de beste meetapparatuur totdat we weten wat we moeten meten.

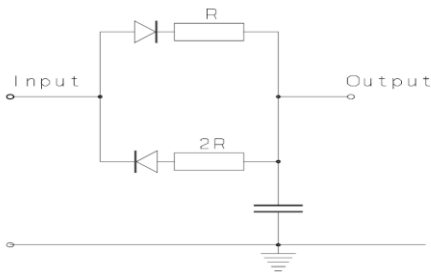
APPENDIX

Veelal veronachtzaamde Randvoorwaarden bij het toepassen van de theorie van de Fourier Analyse

De Fourier Theorie is een elegant stuk wiskunde dat beschrijft hoe een signaal in de tijd kan worden omgezet naar een signaal in frequentie. In wat meer wiskundige termen heet het dat de Fourier Transformatie (FT) een functie in het tijddomein *één-eenduidig* omzet naar het frequentie-domein. Met *één-eenduidig* wordt bedoeld dat bij iedere functie in het tijddomein er slechts *één* (en ook maar *precies één*) corresponderende functie in het frequentiedomein bestaat. Daarom is er ook de weg terug: de *Inverse Fourier Transformatie* (IFT) brengt een functie in het frequentiedomein *één-eenduidig* over naar een functie in tijddomein. Terzijde kan worden opgemerkt dat de Fourier theorie spreekt over heen-en-weer transformaties van functies van de onafhankelijk variabele x naar de onafhankelijke variabele $1/x$. Voor meer informatie, zie een aantal boeken, zoals refs. 10, 11 en 12.

De Fourier theorie kent een aantal interessante toepassingen die ook door mij veel gebruikt zijn (en worden) om allerlei verschijnselen in audio te kunnen analyseren. Er worden echter een aantal voorwaarden gesteld aan de *correcte* toepassing van de Fourier theorie. Voorwaarden, die vaak veronachtzaamd worden zijn -naast een aantal andere eisen- dat het systeem waarop het wordt toegepast *lineair* en *tijd-invariant* (ook intern!) is. Dit laatste houdt in dat de eigenschappen van het bestudeerde systeem o.a. *niet afhankelijk mogen zijn van het ingangssignaal*. Als hieraan niet is voldaan kan de theorie niet, of slechts gedeeltelijk, correct worden toegepast en dienen de resultaten met grote voorzichtigheid geïnterpreteerd te worden. Hiervan zullen een paar voorbeelden worden gegeven.

Allereerst de frequentieresponsie. Een signaal in tijddomein kan worden ontbonden in een oneindige reeks sinussen en cosinussen van oplopende frequentie. Als nu de responsie van een systeem in het *frequentiedomein* bekend is, kan hiermee de responsie van het systeem op een willekeurig tijdsignaal worden uitgerekend: het tijdsignaal wordt middels een FT naar het frequentiedomein omgezet, aldaar vermenigvuldigd met de frequentiekaracteristiek van het systeem (dat levert dan het uitgangssignaal in het frequentie-domein op) en middels een IFT wordt het uitgangssignaal in tijddomein berekend. Dit gaat goed zolang het systeem lineair en tijd-invariant is. Maar als het systeem niet lineair is klopt het sommetje niet meer omdat bepaalde verschijnselen niet tevoorschijn komen. Bekende voorbeelden zijn detectie en intermodulatie. Deze ontstaan juist door niet-lineariteit en als deze niet expliciet wordt toegevoegd worden de gerelateerde effecten niet in het uitgangssignaal berekend. Willen deze boven water komen moet eerst het signaal in tijddomein met de niet-lineariteit worden vermenigvuldigd voordat de FT en de IFT mogen worden toegepast. Maar het uitrekenen van bijv. een gefilterd signaal in een niet-lineair systeem kan alleen maar benaderend gedaan worden met een beperkte nauwkeurigheid. We zijn dat in dit artikel tegengekomen, bijv. toen we de fasemodulatie bespraken ten gevolge van de afhankelijkheid van de openlus versterking van het ingangssignaal. Een ander voorbeeld is te zien in fig. A-1.



Figuur A-1: Voorbeeld van een schakeling waarvan de Fourier theorie niet in staat is om de responsie te voorspellen, zelfs niet als het gedrag voor continue sinussen gemeten zou zijn. De redenen zijn het niet-lineaire gedrag (t.g.v. de diodes in de schakeling) en het geheugen, gevormd door de condensator omdat de lading af zal hangen van het ingangssignaal in het verleden.

Een ander voorbeeld hoe men door dit effect de mist in kan gaan, is het menselijk gehoor. Met experimenten is bepaald dat mensen geen continue sinusgeluiden boven de 20 kHz waar kunnen nemen en daaruit heeft men, op basis van de lineaire Fourier theorie, de conclusie getrokken dat het weergeven van frequenties boven de 20 kHz “dus” niet nodig is omdat deze toch geen invloed op het waargenomen geluidsbeeld zouden hebben. Maar voor een niet-lineair systeem is die conclusie incorrect want door bijv. intermodulatie kunnen tonen boven de 20 kHz wel degelijk voor het geluidsbeeld van invloed zijn (refs. 13 en 14). Het menselijk gehoor is juist sterk niet-lineair en een belangrijk gevolg hiervan is dat het *temporeel oplossend vermogen* ervan veel hoger is dan op basis van de continue sinustoon metingen verwacht kan worden. Sommige experimenten indiceren dat dit een orde van grootte beter is (refs. 15 en 16). Het zou dan ook geen verbazing moeten wekken dat vooral metalen percussie instrumenten dit het duidelijkst laten horen, maar helaas zijn veel microfoons en tweeters nog onvoldoende in staat om het temporeel oplossend vermogen van het menselijk gehoor te evenaren. Met als gevolg dat velen van mening zijn dat de “hoge resolutie” digitale formaten onnodig zijn omdat men geen verschil hoort, zonder zich af te vragen waar de beperkingen zitten ☹. Meer informatie hierover is te vinden op www.temporalcoherence.nl

Als een systeem niet tijd-invariant is, betekent dit gewoonlijk dat de gedragingen van het systeem op een of andere manier van de voorgeschiedenis afhangen. Omdat de Fourier Theorie een *integrale* methode is, is een van de impliciete voorwaarden dat het systeem zich gedurende de gehele tijd, waarover de berekeningen lopen, hetzelfde gedraagt. Een versterker doet dit -in veel gevallen- echter niet, dus de vraag dient gesteld te worden hoe goed een tijd-invariant systeem benaderd wordt. In het ontwerp kunnen geheugen-effecten sluipen die het gedrag van de versterker niet tijd-invariant maken en daardoor wordt het gedrag afhankelijk van het ingangssignaal uit het verleden, zelfs als bijv. oversturing wordt uitgesloten. Componenten die betrokken zijn bij geheugeneffecten zijn vaak condensatoren en spoelen omdat deze in staat zijn om energie op te slaan. Het is dan ook niet verwonderlijk dat deze een rol spelen in de gevonden geheugen-effecten: afsnij-condensator, voeding en luidspreker-belasting. In samenhang met niet-lineaire effecten kan dit geheugen-effect meer geprononceerd worden (zie bijv. fig. A-1). Bij het ontwerpen van high-end audio elektronica dient ernstig rekening te worden gehouden met potentiële geheugen-effecten, vooral parasitaire, die gemakkelijk aan de aandacht ontsnappen.

Het moge duidelijk zijn dat als niet voldaan is aan de eis van tijd-invariant gedrag, resultaten op basis van de Fourier theorie regelrecht de prullenbak in kunnen. Helaas wordt er vrijwel nooit rekening met deze essentiële voorwaarde gehouden en wordt bijv. een met continue sinussen bepaalde frequentie karakteristiek van een versterker klakkeloos geïnterpreteerd

alsof het een tijd-invariant systeem betrof. Maar heel vaak is dat niet het geval waardoor de gedragingen van de versterker met *dynamische* signalen verschilt van het (gewenste) gedrag en het gedrag met *stationaire* signalen. Om complexe en dynamische signalen, zoals muziek, goed weer te kunnen geven dient de versterker -naast allerlei andere voorwaarden- ook tijd-invariant te zijn. Anders ontstaan bijverschijnselen die zich vooral in het *tijddomein* manifesteren en tot een degradatie van het geluidsbeeld, en dus van de *gehoormatige* kwaliteit, aanleiding geven. Hetwelk on terug brengt bij de drie citaten in de Introductie van dit artikel.

References

1. Bruno Putzeys, "The F-word or, why there is no such thing as too much feedback", Linear Audio Volume 1 – Circuit design, pp. 112 – 133, April 2011, Linear Audio (Belgium)
2. Dr. Arto Kolinummi, "Audio Power Amplifiers", "subtitle "Towards inherently linear amplifiers". Linear Audio (Belgium, 2011), ISBN 9789490929091
3. Andrzej Dobrucki et. al, "Subjective and Objective Evaluation of the Audio Vacuum-Tube Amplifiers", AES Convention, Munich, Germany, May 2009
4. H.S. Black, "Feedback Amplifiers", Bell Laboratories Record, June 1934, Vol. XII, No. 10
5. M. Leach, "The Cascode Differential-Amplifier Input Stage", <http://users.ece.gatech.edu/mleach/lowtim/instage.html>
6. M. Ojala, "Non-linear distortion in audio amplifiers: Why do some amplifiers pass static distortion tests but fail listening tests?", Wireless World, January 1977, pp. 41 – 43
7. Robert R. Cordell, "Phase Intermodulation Distortion Instrumentation and Measurements", Journal of the Audio Engineering Society, Vol. 31, No. 3, 1983 March, pp. 114 - 123
8. Hans R.E. van Maanen, "Presentation Hans van Maanen AES Berlin 2017", www.temporalcoherence.nl Workshop3.pdf
9. Hans R.E. van Maanen and E.T. Zonneveld, "An extended Model for Impedance and Compensation of Electro-dynamic Loudspeaker Units and an Algorithm for their Determination, paper 3823, 96th AES convention, Amsterdam (Netherlands), 1994
10. A. Papoulis, "The Fourier Integral and its Applications", McGraw-Hill Book Company, New York (1962)
11. A. Papoulis, "Signal Analysis", McGraw-Hill Book Company, New York (1984)
12. V. Čížek, "Discrete Fourier Transforms and their Application", Adam Hilger Ltd., Bristol (1986)
13. V.M. Eguíluz, M. Ospeck, Y. Choe, A.J. Huspeth and M.O. Magnasco, "Essential Nonlinearities in Hearing", Physical Review Letters 84, 22 (May 2000)
14. David Griesinger, "Perception of mid frequency and high frequency intermodulation distortion on loudspeakers, and its relation to high-definition audio", www.davidgriesinger.com/intermod.ppt
15. Milind N. Kunchur, "Temporal resolution of hearing probed by bandwidth restriction", Acta Acustica, Vol. 94 (2008), pp. 594 – 603
16. Milind N. Kunchur, "Audibility of temporal smearing and time misalignment of acoustic signals", Technical Acoustics, Vol. 17 (2007)