

Analyse van het effect van niet-lineariteit op het uitgangssignaal van een versterker met terugkoppeling voor niet-continue signalen

Auteur: Dr. Hans R.E. van Maanen (Temporal Coherence)
Datum van uitgifte: 10 Maart 2020

1. Inleiding

Binnen de gemeenschap van high-end audiofielen woedt een stevige discussie over het gebruik van terugkoppeling. Sommigen stellen 'dat je niet genoeg terugkoppeling kunt hebben' (bijv. ref. 1), terwijl andere stellen dat terugkoppeling leidt tot 'niet-muzikale' elektronica. In een vorig rapport (ref. 2) is aangetoond dat, in tegenstelling tot de algemene opvatting dat terugkoppeling alleen maar imperfecties *onderdrukt*, het in werkelijkheid artefacten, die niet in het ingangssignaal aanwezig zijn, kan *introduceren*. De misvatting wordt veroorzaakt door het testen met continue, stationaire, sinusvormige signalen. Het kernpunt is dat muziek -gelukkig maar- niet stationair is en dat geheugeneffecten, in combinatie met de inherent niet-lineaire eigenschappen van de inwendige elektronica van versterkers, aan de basis liggen van de geïntroduceerde artefacten. Een belangrijke conclusie van ref. 2 is dat de analyse van niet-stationaire signalen interessantere resultaten oplevert om de *gehoormatige* kwaliteit van elektronica te beoordelen dan stationaire. Ook wordt aangetoond dat de gebruikelijke benadering, waarbij de resultaten van continue, stationaire, signalen gebruikt worden om te voorspellen hoe een versterker zal reageren op muziek onjuist zijn en dat de wijdverbreide vergelijkingen voor versterkers met terugkoppeling incorrect zijn. Meer details zijn te vinden in ref. 2 en deze zullen derhalve hier niet herhaald worden. Daarom moet een nieuwe manier, om de eigenschappen van elektronica voor niet-stationaire signalen te bepalen, ontwikkeld worden. Dit zal de bestudering van de effecten van niet-lineaire werklijnen, terugkoppeling en de onderlinge interacties op muzieksignalen mogelijk maken. Zulks is vereist om ons begrip van deze verschijnselen te verbeteren en ontwerpers behulpzaam te zijn bij het ontwikkelen van versterkers die beter klinken.

De gehoormatige kwaliteit van versterkers is moeilijk direct te koppelen aan de specificaties. Versterkers klinken verschillend, zelfs als de specificaties vergelijkbaar zijn, en veelal zijn deze orden van groter beter dan die van luidsprekers, die essentieel zijn om versterkers te vergelijken. De gehoormatige kwaliteit van versterkers hangt van een groot aantal aspecten af en het is verre van zeker dat deze allemaal bekend zijn. Het risico hiervan is dat onjuiste conclusies worden getrokken omdat sommige aspecten over het hoofd worden gezien of er geen rekening mee wordt gehouden. De verwarring wordt geïllustreerd door de verschillende meningen over terugkoppeling, die hierboven zijn aangehaald. In dit artikel zullen we laten zien dat versterkers met identieke terugkoppelfactoren vaak sterk verschillende eigenschappen hebben en dat terugkoppeling hoorbare en irritante artefacten kan introduceren. Dit wordt niet uitsluitend door terugkoppeling veroorzaakt, maar door de complexe interacties tussen de verschillende aspecten van het versterkerontwerp. We zullen ook verschillende uitlatingen op de fora vergelijken met resultaten van de analyse, gepresenteerd in dit artikel, om meer duidelijkheid te krijgen welke correct zijn en welke niet.

In par. 2 zullen de onjuistheden in de gebruikelijke analyse van audioapparatuur worden opgehelderd. In par. 3 zullen de effecten van de niet-lineaire eigenschappen van elektronica op niet-stationaire signalen worden geïllustreerd, die zullen worden toegepast op een gemodelleerde versterker, beschreven in par. 4. In par. 5 zal de niet-lineaire analyse worden uitgelegd en in par. 6 zullen de resultaten van deze analyse worden gepresenteerd. Deze resultaten zullen de basis vormen van een discussie en interpretatie in par. 7. Het artikel sluit af met conclusies, aanbevelingen en suggesties voor toekomstig werk in par. 8.

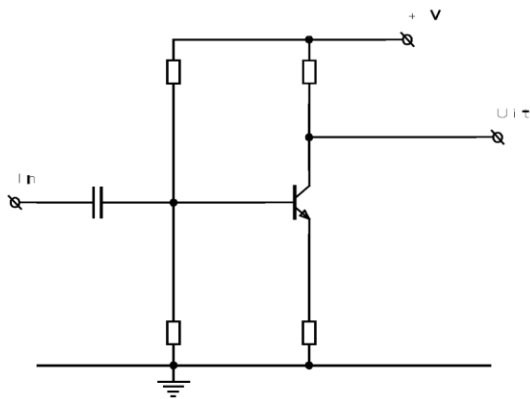
2. Achtergrond

Het is belangrijk om te benadrukken dat alle vergelijkingen, die zijn afgeleid om te 'bewijzen' dat terugkoppeling allerlei narigheid onderdrukt, twee basale fouten hebben: de eerste is dat de open-lus versterking μ_0 een constante is, maar dat is deze niet, zoals direct in meer detail zal worden aangetoond. Een belangrijke consequentie is dat de vergelijkingen, die hiermee zijn afgeleid, slechts benaderingen zijn, op z'n best. Het ligt voor de hand dat, grofweg, hoe meer μ_0 afwijkt van een constante, des te sterker de resultaten in werkelijkheid verschillend zullen zijn van de benaderingen. Deze vergelijkingen worden ook gebruikt om te 'bewijzen' dat terugkoppeling de vervorming van een versterker reduceert. Maar vervorming ontstaat juist door het niet-constant zijn van μ_0 , dus het 'bewijs' gebruikt de aanname van een constante μ_0 om de vervorming te onderdrukken die ontstaat door een niet-constante μ_0 . (!) Wiskundig gesproken is dat vloeken in de kerk! De tweede fout hangt samen met de eerste: er wordt aangenomen dat de verschillende soorten narigheid separaat kunnen worden geanalyseerd en dat interacties mogen worden genegeerd. Dit is echter onjuist omdat dit soort interacties de bron van artefacten zijn. Het negeren ervan is een recept voor over het hoofd zien van een aantal ernstige nadelen van terugkoppeling. Deze artefacten, gerelateerd aan de interacties, zijn zeer waarschijnlijk de bron van de stevige discussie tussen audiofielen.

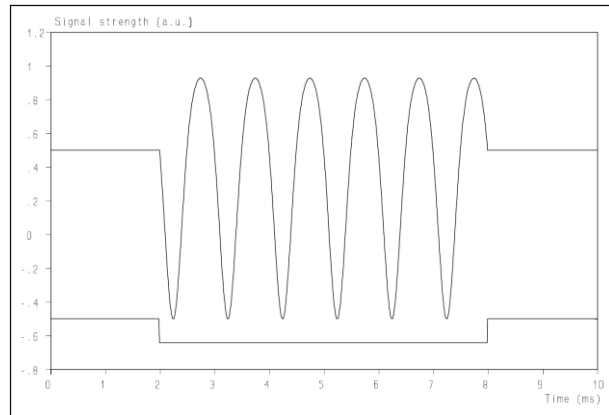
De gebruikelijke werkwijze, het gebruik van continue sinus-signalen voor de analyse van een systeem, is gebaseerd op de aanname dat de responsie voor continue sinus-signalen bepalend is voor het gedrag met elk signaal. Dit is gebaseerd op de Fourier theorie (bijv. refs. 3 – 5), maar dat is niet toegestaan. De Fourier theorie mag alleen worden toegepast op systemen die *lineair en tijdinvariant* zijn, maar een versterker is geen van beide. Men moet dus niet verbaasd zijn dat een dergelijke benadering tot onjuiste uitkomsten leidt. Daarom is een andere analyse vereist om de responsie van een versterker (die intern altijd niet-lineaire eigenschappen heeft) op een niet continu signaal, zoals muziek, te bepalen. Dergelijke inconsistenties tussen theorie en praktijk zijn eerder opgemerkt (bijv. refs. 6 en 7), maar de dieperliggende oorzaken zijn noch geïdentificeerd, noch bestreden. In dit artikel wordt de responsie in de tijd van een versterker met terugkoppeling direct bepaald door gebruik te maken van vergelijkbare technieken voor het numeriek oplossen van differentiaalvergelijkingen. Een dergelijke techniek is eerder toegepast (ref. 8) en bleek succesvol te werken.

3. Effecten van niet-lineaire eigenschappen van elektronica

Alvorens de eigenlijke analyse wordt gestart is een basaal begrip van de effecten van de niet-lineaire eigenschappen behulpzaam. In fig. 1 staat een eenvoudige versterkertrap en ten gevolge van de niet-lineaire eigenschappen van de basis-emitter diode vervormt deze. De spanning op de collector, als een toneburst van 6 perioden alsingangssignaal wordt gebruikt, is te zien in fig. 2, bovenste spoor. Dit signaal is gesuperponeerd op de collectorspanning in rust. Na aftrek van de collectorspanning in rust, kan dit worden beschouwd als de som van een wissel- en een gelijkspanning. De gelijkspanning is niets anders dan de gemiddelde waarde van het signaal over de gehele lengte van de toneburst. (**N.B.** In het ideale geval zou er geen gelijkspanning mogen zijn!). De gelijkspanning wordt getoond in fig. 2, onderste spoor, waar de waarden aan de linker- en rechterzijde corresponderen met de collectorspanning in rust. De niet-lineariteit introduceert dus een verschuiving in de gemiddelde gelijkspanningswaarde van de collector, hetwelk kan worden beschouwd als *detectie* van het signaal. Met andere woorden: de *omhullende* van het signaal is ook een uitgangssignaal van deze trap! Dit is te vergelijken met de detectie van AM-radiosignalen en het geeft aanleiding tot het introduceren van frequenties *lager* dan de frequentie van het signaal dat het opwekt. Dit zal in meer detail worden besproken in par. 6 en 7. Merk op dat een met een continu signaal, het opwekken van de omhullende niet wordt opgemerkt omdat de omhullende van een continu signaal slechts een 'constante' gelijkspanning is. Dit laat al een serieuze beperking van het meten met continue sinus-signalen zien. Zie ook ref. 2.

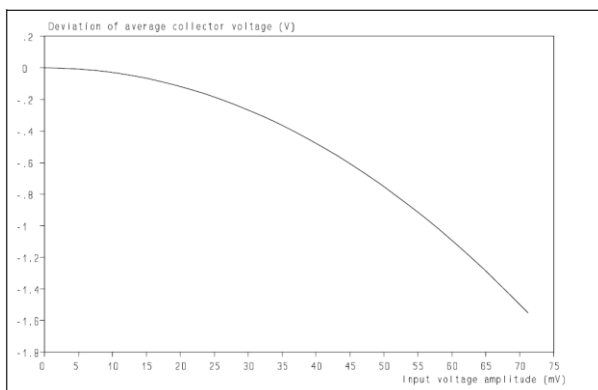


Figuur 1: Een eenvoudige versterkertrap zal vervorming opwekken.



Figuur 2: De collectorspanning van de trap van fig. 1 met een toneburst van 6 perioden aan de ingang (bovenste spoor) en de gemiddelde waarde ervan (onderste spoor). Frequentie van toneburst is 1 kHz.

Het zou geen verrassing mogen zijn dat de afwijking van de gemiddelde collectorspanning afhangt van de sterkte van hetingangssignaal, zoals te zien is in fig. 3. Dit verschijnsel zou verantwoordelijk kunnen zijn voor de stelling dat een versterker 'headroom' moet hebben omdat, ten gevolge van dit effect, de artefacten meer dan proportioneel toenemen met de amplitude van hetingangssignaal. Maar een goed ontworpen versterker zou dergelijke artefacten niet op een hoorbaar niveau mogen produceren en derhalve geluid van hoge kwaliteit moeten leveren tot aan het clipniveau. We komen hier straks op terug.



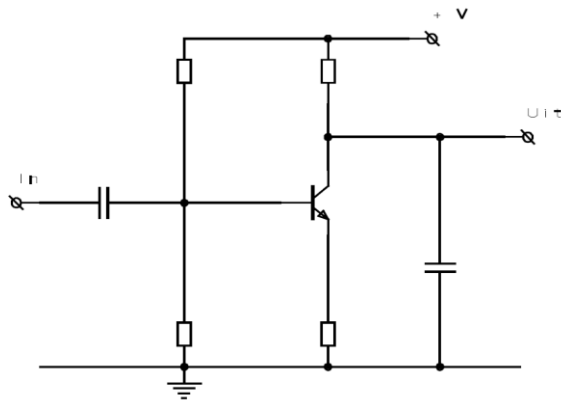
Figuur 3: Afwijking van de gemiddelde collectorspanning als functie van hetingangssignaal ten gevolge van de niet-lineaire eigenschappen van basis-emitter diode.

Conditie voor fig. 2, 3 en 5:

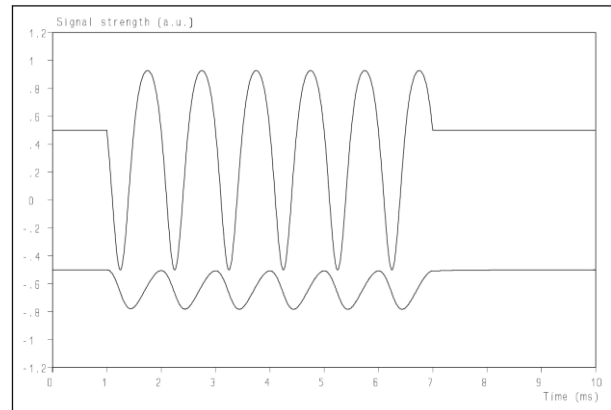
Voedingsspanning	36 V
Collectorspanning in rust	19 V
Versterking	≈ 240 maal

Een voorbeeld van een artefact, dat wordt geïntroduceerd om in staat te zijn terugkoppeling toe te passen, is getoond in fig. 4. Teneinde de open-lus bandbreedte van een versterker te begrenzen, wordt een eerste orde laagdoorlaatfilter geïntroduceerd door een condensator toe te voegen aan de collectorbelasting van de enkele versterkertrap. (**N.B.** We zullen verder naar dit filter verwijzen als het 'laagdoorlaat stabiliteitsfilter'.) Deze condensator zal, samen met de collectorweerstand, als een laagdoorlaatfilter werken dat een sterkere invloed op het wisselspanningsgedeelte (AC) heeft dan op de omhullende ervan. De reden is dat de demodulatie frequenties genereert die lager zijn dan die van het AC-gedeelte. Dus, afhankelijk van de afsnijfrequentie, wordt de omhullende minder onderdrukt door het laagdoorlaat stabiliteitsfilter dan het AC-gedeelte. Dit is te zien in fig. 5, waarin het bovenste spoor hetzelfde is als dat in fig. 2, het onderste spoor toont de responsie met de condensator toegevoegd. Het signaal is gedegradeerd tot een modulatie op de gemiddelde gelijkspanningswaarde (DC), terwijl hetingangssignaal geen DC-component heeft. De omhullende van hetingangssignaal wordt dus toegevoegd aan het uitgangssignaal van deze versterkertrap.

De vraag is nu: zal de terugkoppeling in staat zijn om deze artefact te elimineren. Daartoe is een andere aanpak vereist die in de volgende paragrafen wordt besproken.



Figuur 4: Een eenvoudige versterkertrap zal vervorming opwekken, welke wordt beïnvloed door de afsnijcondensator. Zie fig. 5.



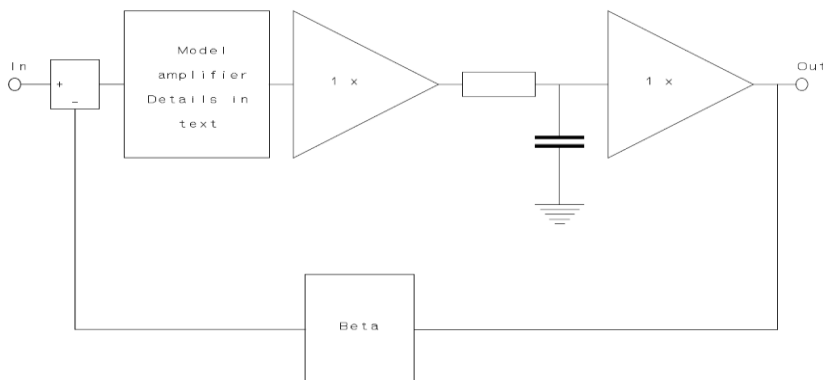
Figuur 5: De collectorspanning van de trap van fig. 1 als een toneburst van 6 perioden wordt ingevoerd (bovenste spoor) en de waarde ervan als de condensator wordt aangebracht (onderste spoor). Afsnijfrequentie van het eerste orde laagdoorlaatfilter is 100 Hz.

4. Modelleren van versterker

Om vast te stellen of vergelijkbare effecten nog steeds optreden als terugkoppeling wordt toegepast is een numerieke simulatie uitgevoerd. Deze is puur in het tijddomein gedaan omdat een dergelijk niet-lineair systeem niet met bijv. Fourier Transformatie kan worden geanalyseerd zoals boven is aangetoond. Daartoe is een vergelijkbare benadering toegepast als bij het numeriek oplossen van differentiaalvergelijkingen. Alvorens meer details van de simulatie beschreven zullen worden, zal eerst meer informatie over de gesimuleerde versterker worden gegeven.

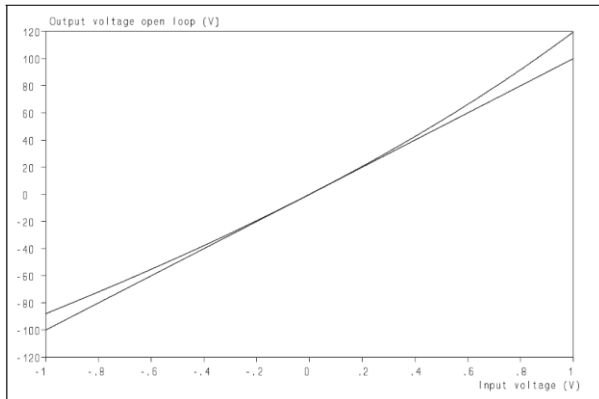
Het vereenvoudigde schema van de gesimuleerde versterker staat in fig. 6. Deze bestaat uit een verschiltrap, die geheel perfect wordt genomen, gevolgd door het niet-lineaire versterkergedeelte. De open-lus versterking is ongeveer 100, maar omdat de werklijn niet-lineair is, zoals te zien is in fig. 7, wordt deze waarde alleen bereikt in het instelpunt (nul volt ingangsspanning). Bij andere ingangsspanningen heeft de open-lus versterking een andere waarde, zoals getoond wordt in fig. 8. Dit toont (weer) aan dat μ_0 geen constante is.

N.B. Merk op dat ten gevolge van de inherent niet-lineaire eigenschappen van actieve componenten iedere versterker een niet-lineaire werklijn heeft. Het is aan de ontwerper om de niet-lineaire eigenschappen van de open-lus versterking zoveel mogelijk te beperken, hetwelk zich zal vertalen in een vermindering van de variaties van μ_0 over de werklijn. We komen hier later in meer detail op terug.

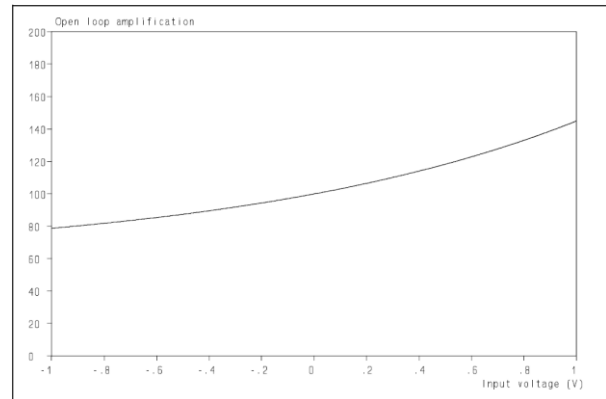


Figuur 6: Vereenvoudigd schema van de versterker, zoals gebruikt in de simulatie. Voor details: zie tekst.

De uitgang van het versterkergedeelte wordt gebufferd met een perfecte 1x versterker (ingangsimpedantie oneindig, uitgangsimpedantie nul, versterking perfect 1 zonder enige vervorming). Vervolgens is een eerste orde laagdoorlaatfilter geïmplementeerd, hetwelk hier als laagdoorlaat stabiliteitsfilter fungeert. In deze simulatie is de afsnijfrequentie op 2500 Hz ingesteld. Het uitgangssignaal van het laagdoorlaatfilter wordt middels een identieke 1x versterker gebufferd. Het uitgangssignaal wordt teruggekoppeld naar de verschiltrap via een netwerk met de waarde β , die in deze simulatie de waarde 0,1 heeft. In de ideale wereld zou de versterking van de gesimuleerde versterker 9,091 moeten zijn. Voor zeer kleine signalen zou dit het geval moeten zijn, maar wat gebeurt er als grotere ingangssignalen worden toegevoerd?



Figuur 7: Werklijn van de gemodelleerde versterker (kromme lijn, bovenste spoor) en een ideale versterker (rechte lijn, onderste spoor). Zie fig. 8 voor de 'lokale' open-lus versterking.



Figuur 8: De waarde van de 'lokale' open-lus versterking van de gemodelleerde versterker, in feite de afgeleide van de werklijn (bovenste spoor) van fig. 7.

N.B. De gemodelleerde versterker dient alleen om de techniek om de niet-lineaire responsie in de tijd te laten zien. Het is noch een bestaande versterker noch specifiek voor het algoritme. De techniek kan worden toegepast op elk niet-lineair systeem, te beschrijven door de gebruiker.

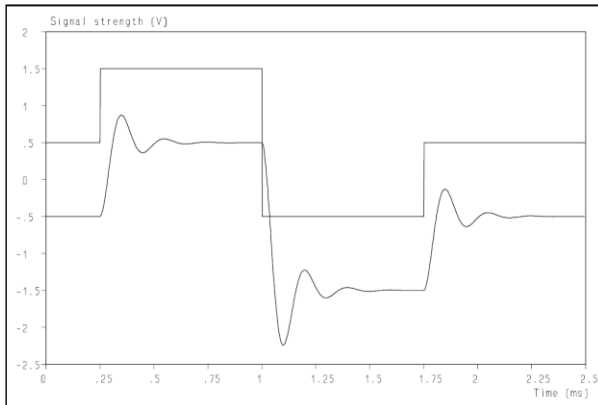
5. Numerieke oplossing van temporele responsie van gemodelleerde versterker

De responsie van een versterker wordt bepaald middels een techniek, vergelijkbaar met het numeriek oplossen van differentiaalvergelijkingen. Dit vereist startwaarden, hetwelk hier gedaan wordt door de lading op de condensator, en dus ook de uitgangsspanning, op nul te zetten. Het ingangssignaal wordt met een hoge frequentie (in dit geval 2 MHz) bemonsterd en voor ieder monster wordt de responsie berekend middels de volgende stappen:

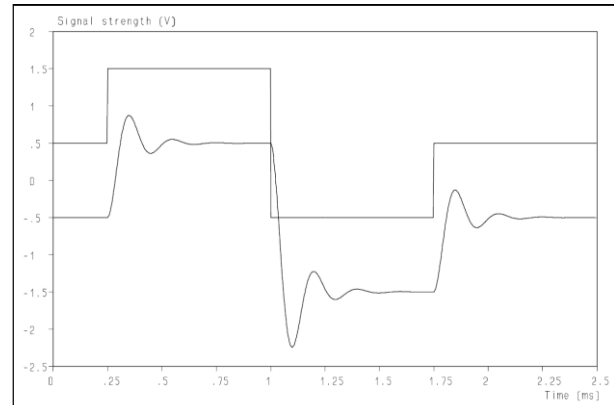
- Het volgende monster van het ingangssignaal en het uitgangssignaal bij het laatste monster worden gebruikt om de uitgangsspanning van de verschiltrap te bepalen.
- De uitgangsspanning van de verschiltrap wordt gebruikt om de uitgangsspanning van de gemodelleerde versterker te bepalen middels de werklijn van fig. 7.
- De uitgangsspanning van de gemodelleerde versterker wordt, samen met de spanning over de condensator, gebruikt om de stroom, die in of uit de condensator stroomt, te bepalen en daarmee de nieuwe lading op de condensator, en dus ook de spanning erover, te berekenen.
- De spanning over de condensator is ook de uitgangsspanning van de versterker.
- De uitgangsspanning van de versterker wordt teruggekoppeld naar de verschilversterker na vermenigvuldiging met de factor β .
- De gehele cyclus wordt herhaald met het volgende monster van het ingangssignaal.

De hele simulatie is nogal recht-toe-rechtaan en de enige aanname die nodig is, is dat de veranderingen tussen twee opeenvolgende monsters voldoende klein zijn om deze aanpak toe te staan.

Teneinde te testen of dit algoritme betrouwbare resultaten oplevert is eerst een simulatie gemaakt van een lineair systeem omdat dit met standaard technieken, zoals de Fourier Transformatie, kan worden doorgerekend. Voor dat doel werd een lineair systeem met een tweede orde laagdoorlaat stabiliteitsfilter en terugkoppeling geselecteerd. Een dergelijk systeem vertoont doorschot als de parameters juist gekozen zijn. De resultaten van het algoritme staan in fig. 9, die van de Fourier Transformatie in fig. 10. Zoals te zien is zijn de resultaten identiek, hetwelk aantoont dat het algoritme betrouwbare resultaten levert.



Figuur 9: Berekende responsie van een lineair systeem met een tweede orde laagdoorlaat stabiliteitsfilter door het algoritme van par. 5.



Figuur 10: Berekende responsie van een lineair systeem met een tweede orde laagdoorlaat stabiliteitsfilter middels de Fourier theorie.

De afwijkingen, geïntroduceerd door de gemodelleerde versterker, kunnen worden ontsluitend door de responsies van de gemodelleerde versterker en van de ideale, perfecte versterker van elkaar af te trekken. Het uitgangssignaal van de perfecte versterker zou analytisch bepaald kunnen worden, maar het kan ook worden verkregen door hetzelfde algoritme te gebruiken als bij de gemodelleerde versterker. De laatste werkwijze heeft het voordeel dat afwijkingen, geïntroduceerd door het algoritme zelf, in beide resultaten (vrijwel) hetzelfde zullen zijn en daarom wegvallen als deze van elkaar worden afgetrokken. Daarom wordt de berekening herhaald met de perfect lineaire werklijn, de rechte lijn in fig. 7, die met een μ_0 van 100 correspondeert. Deze manier van werken is gebruikt voor alle resultaten die hieronder worden gepresenteerd.

Merk op dat deze techniek kan worden toegepast op ieder ingangssignaal van iedere lengte. Het is ook mogelijk om andere imperfecties van versterkers mee te nemen. Omdat er maar één onderliggende aanname is, is deze techniek veel beter geschikt voor het analyseren van niet-lineaire systemen dan de gewoonlijk gebruikte. **N.B.** Het wordt aanbevolen om de waarde van het ingangssignaal aan het begin op 0 (nul) te stellen, zodat het correspondeert met de startwaarden van de condensatorlading en de uitgangsspanning. En ook om het laatste gedeelte van het ingangssignaal over een zeker tijdsinterval nul te kiezen om vertraagde responsie van de versterker/systeem t.g.v. geheugeneffecten te tonen.

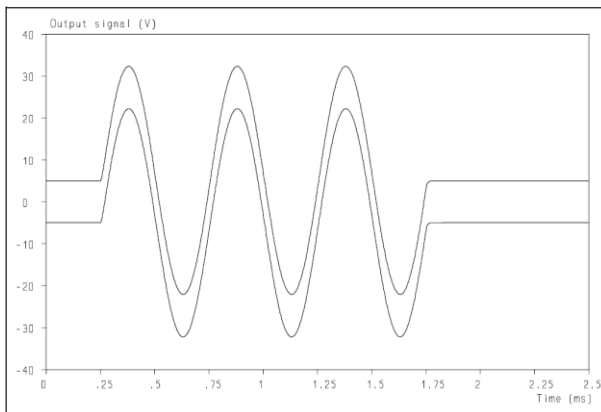
In geval van twijfel dat de aanname te grof is kan de bemonsteringsfrequentie eenvoudig hoger worden gekozen. Door de resultaten van de berekeningen met verschillende bemonsteringsfrequenties te vergelijken kan dit worden beoordeeld. Als de verschillen verwaarloosbaar zijn kan de laagste bemonsteringsfrequentie worden aangehouden.

N.B. Een praktische opmerking: het wordt ten sterkste aanbevolen om variabelen met dubbele precisie bij de berekeningen te gebruiken omdat afrondingsfouten de resultaten

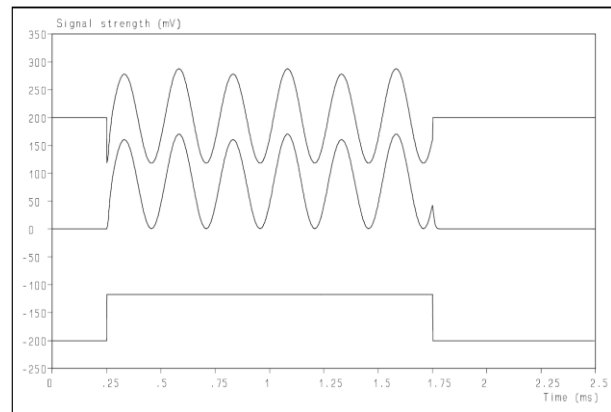
kunnen verslechteren of zelfs onmogelijk maken: als de verschillen tussen twee opeenvolgende monsters kleiner zijn dan de dan het minst significante cijfer van de variabelen, zal het algoritme onzin produceren.

6. Resultaten voor niet-stationaire signalen

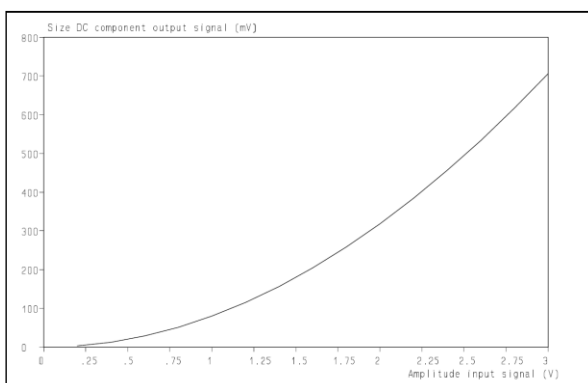
De responsie van de versterker op een toneburst van 3 perioden van 2000 Hz is uitgerekend voor zowel de niet-lineaire als de lineaire werklijn. De resultaten worden getoond in fig. 11, met dien verstande dat de signalen in verticale richting zijn verschoven om vergelijking te vereenvoudigen, die 'op het oog' geen verschil laat zien. Na aftrekken van beide signalen blijkt dat er wel verschillen zijn, zoals te zien is in fig. 12. Het is duidelijk dat het verschil-sigitaal een sterke tweede harmonische component heeft, maar ook dat deze is gesuperponeerd op een grote 'gelijkspannings-' (DC) bijdrage. Deze 'DC' bijdrage is zo groot dat het verschil-sigitaal niet meer onder nul uitkomt! De 'DC' bijdrage is in feite de *omhullende* van het ingangssigitaal. Zo'n omhullende bestaat uit frequenties lager dan de frequentie van het ingangssigitaal en is verder niet gerelateerd aan het ingangssigitaal. Dit wordt verder gecompliceerd door de frequentieafhankelijke interactie tussen de afsnijfrequentie en de niet-lineaire eigenschappen van de versterker.



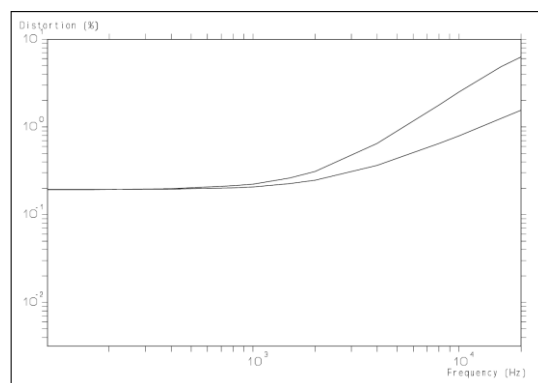
Figuur 11: Uitgangssignalen van de gemodelleerde versterker van fig. 6 (bovenste spoor) en de ideale versterker (onderste spoor). De sporen zijn voor de duidelijkheid verschoven. Ingangssigitaal is toneburst van 3 perioden van 2000 Hz



Figuur 12: Verschil tussen de uitgangssignalen van de gemodelleerde en ideale versterker voor de toneburst van 3 perioden van 2000 Hz (middelste spoor). Dit kan worden gesplitst in een wisselspanningscomponent (bovenste spoor) en een gelijkspanningscomponent (onderste spoor), die beide 200 mV zijn verschoven voor de duidelijkheid. Vergelijk met fig.11.



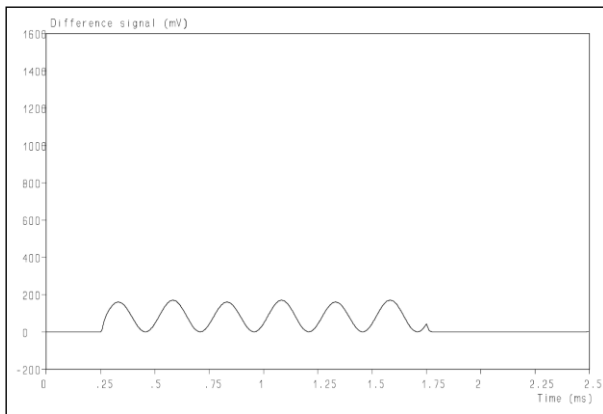
Figuur 13: De toename van de 'DC' component als functie van de amplitude van het ingangssigitaal is sterker dan proportioneel. Zie ook fig. 3.



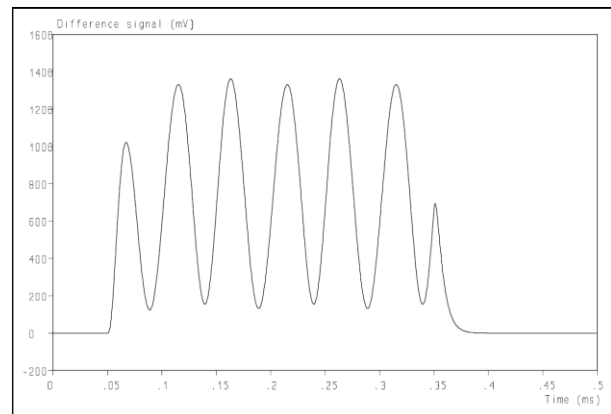
Figuur 14: De toename van de vervorming (inclusief de 'DC' component) als functie van de frequentie van het ingangssigitaal (bovenste spoor). Onderste spoor is de inverse van de modulus van het laagdoorlaat stabiliteitsfilter.

Als de waarde van de 'DC' component wordt uitgerekend als functie van de amplitude van hetingangssignaal vertoont het een stijging die meer dan proportioneel is met de amplitude hiervan, zoals getoond in fig. 13. Dit is -kwalitatief- in overeenstemming met fig. 3.

Als de 'DC' component wordt uitgerekend als functie van de frequentie van de toneburst met constante amplitude, neemt deze toe met de frequentie, zoals te zien is in fig. 14 (bovenste spoor). Daar de terugkoppelfactor ($= \mu\beta$) afneemt met de frequentie t.g.v. het open-lus laagdoorlaat stabiliteitsfilter, zou de verwachte toename de inverse van deze filterkarakteristiek moeten zijn, te zien in fig. 14, onderste spoor. Hoewel de frequentie, waar de toename begint, overduidelijk gerelateerd is aan de afsnijfrequentie van dit filter, is het duidelijk dat de toename van deze artefact sneller gaat. Het effect voor twee verschillende frequenties wordt getoond in fig. 15 en 16. De verklaring en de interpretatie van deze verschijnselen zullen in meer detail verderop worden besproken.

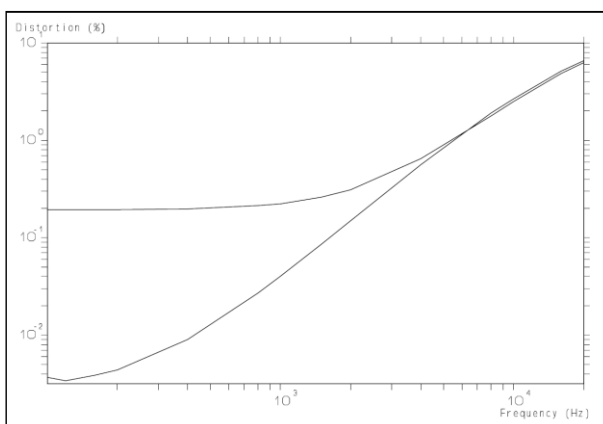


Figuur 15: De vervorming van de versterker van fig. 6 als de frequentie van hetingangssignaal 2 kHz is.

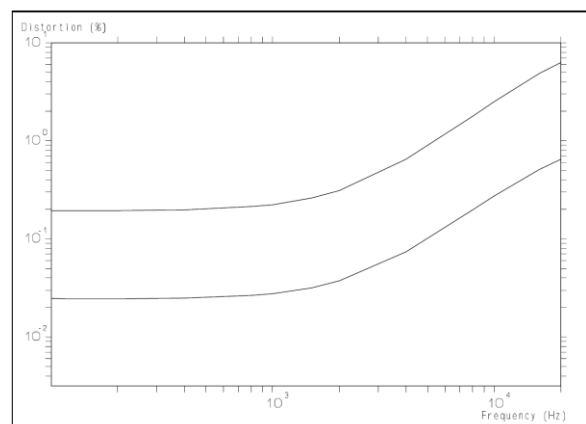


Figuur 16: De vervorming van de versterker van fig. 6 als de frequentie van hetingangssignaal 10 kHz is.

In het algemeen kunnen vervormingscijfers worden gereduceerd door de terugkoppelfactor ($= \mu\beta$) te vergroten. Om echter de gesloten-lus stabiliteit te handhaven dient de afsnijfrequentie van het laagdoorlaat stabiliteitsfilter met dezelfde factor verminderd te worden, waardoor het 'gain-bandwidth product' constant blijft. Dit is gebruikt om de invloed van een vergroting van de terugkoppelfactor met een factor 10 te bestuderen door de versterking van het tweede bufferblok in fig. 6 tot 10 maal te vergroten, de afsnijfrequentie van het stabiliteitsfilter te verlagen tot 250 Hz en β hetzelfde te laten. De resultaten van deze berekening voor de frequentieafhankelijkheid van de vervorming staan in fig. 17.

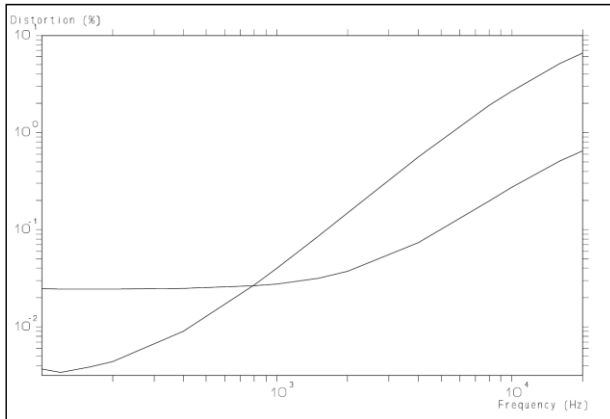


Figuur 17: De vervorming (inclusief de 'DC' component) van de versterker van fig. 6 als functie van de frequentie (bovenste spoor) en van de versterker met de vergrote open-lus versterking, maar gereduceerde open-lus bandbreedte (onderste spoor). Let op de snelle toename boven de afsnijfrequentie van het stabiliteitsfilter.

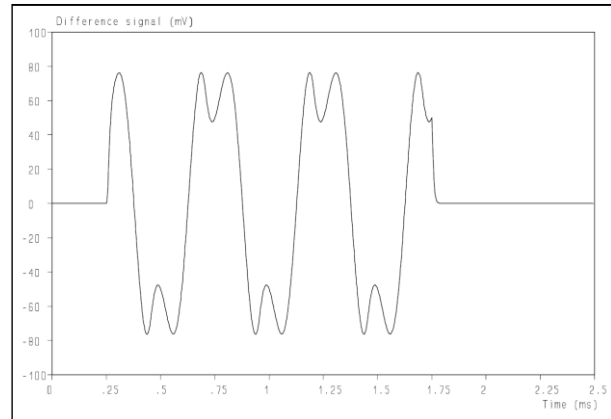


Figuur 18: De vervorming (inclusief de 'DC' component) van de versterker van fig. 6 als functie van de frequentie (bovenste spoor) en van de versterker met de verminderde niet-lineariteit van de werklijn (onderste spoor). Vergelijk met fig. 17.

Een andere manier om de vervorming te verminderen is het reduceren van de niet-lineariteit van de werklijn. In fig. 18 staan de resultaten voor de versterker van fig. 6, samen met die van deze versterker als de niet-lineariteit is verminderd. Het is ook interessant om de versterker met gereduceerde niet-lineariteit te vergelijken met die met een verhoogde terugkoppelfactor. Deze resultaten staan in fig. 19.



Figuur 19: De vervorming (inclusief de 'DC' component) als functie van de versterker van fig. 6 met gereduceerde niet-lineariteit van de werklijn (aan linkerkant bovenste spoor) en de versterker met de vergrote open-lus versterking en verlaagde open-lus bandbreedte (aan linkerkant onderste spoor). Zie ook fig. 17 en 18.



Figuur 20: De responsie van een niet-lineair systeem met een symmetrische werklijn. Merk op dat de 'DC' component geheel verdwenen is. Vergelijk met fig. 12, 15, 16 en 22.

7. Discussie

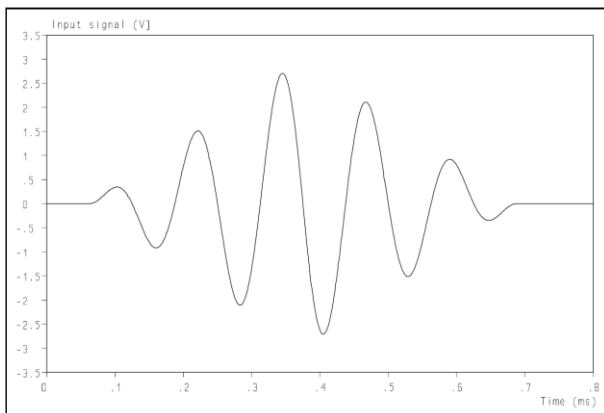
De 'DC' component in het uitgangssignaal wordt veroorzaakt door de niet-symmetrische werklijn, wat zich uit in de -in dit geval- positieve afgeleide van de 'instantane' μ van de versterker, zie fig. 7 en 8. Dit is in overeenstemming met de resultaten van par. 3, fig. 3 en 5. Als deze conclusie terecht is dient de 'DC' component te verdwijnen als de werklijn symmetrisch is. Dit wordt bevestigd door de resultaten van een simulatie, zoals getoond in fig. 20.

Het is duidelijk dat terugkoppeling in staat is om de 'DC' component te onderdrukken, maar niet om deze te elimineren, zoals blijkt uit fig. 14, 15 en 16. Deze figuren laten ook zien dat de 'DC' component toeneemt met de frequentie. Dit kan -gedeeltelijk- worden verklaard door de afname van de terugkoppelfactor ($= \mu\beta$), veroorzaakt door het laagdoorlaat stabiliteitsfilter. Maar de toename gaat sneller dan kan worden verklaard door de afname van de terugkoppelfactor alleen, hetwelk te zien is aan de inverse van de modulus van het laagdoorlaat stabiliteitsfilter. De oorzaak ligt bij de niet-lineariteit van de werklijn van de versterker: met een lagere terugkoppelfactor wordt het ingangssignaal voor de versterker groter, waardoor een groter gedeelte van de (niet-lineaire) werklijn gebruikt moet worden bij dezelfde amplitude van het ingangssignaal. **N.B.** De snellere toename van de vervorming met de frequentie werd opgemerkt in ref. 6, maar de auteur leverde noch aanvullend bewijs noch een verklaring. Dat is enigszins verbazingwekkend omdat het in strijd is met zijn aanname dat de verschilversterker aan de ingang in een lineaire modus werkt vanwege de geringe amplitude van het signaal dat het moet verwerken. Wij komen hier zo op terug.

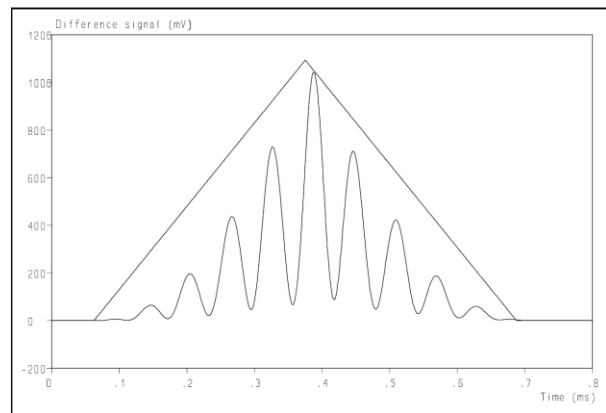
Het gebruik van een grotere terugkoppelfactor reduceert de vervorming en de 'DC' component in het uitgangssignaal, zoals te verwachten is en in fig.17 te zien is. Maar als het 'gain-bandwidth product' van de versterker hetzelfde moet blijven dient de afsnijfrequentie van het laagdoorlaat stabiliteitsfilter met dezelfde factor te worden verlaagd. Met als resultaat dat de toename van de 'DC' component al bij een lagere frequentie begint, waardoor de bijdrage bij hogere frequenties hetzelfde is als met een lagere terugkoppelfactor. Dat is niet verbazingwekkend daar de terugkoppelfactor van beiden hetzelfde is in dit frequentiegebied.

Dus de verbetering treedt alleen op bij lagere frequenties en er is twijfel of dit -gehoormatig- een wenselijke wijziging is.

De 'DC' component is in feite een demodulatie van het eigenlijkeingangssignaal, zij het niet op een lineaire wijze. Dit blijkt uit fig. 13, waar de toename van de 'DC' component als functie van de amplitude van hetingangssignaal wordt getoond als hetingangssignaal een toneburst van 3 perioden is. The toename is eerder kwadratisch dan lineair, hetwelk betekent dat de omhullende van een meer complex signaal vervormd wordt. Dit is gecontroleerd m.b.v. een toneburst met een driehoekige omhullende zoals getoond in fig. 21. De vervorming plus 'DC' component staat in fig. 22 met daarbij een driehoek gefit. Het is duidelijk dat de omhullende niet overeenkomt met een driehoek, in overeenstemming met de voorgaande conclusies. Het is niet onwaarschijnlijk dat deze niet-lineaire toename van artefacten tot de stelling aanleiding geeft dat een versterker 'headroom' moet hebben om de artefacten te beperken als de amplitude aan de ingang toeneemt. Dit komt zo aan de orde. Eerst gaan we kijken naar het effect van demodulatie op de gehoormatige kwaliteit van een versterker.



Figuur 21: Een toneburst met een driehoekige omhullende. Merk op dat de andere tonebursts, gebruikt in dit artikel, een rechthoekige omhullende hebben.



Figuur 22: Het verschilsignaal van de toneburst met driehoekige omhullende en de gefitte driehoek. Frequentie is 8 kHz, amplitude van ingangssignaal is 3 V.

De demodulatie wekt lagere frequenties op, dit in tegenstelling tot harmonische vervorming, die juist hogere frequenties genereert. Ten gevolge van de afname van de terugkoppelfactor met toenemende frequentie door het laagdoorlaat stabiliteitsfilter, draagt de omhullende van hogere frequenties meer bij aan de artefacten. Maar deze komen in het middengebied terecht waar het menselijk gehoor juist het meest gevoelig is. Het is waarschijnlijk dat dit irritant is voor het oor en dat hierdoor de detaillering en transparantie in het geluid verminderen. Om dit te voorkomen dient de terugkoppelfactor in de audioband constant te worden gehouden en de toename van de 'DC' component met de amplitude van hetingangssignaal zo klein mogelijk te worden gehouden.

Zoals te zien is in fig. 17, is de verbetering door een grotere terugkoppelfactor duidelijk voor de lagere frequenties. Als deze verbetering kan worden uitgebreid tot hogere frequenties zou dat zeer behulpzaam zijn. Maar dat loopt tegen andere problemen aan, veroorzaakt door de Wet van Behoud van Ellende.

Een grotere terugkoppelfactor bij hogere frequenties kan worden bereikt door het 'gain-bandwidth product' van de versterker te verhogen. Dit heeft tot gevolg dat de versterker in staat is om zeer hoge frequenties te verwerken. Laten we een voorbeeld nemen: een terugkoppelfactor van 100 en een open-lus bandbreedte van 20 kHz. Dit resulteert in een gesloten-lus bandbreedte van 2 MHz en, inderdaad, sommige versterkers hebben een dergelijk brede gesloten-lus bandbreedte, waardoor deze lange en middengolf radiostations kunnen versterken. Maar toch, de toename van de vervorming met toenemende frequentie blijft doorgaan, wat leidt tot demodulatie van radiostations. Het is zo goed als ondoenlijk om

te voorkomen dat dit soort signalen tot de elektronica doordringen en demodulatie wekt artefacten in het gereproduceerde geluid op, hetwelk als 'onrust' e.d. zal worden ervaren. Het zal zeker niet in positieve zin bijdragen aan de luisterervaring. Dus een terugkoppelfactor van rond de 10 bij 20 kHz, en dus een 'gain-bandwidth product' van 200 kHz, is realistischer en wenselijker. Als dan de terugkoppelfactor in de audioband constant moet worden gehouden is de terugkoppelfactor bij 20 kHz het maximaal haalbare. Hoewel de reductie van de artefacten met, in dit voorbeeld, een factor 10 nog steeds de moeite waard is, dient het niveau van de artefacten al meteen zeer klein te zijn omdat een majeure verbetering door terugkoppeling niet haalbaar is.

De voor de hand liggende manier om de artefacten te verminderen is het vermindering van de niet-lineariteit van de werklijn. Dit is duidelijk te zien in fig. 18 en 19. Merk op dat dit voor hogere frequenties effectiever is dan een verhoging van de terugkoppelfactor. Vooral de versterkertrappen, dicht bij de ingang, kunnen nartigheid introduceren, welke niet, of niet volledig, door terugkoppeling wordt onderdrukt (ref. 2). Deze dragen voor een belangrijk deel bij aan de artefacten bij hogere frequenties t.g.v. de verminderde terugkoppelfactor en daardoor ook het gebruik van een grotere fractie van de werklijn. Maar het zo lineair mogelijk maken van de werklijnen van alle versterkertrappen wordt ten eerste aanbevolen omdat deze allemaal bijdragen aan het opwekken van onwenselijke artefacten. Hierdoor wordt het toepassen van een terugkoppelfactor van rond de 10 mogelijk. Merk op dat een dergelijke aanpak de toename van de artefacten met toenemende amplitude verlaagt en de versterker minder gevoelig maakt voor HF geïnduceerde nartigheid omdat deze zo veel mogelijk lineair blijft bij elke frequentie. Ook elimineert een dergelijk aanpak de 'noodzaak' voor 'headroom' en resulteert het in versterkers die geluid met veel detail en transparantie reproduceren.

Bij de discussies op audio-fora komen interessante stellingen ter tafel. De stelling dat een constante terugkoppelfactor in de audioband tot beter klinkende versterkers leidt, kan worden onderbouwd met de resultaten van de simulaties die in dit artikel zijn gerapporteerd. De stelling dat terugkoppeling resulteert in 'niet muzikale' versterkers is, in zijn algemeenheid, niet juist, maar het is duidelijk, door de resultaten in dit artikel, dat het eenvoudig is om versterkers te ontwerpen die hoorbare en onwenselijke artefacten door terugkoppeling opwekken. Een lage afsnijfrequentie van het laagdoorlaat stabiliteitsfilter, om een hoge terugkoppelfactor bij lage frequenties mogelijk te maken en zo te compenseren voor een sterk niet-lineaire werklijn, is waarschijnlijk een recept voor een 'niet muzikale' versterker met verminderde weergave van detail en transparantie. Het is ook waarschijnlijk dat deze dan slechte oversturingseigenschappen heeft t.g.v. een grote lading in de condensator van het stabiliteitsfilter. Daar een hoge terugkoppelfactor gewoonlijk wordt toegepast in versterkers met een sterk niet-lineaire werklijn, hebben dit soort versterkers 'headroom' nodig. Dus als een versterker 'headroom' nodig heeft, dan lijdt deze gewoonlijk ook aan andere artefacten. De stelling dat 'een versterker die meer bezig is met het verwerken van foutsignalen dan van muziek niet muzikaal klinkt' is waarschijnlijk juist omdat uit deze analyse blijkt dat het gebruik van zo lineair mogelijke werklijnen voor alle versterkertrappen, in combinatie met een matige terugkoppelfactor, weinig artefacten opwekt. Een dergelijk ontwerp zal slechts geringe foutsignalen hoeven verwerken.

De vermogensversterkers van 'Temporal Coherence' passen een matige terugkoppeling toe die in de audioband constant is. Alle versterkertrappen hebben een werklijn gekregen die zo lineair mogelijk is door een innovatieve benadering in het ontwerp, anders dan lokale terugkoppeling. Dit heeft bewezen erg effectief te zijn in het realiseren van een versterker die erg open, transparant en 'schoon' is met een zeer gedetailleerde reproductie van het geluid. Deze benadering wordt in alle apparatuur, ontworpen en gebouwd door 'Temporal Coherence', toegepast, niet alleen de vermogensversterkers. Deze benadering wordt onderbouwd door de resultaten van deze analyse.

8. Conclusies, aanbevelingen en toekomstig werk

De analyse van niet-lineaire systemen, gebruik makend van de gebruikelijke technieken met continue sinusgolven, is gebaseerd op de onterechte toepassing van de Fourier theorie. De algemeen gebruikte vergelijkingen om aan te tonen dat terugkoppeling allerlei soorten nartigheid onderdrukt zijn onjuist met dus ook onjuiste conclusies, omdat de onderliggende aannames onjuist zijn en, erger nog, de interacties tussen verschillende soorten nartigheden negeert. En juist deze interacties genereren artefacten die niet aanwezig zijn in het ingangssignaal en erg irritant zijn voor het gehoor.

Teneinde de responsie van een niet-lineair systeem op een niet-stationair signaal op te helderen is een andere benadering vereist. In dit artikel wordt een techniek beschreven die vergelijkbaar is met het numeriek oplossen van differentiaalvergelijkingen, welke geschikt is voor ieder ingangssignaal van iedere lengte. In dit artikel is een voorbeeld gepresenteerd, maar de techniek is niet beperkt tot dit voorbeeld.

De techniek is gebruikt om de effecten van terugkoppeling op een niet-lineair systeem te onderzoeken. De resultaten kunnen gebruikt worden voor het sturen van het ontwerp van goed klinkende elektronica en om na te gaan of verschillende stellingen over terugkoppeling in de high-end gemeenschap juist, overdreven of, plompverloren, onzin zijn. De stelling dat een constante terugkoppelfactor in de audioband wordt aanbevolen stemt overeen met de resultaten van deze simulaties. Maar deze duiden ook op een gematigde terugkoppel-factor die kan worden gebruikt om demodulatie van radiostations en andere HF-signalen te voorkomen. Dus de stelling 'dat je niet genoeg terugkoppeling kunt hebben' wordt niet ondersteund door deze resultaten, eerder het tegendeel. Het reduceren van de niet-lineariteit van alle individuele versterkertrappen is een veel betere benadering om allerlei artefacten, die door de versterker worden opgewekt, te onderdrukken dan een hoge terugkoppelfactor. Het realiseren van een dergelijk concept vereist een nogal afwijkende benadering voor het ontwerp van versterkers. Maar dit is met succes gedaan door 'Temporal Coherence'.

Geconcludeerd kan worden dat de techniek, die in artikel beschreven is, een bruikbaar stuk gereedschap is voor het ontwikkelen van versterkers omdat het de mogelijkheid biedt de responsie op ieder willekeurig tijdsignaal te bepalen voordat de versterker gebouwd is. Daar de toepassing niet beperkt is tot een specifiek systeem, kan het ook gebruikt worden om helderheid te verschaffen over een al lang bestaande discussie in de high-end gemeenschap: waarom is er zo veel verschil in de gehoormatige kwaliteit tussen buizen- en halfgeleider versterkers? Vanuit natuurkundig oogpunt zouden goed ontworpen versterkers niets onwenselijks mogen bijdragen aan het gereproduceerde geluid, dus welke actieve componenten aan de basis liggen zou niet bepalend mogen zijn voor de gehoormatige kwaliteit. Dit is (nog) niet het geval (ref. 9), maar wellicht dat de artefacten, die door beide typen versterkers worden toegevoegd, aanwijzingen zouden leveren voor de onderliggende oorzaken.

9. Dankbetuiging

The auteur wil zijn dank uitspreken aan Ir. Menno van der Veen, Pierre Touzelet en Prof. Dr. Ir. Ronald van Zolingen voor het kritisch lezen van het concept en hun opmerkingen, hetwelk geresulteerd hebben in een duidelijke verbetering van dit artikel.

10. Referenties

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. Hans R.E. van Maanen, "Is feedback the miracle cure for high-end audio?", 14 May 2017, www.temporalcoherence.nl

3. A. Papoulis, "The Fourier Integral and its Applications", McGraw-Hill Book Company, New York (1962)
4. A. Papoulis, "Signal Analysis", McGraw-Hill Book Company, New York (1984)
5. V. Čížek, "Discrete Fourier Transforms and their Application", Adam Hilger Ltd., Bristol (1986)
6. Dr. Arto Kolinummi, "Audio Power Amplifiers", "subtitle "Towards inherently linear amplifiers". Linear Audio (Belgium, 2011), ISBN 9789490929091
7. M. Otala, "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
8. Menno van der Veen and Hans R.E. van Maanen; "Non-linear distortions in capacitors", Convention Paper, Presented at the 124th Convention, 2008 May 17–20 Amsterdam, The Netherlands
9. Andrzej Dobrucki et. al, "Subjective and Objective Evaluation of the Audio Vacuum-Tube Amplifiers", AES Convention, Munich, Germany, May 2009