

Perceptie van Distorsie

Vervorming

In de elektro/audio techniek spreken we van *lineaire*- en *niet-lineaire* vervorming. Met lineaire vervorming bedoelen we vervorming in het frequentiedomein: de afwijking van een gewenste (meestal vlakke) frequentie karakteristiek. Met niet-lineaire vervorming bedoelen we vervorming in het tijd domein: 'een sinus is geen sinus meer'. Hiervoor gebruiken we vaak het woord *distorsie*, wat overeenkomt met het algemene begrip (verstuijing, verwringing, vertekening....).

Hier wil ik het over hebben. Hoe wordt dat ervaren door luisteraars?

Perceptie

Perceptie is de waarneembaarheid van geluid of licht door de mens. Perceptie geldt - wonderlijk genoeg - niet voor alle zintuigen. Hier zullen we het alleen hebben over de perceptie van distorsie van elektronisch voortgebracht geluid. Dat wil zeggen dat er steeds sprake is van een elektrische-spanning-audio-omzetter, beter bekend als luidspreker, waardoor er een correlatie is tussen de distorsie op het audio signaal en de distorsie van het elektrische signaal dat op de luidspreker wordt gezet. Deze laatste is eenvoudiger te meten en wordt als belangrijke maat voor 'de kwaliteit' van het voortgebrachte geluid gezien. Dat de luidspreker een belangrijke rol speelt, is onbetwist. De kwaliteit van de luidspreker valt voorlopig buiten het bestek van dit verhaal.

In feite geldt geluidskwaliteit voor 'real time' geluid (public address, instrument-ondersteuning bij een concert) en *gereproduceerd* geluid. Ik wil het inperken tot gereproduceerd geluid. Het gaat dus om de 'waardering' van de geluidswaergave van op een opslagmedium vastgelegd geluid. Bovendien luisteren we er naar in een 'gewone huiskamer'.

Bij onderzoeken van het IPO¹ - enkele decennia geleden - is gebleken dat psychologische factoren een belangrijke rol spelen. Dat blijkt al uit de soms religieuze benadering van 'High End' apparatuur: kegeltjes onder de versterker en/of luidspreker, speciale 'interlinks' (alleen de woordkeuze al) tussen bron en versterker, en niet te vergeten de luidsprekerkabels, zijn daar bron van heftige discussie maar vooral van 'geloof'. Hier houd ik me niet mee bezig, anders dan met de zorg voor de EMC-problematiek die alle vermeende verschillen op dit punt overbodig maken.

Maar, we zijn door het IPO gewaarschuwd. Bij luistersessies moeten we hier zeker rekening mee houden.

Soorten distorsie

Sommige distorsie vinden we niet zo erg. Er zijn hele volkstammen die zweren bij buizenversterkers, om maar iets te noemen. Als je daar aan meet, vind je relatief veel harmonische vervorming. Kennelijk vindt een mens het niet zo erg als er wat meer tweede en derde harmonischen worden toegevoegd.

Dat 'klinkt warm'. Muziekinstrumenten maken zelf al veel harmonischen. Daaraan zijn ze herkenbaar. De ene viool klinkt anders dan de andere, dus is het ook niet zo erg als er een beetje 'verkleuring' optreedt door wat extra harmonischen. Hier tilt een mens kennelijk niet zo zwaar aan. Toch wordt bij elke kwaliteitsbeoordeling gewag gemaakt van de hoeveelheid harmonischenvervorming die bij een goede halfgeleiderversterker factoren kleiner is dan van zijn buizenbroertje. Minder harmonischenvervorming is echter geen garantie voor 'een beter geluid'. Daar zijn hele theorieën over: het zou in de tegenkoppeling zitten, etc.

Kennelijk maakt een niet tegengekoppelde 'single ended' buizenversterker niet die bepaalde soort vervorming waar een mens zo gevoelig voor is. Je moet niet gek opkijken als zo'n versterker 1 % harmonischenvervorming heeft.... Het vervelende is dat je daarmee niet zo veel vermogen kunt maken. Bovendien is zo'n ding nogal een heisa.

Het is zelfs nog gekker: popmuziek wordt hevig gecompriemd (= niet lineair vervormd), soms wel 30 dB. Radio-uitzendingen worden (tegenwoordig) ook gecompriemd, met dien verstande dat alleen de sterke delen uit de spraak in elkaar worden gedrukt en de zwakke worden opgehaald. Dat gebeurt met een zogenaamde compander (met een S-curve). Alle stemmen klinken even hard (als de zaak goed ingesteld is!) zonder opvallende vervorming sinds dit soort bewerkingen digitaal gedaan wordt. Vóór die tijd konden uitzendingen 'vermoeiend' zijn om naar te luisteren.

Compressie wordt gebruikt om de verstaanbaarheid te vergroten, althans met een kleine zender toch 'hard' te klinken. Zendamateurs weten daar alles van. Die gebruiken vaak heel eenvoudige analoge compressoren. Dat soort uitzendingen klinken vervormd terwijl soms sterk (digitaal) gecompriemde of gecompandeerde signalen zelfs nog een goed stereobeeld kunnen behouden! (Er staan twee voor-

¹ Instituut voor Perceptie-Onderzoek

beelden van onder: 'Muziek- & Geluidsfragmenten' op deze site.) Hoe zit dat dan?

Piano-opnamen uit de 50-er en vroege 60-er jaren vind ik niet te pruimen in de harde passages. De analoge limiters van die tijd gaven de onverteerbare vervorming die ik bedoel. Maar, wat was daar dan mis mee? Er zit niets anders op dan naar de soort vervorming te zoeken waar een mens van gruwet. Ik doe een poging.

Waar gruw ik dan zo van?

Dat is het hem nu juist, dat kan ik niet precies zeggen. Muziek die 'deze vervorming' heeft, wil ik afzetten! Het moet uit. Als die vervorming er niét is, kan ik uren luisteren. Ik kan eigenlijk alleen maar horen als 'het er niet is', alhoewel, bij de weergave van Artemis die Schubert spelen (zie Muziek- & Geluids-fragmenten) hoor ik het binnen een minuut dat die in orde is. 'Als het niet goed is, hoef je niet te wachten tot het beter wordt,' zoals Norbert Veel zegt.

Nuldoorgangen

Als zendamateur weet ik dat een SSB-signaal dat nog slechts 10 dB dynamiek heeft, goed verstaanbaar blijft. Ik heb het niet over 'hoe fraai' of 'hoe vervormd' het klinkt, nee, ik let alleen op de verstaanbaarheid! Als ik een DX-verbinding maak met een station in 'een ver land' dat dik in de ruis en andere prut dreigt te verdrinken, komt het er alleen op aan of we de weinige informatie die uitgewisseld wordt voor de geldigheid van de verbinding (call, naam, signaal-rapport en plaats) overgedragen kunnen krijgen. Dat gaat het beste met zwaar gecomprimeerde signalen, zeker als je daar in geoeft bent.

Ik ben zo'n geoeft zendamateur (sinds 1958). Toen ik echter in de 60-er jaren een gedigitaliseerd telefoonsignaal van 8 bits met een sampling rate van 5 kHz te horen kreeg in de begintijd van de cryptofonie, kon ik er geen barst van maken! Het lukte niemand, maar een geoeft zendamateur moest dat toch kunnen? No way!

Veel later begreep ik waarom dat zo was: dat oorspronkelijk digitale signaal van destijds was niet alleen in amplitude vervormd (wat gezien het voorgaande niet zo erg is) maar **de nuldoorgangen waren verplaatst**. Deze kwamen, door het digitaliseringsmechanisme, op bepaalde vaste plaatsen te liggen, waardoor het volledig onverstaaanbaar werd. Eerst toen, met het voortschrijden der techniek, de sampling rate groter werd, werd het spraaksignaal verstaanbaar en steeds beter verstaanbaar naarmate de sampling rate (en het aantal bits [dynamiek]) toe nam. Kennelijk zijn de plaatsen van de nuldoorgangen belangrijk voor het menselijk gehoor. Dat geldt voor de verstaanbaarheid van spraak maar nog sterker voor acceptabele muziekweergave!

Bij, op analoge wijze, zeer sterk in amplitude gecomprimeerde signalen, *waarbij de nuldoorgangen met rust gelaten worden*, kun je zelfs de stem van de spreker blijven herkennen! De bandbreedte van zo'n signaal mag bovendien nog verkleind worden tot zo'n 3 kHz.....

(Lees ook: 'Adaptatie van hoorapparaten...en zo..' op deze site, vanaf paragraaf: 'Zijbandruis = jitter'.)

'Jitter'

Jitter is vervorming van de **nuldoorgangen** van een signaal. Ze komen op een andere niet verwachte plaats. Waarom een mens dat zo erg vindt, blijft voorlopig een raadsel. Dat soort gevoeligheden zijn meestal uit de evolutie te verklaren maar welke prooi hij beter kon vangen, of welke vijand zij eerder kon herkennen door dit perceptieve vermogen? Zeg het maar. Treedt er in de natuur soms amplitudevervorming op waardoor de nuldoorgangen zo belangrijk worden? Ik weet het niet.....

Als je twee analoge audio-signalen aan een versterker toevoert en je meet de **jitter** die het ene signaal op het andere uitoefent, dan kun je een oordeel vellen over de 'hoormatige kwaliteit' van de versterker! Dat is niet hetzelfde als fasemodulatie (naar mijn idee) of intermodulatie. Dat zijn ook minder leuke (goed meetbare) vervormingen maar die zijn niet zo erg als 'de jitter-vervorming'. Henk ten Pierick † heeft daar een meetmethode voor ontwikkeld die knap ingewikkeld is: hij meet de jitter die een laagfrequent audio signaal met grote amplitude uitoefent op een audiosignaal van veel hogere frequentie met kleinere amplitude. We hebben het dan over 100 Hz en 5 kHz bijvoorbeeld. Hij heeft oa. vele op amps gemeten en daar kwamen destijds de LT1028 en de OPA134 als besten uit, de eerste vooral als 'virtuele aarde'. Sinds dien pas ik uitsluitend deze op amps toe.

Als een analoge signaal gedigitaliseerd wordt in een ADC en/of een digitaal signaal omgezet wordt naar een analoge signaal, is het van het grootste belang dat daar een clock-signaal voor gebruikt wordt dat weinig jitter bevat. (Lees zo nodig: Jitter in (Digital) Audio, op deze site.) We zagen reeds dat het digitaliseringsproces met voldoend hoge sampling rate moet gebeuren om te voorkomen dat het raster waarop

de nuldoorgangen van het uiteindelijke audio signaal komen te liggen, niet fijnmazig genoeg is om onhoorbaar te blijven (ik kom daar op terug). Het 'clock' signaal mag dus ook geen jitter bevatten! Als dat wèl zo is, zal jitter met lage frequenties meer invloed hebben dan hogere-. Henk had al ontdekt dat 'audio-gerelateerde jitter' op het clock-signaal het meest kwalijk is. Dat kunnen we nu inzien omdat deze digitale jitter dezelfde soort vervorming geeft als de zoeven genoemde 'analoge jitter'. Dit is een belangrijke constatering omdat de faseruis (die de jitter veroorzaakt) van de betreffende oscillator vooral dicht bij de draaggolf klein moet zijn!

Resumerend: jitter op het audiosignaal kan dus ontstaan door fouten in de analoge (vermogens) versterker en/of door jitter/faseruis van het clock-signaal bij het digitaliseren en weer 'analogiseren'. Het soort vervorming lijkt ook op elkaar. Beiden klinken smerig en vertroebelen het stereo effect.

Voordat ik de 'sampling rate' nader beschouw, nog een ander voorbeeld uit de radio-techniek. Daarbij veronderstel ik de werking van een heterodyne-ontvanger met zijn ins en outs bekend.

Een jaar of wat geleden was ik een ware DX-er op de 80 meterband (3,5 – 3,8 MHz), de moeilijkste band om de andere kant van de wereld te bereiken. Vooral VK (Australië) en ZL (Nieuw Zeeland) stonden hoog op de verlanglijst. Nu moet je weten dat die landen slechts een tiental minuten per dag te werken zijn (als er al condities zijn). Dat kan alleen in het voor- en het najaar als de 'grey line' over Nederland en Australië loopt.

<http://dx.gsl.net/propagation/greyline.html>

Dat is bijvoorbeeld het geval wanneer het 'hier' donker, en 'daar' licht wordt. In november is dat om ongeveer 10 uur 's-avonds.

Een extra handicap is dat de Australiërs maar een gebiedje van 10 kHz bovenin die band mogen gebruiken, precies in het DX-gedeelte waar 'iedereen' dus zit te roepen. Vooral Europese stations zijn dan knetterhard. Zie daar maar eens een Australiër tussenuit te vissen die net boven de sferische ruis uitkomt....

Het komt er dan opaan dat je een zeer selectieve ontvanger hebt. Niet alleen het (middenfrequent) doorlaatfilter moet goed zijn maar ook de 'local oscillator' moet weinig zijbandruis vertonen om reciproke menging het hoofd te bieden. Een van de sterke punten van mijn zelfgebouwde radio is dat de oscillatoren weinig zijbandruis vertonen. Ik schrijf daar uitgebreid over in het eerste gedeelte op deze website. Ik durf te beweren dat mijn (vrijlopende) LC-oscillatoren niet te overtreffen zijn. Ik wist echter niet hoe goed die oscillatoren moesten zijn om nog verbetering te kunnen bereiken tot ik op het idee kwam om speciaal voor Australië een Xtal-oscillator (crystal-oscillator) te maken (die dus maar een paar kilohertz verstermd kan worden) waarmee mijn ontvanger precies het kleine stukje DX-band van Australië kon ontvangen.

Dat ging wonderbaarlijk goed! Ondanks mijn eenvoudige antenne (W3DZZ) midden in de stad kon ik veel meer 'nemen' dan grote DX-kanonnen op prachtige lokaties in Engeland of Duitsland. Er werd mij regelmatig gevraagd wat voor speciale antenne en welk merk ontvanger ik had....

Het zat dus in die Xtal-oscillator, dat was mij wel duidelijk, maar ik begreep niet waarom. Zeker, een Xtal-oscillator geeft wel 30 dB minder zijbandruis op 10 kHz van de draaggolf (-150dB/Hz@10kHz) dan een vrijlopende (breed afstembare) LC-oscillator, maar dat kan nauwelijks verbetering geven op de reciproke menging eigenschappen bij een ontvangerbandbreedte van 2,5 kHz voor SSB. Het bleef lange tijd een raadsel. Ik vermoed inmiddels dat het een kwestie is van de nuldoorgangen van het audio-signaal uit de ontvanger. Het ding klinkt ook ongelooflijk rustig en gaaf. Dit komt overeen met het crypto-verhaal hierboven.

Sampling rate

De sampling rate bepaalt 'het raster' waarop de nuldoorgangen van het uiteindelijke audio signaal komen te liggen (na digitaliseren). Hoe fijn moet dat raster dan zijn? Bij het maken van CD's leggen we de sampling frequentie op 44,1 kHz zodat de nuldoorgangen op (veelvouden van) ~11 μ s komen te liggen. De keuze van 44,1 kHz is omdat Nyquist heeft ontdekt dat de sampling frequentie minstens twee keer zo hoog moet zijn als de hoogste weer te geven frequentie om vouwvervorming te voorkomen (wat we verder laten voor wat het is).

Die frequentie ligt dus ver buiten het hoorgebied van de mens. Is dat hoog genoeg om onhoorbaar op te 'rasteren'? Een laagdoorlaat filter (om de vouwvervorming de baas te worden) zal zeker helpen maar waarom horen we dan nog verschillen tot sampling rates van 192 kHz aan toe? Dat is het geval bij de tegenwoordig populaire DSD-files. Er zijn roerende verhalen bij bedacht dat een mens tot wel 50 kHz kan horen....

Mijn gehoor is beperkt tot zo'n 6 kHz! Dan zou ik er niets van moeten merken als het dáár om ging. Nee, ik geloof dat het verfijnen van het raster waarop de nuldoorgangen liggen veel belangrijker is! Hoe zou je anders jitter tot <0,5 ps kunnen waarnemen? Ik raak er steeds meer van overtuigd dat niet alleen de absolute waarde dan de faseruis van belang is maar ook diens frequentie-inhoud! Dat is echter nauwelijks meetbaar...

Het gaat dus om twee dingen: Het raster waarop de nuldoorgangen van het audiosignaal komen te liggen door digitalisering moet fijn genoeg zijn (sampling rate) en het moet 'stil staan' (jitter).

Niet-lineaire junction capaciteiten

Waar ik mijzelf nogal druk over maak, is de invloed van niet-lineaire junction capaciteiten in laagfrequentversterkers en hoogfrequent-oscillatoren. Dat wil zeggen dat de ingangscapaciteit van een halfgeleiderversterker afhankelijk is van de grootte van hetingangssignaal. Bij **oscillatoren** vergroot het de omzetting van (ruis-)amplitude modulatie op het oscillatorsignaal naar fasemodulatie wat de jitter vergroot. Ik behandel dat uitgebreid in: "De Beste Oscillator beter begrepen" op deze website onder Artikelen over Radio. De truc is hier dat de amplitude van het HF-signaal zo goed mogelijk constant gehouden wordt (met een AVC) zodat de niet-lineaire junction capaciteiten er minder invloed op hebben. De junctions in kwestie worden klein gekozen zodat hun capaciteiten klein zijn. Bovendien wordt de DC-spanning over de (gesperde) junctions zo groot mogelijk gemaakt.

Bij **laagfrequent versterkers** beïnvloeden de lagere frequenties (met over het algemeen grote amplituden) de hogere frequenties doordat de niet-lineaire parasitaire junction capaciteiten de nuldoorgangen van de hogere frequenties verplaatsten omdat de doorlooptijd van het betreffende versterkerelement varieert. De nuldoorgangen van de harmonischen 'kloppen' in ieder geval 'niet meer'. Je zou dit **laagfrequente jitter** kunnen noemen. Zonder dat daar een fysiologische verklaring voor is, blijkt de mens erg gevoelig voor dit soort vervorming die niet eenvoudig te meten is. Ik denk dat de eerdergenoemde jitter-vervorming hoofdzakelijk door niet-lineaire parasitaire junction capaciteiten veroorzaakt wordt. Als dat zo is, moeten we vooral de Miller-capaciteit in de gaten houden die in een halfgeleider ook niet-lineair is. De Miller-capaciteit is immers de denkbeeldige collector - basis (drain - gate) capaciteit die deze C_{CB} de versterking maal zo groot maakt.

Dit verklaart ook waarom analoge clipping/compressie veel beroerder klinkt dan digitale compressie. Bij bedoelde analoge clipping loopt de versterker vast. Dat betekent dat op die momenten de junction-capaciteiten het grootst zijn. Dat heeft zijn invloed op de nuldoorgangen van het signaal. Er vindt natuurlijk ook intermodulatie plaats die de nodige smerigheid toevoegt, maar dat terzijde. Bij 'digitale clipping' is daar geen sprake van. Daar vindt overflow van de digitale geluidsvoorstelling plaats. Als dat signaal weer omgezet wordt naar een analog signaal, zullen de nuldoorgangen weer keurig op hun plaats staan.

Remedies in LF-versterkers

- Om te beginnen: impedanties laag houden. Een variabele C heeft over 1 k Ω minder effect dan over bv. 30 k Ω .
- Kleine transistoren kiezen. Hoe kleiner de junctions, des te kleiner de parasitaire capaciteiten.
- Transistoren met een grote F_T kiezen. Dit is in tegenspraak met de eisen voor stabiliteit, maar HF-transistoren hebben kleinere parasitaire capaciteiten.
- De bias-spanningen over de (gesperde) junctions groot maken. Diodes die 'ver dicht staan' hebben een veel kleinere (niet-lineaire) capaciteit!
- Schakelingen kiezen waarin over de Miller-capaciteit slechts kleine wisselspanningen komen te staan. Twee halfgeleiders boven elkaar (cascode) elimineren de Miller-capaciteit grotendeels door de lage impedantie van de bovenste transistor. De spanningsversterking van de onderste transistor wordt nihil! Dit is voor HF uitgewerkt in: "FET in gearde source schakeling met hoog IP3" onder Artikelen over Radio op deze site.

Voor laagfrequent is een uitgewerkt voorbeeld te vinden in: "Meetmicrofoon" onder Artikelen over Audio op deze site.

Zonder dat Douglas Self dat noemt, gebruikt hij de cascode (met een ander argument) in 'de VAS' van zijn LF-power-versterkers. De verbetering daarmee komt - volgens mij - meer door het elimineren van de Miller-capaciteit dan door de betere aanpassing....

- Bij schakelingen die *hoogohmig moeten* zijn, zoals de ingang van een condensatormicrofoonversterker, kunnen de parasitaire capaciteiten alleen nog te lijf gegaan worden door **bootstrapping** van de voedingsspanning(en). Voor HF-schakelingen is dit nauwelijks mogelijk. Voor laagfrequent is een uitgebreid voorbeeld uitgewerkt in: "Condenser microphone pre-amp with bootstrapped op amp" onder Artikelen over Audio op deze site.

Het soort vervorming dat laagfrequente jitter veroorzaakt, lijkt verdacht veel op de vervorming in een DAC met audio-gerelateerde jitter op de clock. Ook dan worden de nuldoorgangen van de audio beïnvloed. Dat deze vervormingen op elkaar lijken is dus minder vreemd dan vaak werd gedacht.

Tegenkoppeling

Tegenkoppeling is **de** remedie tegen (bijna) alle soorten vervorming binnen een versterker. Hiermee bedoel ik: **sterke** tegenkoppeling. Liever 100 dan 20 dB. Dit is ook de reden dat je met buizenversterkers nooit echt kleine vervormingsgetallen kunt maken. De uitgangstrafo beperkt de bandbreedte te veel waardoor bij veel tegenkoppeling instabiliteit optreedt. Baxandall heeft ooit beargumenteerd dat 'een beetje' tegenkoppelen nadelig is: de verhouding tussen de lagere- en de hogere harmonischen wordt verstoord.

Bij halfgeleiderversterkers kan de bandbreedte zeer groot gemaakt worden, wat de tegenkoppeling, en dus de geluidskwaliteit, ten goede komt als je bovendien niet meer toelaat dan het audiospectrum. Uiteraard moet de vervorming van de nog niet tegengekoppelde versterker zo klein mogelijk zijn om de tegenkoppeling maximaal effect te laten hebben. Dat geldt vooral voor de laagfrequente jitter. We moeten niet vergeten dat de open-loop-versterking van elke versterker afneemt met de frequentie. Om bij 20kHz 40 dB tegenkoppeling te verwezenlijken is geen sinecure.

En de luidspreker dan?

Tot nog toe hadden we de luidspreker buiten beschouwing gelaten. Zolang er geen gebruik gemaakt wordt van dynamische full-range luidsprekers, zal er nauwelijks of geen LF-jitter-vervorming optreden: de midden- en hogetonen-luidspreker krijgen geen lage frequenties aangeboden die de bedoelde jitter kunnen veroorzaken. Uiteraard is de luidspreker vaak het meest verantwoordelijk voor de uiteindelijke geluidskwaliteit, maar dat is om andere redenen dan hier bedoeld.....

Voor de volledigheid: (full range) electrostatische luidsprekers hebben hier geen last van.

9 juni 2013, 30-3'16, 26-11'16