

DYNAMIEK TUSSEN RUIS EN VERVORMING

In dit hoofdstuk gaat het vooral om de samenhang van theorie en praktijk in de audiowereld. Maar ook over het verschil tussen meetresultaten en hetgeen praktisch hoorbaar is. Bijvoorbeeld over het feit, dat 0,1% harmonische vervorming erger kan zijn dan 3%. Het is dit soort ongerijmdheden, dat telkens weer verwondering wekt.

0,1% harmonische vervorming kan erger zijn dan 3%

Waarom bijvoorbeeld mag een versterker niet meer dan 0,1% harmonische vervorming hebben, terwijl een analoge (cassette)recorder rustig 3% mag bezitten? Is niet een cassette recorder met het nieuwe ruisonderdrukkingssysteem "X-Com-z" met 100dB gespecificeerde dynamiekomvang beter dan de semi-professionele spoelenrecorder met (slechts) 76dB dynamiek? Voor een professionele recorder, zoals die bij de omroep wordt (werd?) gebruikt geldt zelfs slechts 60dB gewogen S/R verhouding. Een CD speler haalt met gemak 96dB en klinkt een stuk beter dan de eerstgenoemde recorder met zijn 100dB. Erger en gekker nog: een oude buizenversterker zou met >0,3% harmonische vervorming in het meest gebruikte niveaubereik in de praktijk "schoner" klinken dan een oudere transistorversterker, die slechts maximaal 0,05% bij volledige uitsturing vervormt.

Een ruisonderdrukkingssysteem "ab" met 20% (gemeten) verbetering levert ruisvrijer muziekweergave dan de concurrentie "cd" met slechts 8dB. Dat is te verwachten. Merkwaardig is dan wel weer, dat dit mogelijk geldt voor de Strijkkwartetten van Mozart, maar niet voor het Oscar Peterson trio. Dan klinkt namelijk via het 'ab' systeem nog ruis.

En waarom tenslotte leiden harmonische vervormingsmetingen bij cassettedecks boven de 2kHz, bij tuners boven de 5kHz en bij CD spelers boven de 6,3kHz weliswaar tot mooie resultaten, maar zeggen ze niets over de gehoormatige indrukken en zijn ze in beide laatste gevallen zelfs helemaal fout?

Een wezenlijke invloed, een factor van groot belang is de reeds beschreven fysiologie van het menselijk oor met zijn diverse drempels en grenzen en met het maskeringseffect. Maar ook de diverse fysische grenzen en de verschillende meetnormen en -procedures zijn van invloed.

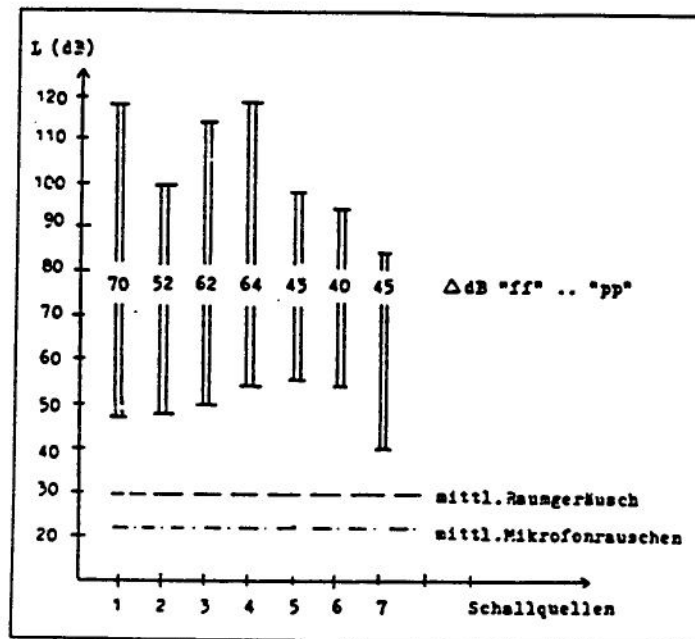
Alleen al de term dynamiek heeft vaak foutieve ideeën tot gevolg. Daarom eerst nog even terug naar het begin.

De relatie tussen procent, decibel en foon

Het oor beoordeelt bij een vergelijking van luidsterktes altijd de verhouding tussen twee geluidsdrukken. In een elektronische schakeling van een HiFi installatie betekent geluidsdruk altijd spanning. Voor de hoorbare verschillen is daarom de onderlinge verhouding van de spanningswaarden maatgevend. Een dubbele afluister luidsterkte, of nauwkeuriger gezegd een dubbele luidheid betekent, dat een 3,16-voudig hogere spanning moet worden ingesteld met de volumeknop. De halve luidheid komt derhalve overeen met het 0,316-voudige. Voor een toename tot de viervoudige luidheid is de $3.16.3.16 = 10$ -voudige spanning nodig.

Met dergelijke verhoudingscijfers springt niemand voor zijn genoegten om. Maar ook percentages helpen niet echt verder. Bij viervoudige luidheid moet de spanning van 800% tot 900% worden

verhoogd, of bij een kwart van de luidheid van 90% tot 10% worden verlaagd. Nog afgezien van het feit, dat het rekenen in procenten nog moeilijker is, geeft het vaak aanleiding tot misverstanden en spraakverwarring.



Typische geluidsniveau bereiken ("ff" ... "pp") van natuurlijke signaalbronnen (aan het hoofd-microfoonstel, lineair en quasi-piek):

1. Groot orkest en koor (Verdi: Requiem)
2. Klassiek orkest (Mozart: Haffner Symfonie KV 385)
3. Sopraan (dramatische aria uit Mozarts "Idomeneo")
4. Operakoor
5. Piano (accorden, afzonderlijke tonen Bösendorfer Imperial)
6. Strijkkwartet (Brahms)
7. Spraak (reciteren)

In de zaal liggen deze niveau's lager en daardoor dichterbij de buurt van de onontkoombare zaalgeluiden. De lineaire piekwaarde meting levert hogere waarden dan de gewogen (A-filter) meting.

Daarom vereenvoudigt de decibel het hoofdrekenen enorm. Het gaat hier om een logaritmische maat. Een logaritme vervangt het vermenigvuldigen en delen door optellen en aftrekken; het is het principe van de aloude rekenlineaal. Een optelling van de logaritmisch verdeelde schaalafstanden betekent een vermenigvuldiging. Een 3,16-voudige spanning komt overeen met +10dB, een 10-voudige spanning +20dB ($3,16 \cdot 3,16 = 10$ of in decibels +10dB + + 10dB = +20dB).

Wezenlijke luidsterkteverschillen betekenen een verandering van 10dB (verdubbeling of halvering van de luidsterkte). Verschillen van 1dB zijn gewoonlijk net waarneembaar. Wanneer de mogelijkheid bestaat om zorgvuldig directe A/B vergelijkingen te maken, dan kan het geschoolde oor nog net veranderingen van 0,3dB (ca. 3%)

waarnemen. Hoe langer A en B in de tijd gezien uit elkaar liggen, des te moeilijker het wordt om nog onderscheid te maken.

Een praktisch voorbeeld van het gebruik van de decibel

Wanneer verschillende versterkers en spanningsdelers in serie zijn geschakeld, ziet de dB rekening er als volgt uit:

	verhouding	niveau
voorversterker	x 100	+40dB
spanningsdeler	x 0,89	- 1dB
versterker	x 10	+20dB
volumeregeling	x 0,05	-26dB
versterker	x 1,12	+ 1dB
balansregeling	x 0,5	- 6dB
eindtrap	x 4	+12dB
	x 100	+40dB

De formules voor de niveauverschillen ΔL luiden voor de spanningsverhoudingen U:

$$\Delta L = 20 \log (U_2/U_1)$$

voor vermogensverhoudingen P:

$$\Delta L = 10 \log (P_2/P_1)$$

voor geluidsdrukverhoudingen p:

$$\Delta L = 20 \log (p_2/p_1)$$

en voor geluidsintensiteiten J:

$$\Delta L = 10 \log (J_2/J_1)$$

We kennen slechts één soort dB en geen afzonderlijke vermogens- en spannings dB's. Een met 3dB verhoogde spanning betekent altijd ook een met 3dB verhoogd vermogen, tenzij tevens ook andere eigenschappen - zoals de afsluitweerstand - worden gewijzigd.

De factor 10 of 20 in bovenstaande voorbeelden is het gevolg van het feit, dat de van de energie afgeleide groten (vermogen, geluidsintensiteit) altijd met het kwadraat van de eenvoudige groten (spanning, stroom, geluidsdruk of geluidssnelheid) veranderen. Kwadrateren betekent logaritmisch een vermenigvuldiging met 2.

100W versterker niet veel krachtiger dan 80W dito

Uit het voorgaande volgt, dat de werkelijke verschillen tussen eindversterkers dus ook op een 10-voudig eindvermogen neerkomen. Het verschil tussen een 100- en een 80W versterker bij volledige uitsturing bedraagt dus slechts 1dB en is dus net hoorbaar. Bij waarden van 1dB en minder geldt als eenvoudig gelineariseerde benadering:

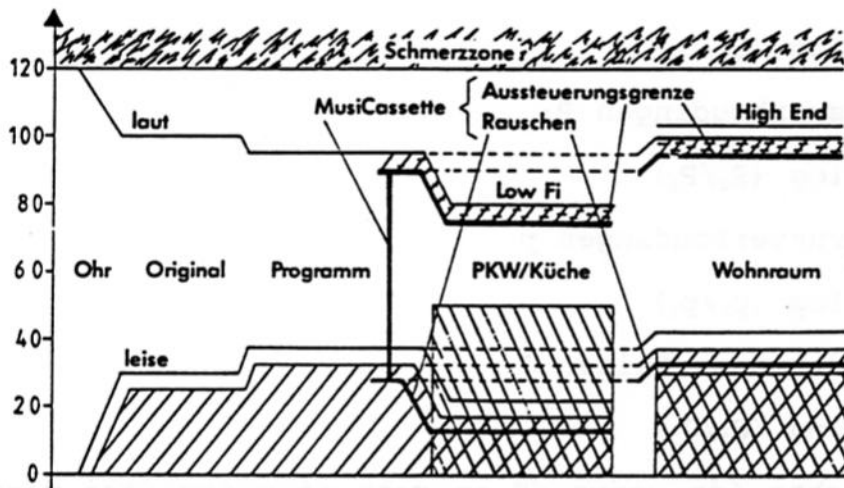
$$0,1\text{dB} = 1\%$$

Grote verhoudingsverschillen zijn met dB waarden eenvoudig uit te drukken. Voor het menselijk oor geldt een verhouding van

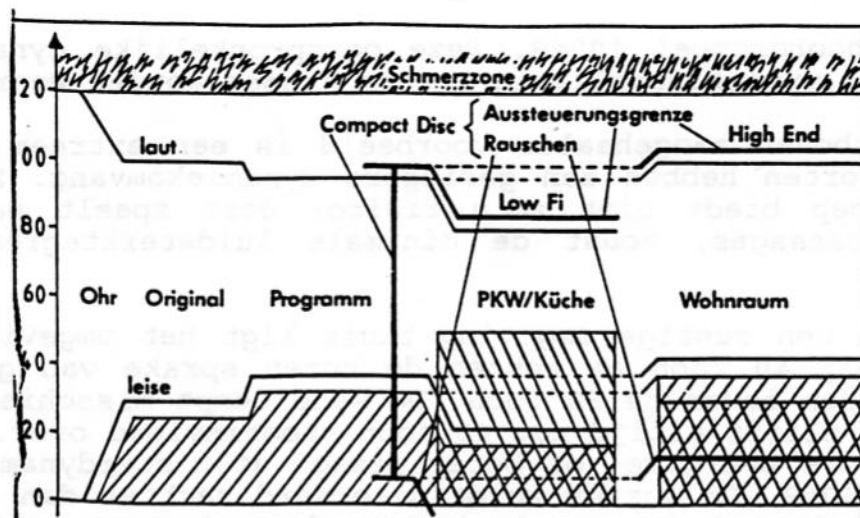
1:1.000.000 tussen gehoordrempel en pijngrens bij 1kHz. Het verschil tussen deze beide geluidsintensiteiten bedraagt 1 triljoen (een 1 met 12 nullen). De logaritmische decibel maat biedt een makkelijker hanteerbaar getal: 120dB. Dit geldt zowel voor de geluidsdruk als voor de geluidsintensiteit, zodat misverstanden zijn uitgesloten.

De maateenheid foon is een nog beter op het oor aangepaste meetgrootte. Bij 1kHz loopt de foonschaal ongeveer gelijk aan de dB schaal, wanneer de gehoordrempel met 0dB wordt aangehouden en geluidsdrukken en -intensiteiten dus altijd aan de gehoordrempel worden gerelateerd.

Het meten van luidsterktes in foon is erg lastig, omdat zoals bekend de oorgevoeligheid frequentie-afhankelijk is. Bovendien is deze gevoeligheid ook nog verschillend voor diverse toon- en ruissoorten. Als best mogelijke benadering wordt de dB-A gebruikt. Hieronder twee praktijkvoorbeelden.



Musicassettes, die in de luidste muziekgedeelten iets zijn overstuurd, ruisen bij High End weergave. Bij veel omgevingslawaai is het dynamisch bereik van het weergavesysteem bijna groot genoeg; de ruis wordt geheel gemaskeerd, maar luide passages klinken vervormd.



De CD heeft onder- en bovenaan dynamiekreserves. In de auto of de keuken is zijn dynamiek haast te groot; in de huiskamer gaat de ruis onder in het uit de concertzaal en de huiskamer komende achtergrondlawaai. De installatie mag echter niet te snel in oversturing raken.

Vijfvoudige dynamiek: goed voor een roes of ruis

Dynamiek - een begrip, dat ons verder helpt bij een beter besef tijdens het vergelijken van HiFi apparaten en bij het zelf opnemen van muziek. Maar ook een verwarrend begrip, want maar al te vaak worden de verschillende dynamiekbegrippen door elkaar gebruikt en dreigen appels met peren te worden vergeleken.

Onder het begrip dynamiek noemt de Van Dale slechts de voor ons relevante verklaring: (muz.) leer der sterktegraden en de kunst van hun gebruik. In een technisch lexicon vinden we onder dit aan het grieks ontleende begrip: bewegingsleer van lichamen (fysica); verandering van geluidsterkte (muz.).

Zo bezien is het dynamisch bereik de speelruimte voor de luidsterkteverschillen. Maar voor welke verandering? Die van pianissimo tot fortissimo, storende ruis tot vervorming of fluistergeluid tot persluchtmerker?

Het oor bepaalt de grenzen. Aan de onderkant door de gehoordrempel. Gelukkig kunnen we het gras niet horen groeien. En boven door de pijngrens. De akoestische meet-grootheden voor deze grenzen zijn 0 en 120 foon.

De decibel (zonder toevoeging) beschrijft daarentegen steeds luidsterkterverschillen (nauwkeuriger gezegd: -verhoudingen). Het hoorbereik tussen 0 en 120 foon omvat dus 120dB, de dynamiek van het oor. Alle andere dynamische waarden moeten binnen deze schaal worden gepast.

Een zwaar bezet symfonie orkest bereikt in de zaal zo'n 100 foon en omdat de zachtste passages in het stoorniveau van 25 foon van zelfs de stilste zaal ondergaan, betekent dit een bereik van 75dB. Het muziekstuk zelf heeft een geringere dynamiek. De pianissimoge-deelten komen boven de 30 foon. De oorspronkelijke dynamiek van de muziek in de zaal bedraagt daarom voor grote orkesten een krappe 70dB.

Maar op de luisteraar werken verder nog muzikdetails in, die - hoewel zachter dan het stoorniveau - toch nog kunnen worden waargenomen. Zo komen we toch weer op 75dB of in extreme gevallen

tot de hoordrempel 100dB. Deze oorspronkelijke dynamiek zou door een goede muziekinstallatie moeten kunnen worden weergegeven.

Het hierboven aangehaalde voorbeeld is een extreem geval. Andere muzieksoorten hebben een geringere dynamiekomvang. Zelfs een hard rock groep biedt niet zo'n risico: deze speelt nauwelijks ooit zachte passages, zodat de minimale luidsterktegrens naar boven schuift.

Zelfs in een rustige omgeving thuis ligt het omgevingslawaaï niet zelden bij 40 foon en achten de burens sprake van geluidsoverlast bij waarden boven de 90 foon. De wand dempt misschien met 50 foon, maar dan blijft altijd nog 40 foon stoorinvloed over.

De haalbare weergave- of beter gezegd af luisterdynamiek blijft dan slechts 50dB. De muziek wordt uiteraard zachter dan in de concertzaal beluisterd en pianissimogedeelten kunnen makkelijk in het omgevingslawaaï verloren gaan.

Kortom: reclamekreten uit de HiFi wereld als "De concertzaal thuis" zijn onzin, want alleen al de oorspronkelijke dynamiek kan nooit thuis worden afgebeeld. Dat geldt zelfs voor een strijkkwartet. Van de geproduceerde 80dB blijft in de huiskamer hooguit 40dB over.

Omdat het op een paar uitzonderingen na onzinnig is, om te streven naar het bereiken van de oorspronkelijke dynamiek bij weergave (en zeker niet met een klokradio in de keuken of met behulp van een krachtige booster in de auto), wordt met name bij de radio de dynamiek lekker gecomprimeerd.

Belangrijker dan de weergave van de oorspronkelijke dynamiek is het om nodeloze storingen en vervormingen tegen te gaan. Wel geldt, dat de systeem dynamiek van een installatie altijd groter moet zijn, dan de programma-dynamiek, net zoals de totaal gehoorde originele dynamiek groter is dan de oorspronkelijke dynamiekomvang van de muziek.

Deze diverse dynamiekwaarden lijken op een kofferset. Het koffer-tje "af luisterdynamiek" moet in de koffer "programmady namiek" passen, dat op zijn beurt in de "systeemdynamiek" past, die opnieuw in de "oordynamiek" als grootste koffer past.

De systeemdynamiek speelt tenslotte bij apparatuur aanschaf een grote rol. De meetgrootheden voor de dynamiek hebben bij HiFi apparaten verschillende benamingen, ze kunnen op verschillende manier worden gemeten en moeten zelfs bij identieke, op verschillende apparatuursoorten losgelaten meetmethodes heel voorzichtig en zorgvuldig onderling worden vergeleken.

Technisch gezien is het dynamiekbereik aan de bovenkant begrensd door die spanning, waarbij net nog geen duidelijke vervorming optreedt en aan de onderkant door de spanning, die door niet in de muziek of spraak thuishorende stoorsignalen.

De logaritmische verhouding van deze spanningswaarden wordt als "afstand" in "db" aangegeven. Het spreekt vanzelf, dat deze afstanden liefst zo groot mogelijk moeten zijn.

LP weergave is in dynamisch opzicht het kwetsbaarst, hoewel bij opname het gebruik van ruisvrijere microfoons en banden, gebruik van betere snijtechnieken (Direct Metal Mastering), betere pickup-naalden (die qua vorm de snijbeitel dichter benaderen) en brom/ruisvrijer (voor)voorversterkers hebben geholpen.

Ook bij FM uitzendingen wordt zelden de optimale dynamiek bereikt. Begrenzers en companders bederven het dynamisch beeld, het ergst bij popzenders, die vaak louter dynamisch platgewalste muziek laten horen. Bovendien verpesten heel wat antennekabelsystemen het geluid met hun brom, ruis, kruismodulatie en vervorming verder. Heel wat analoge meersporen recorders kunnen het ondanks de verbeterde bandsoorten en ruisonderdrukking nog niet opnemen tegen tweespoors studio recorders.

De ruis gedurende de muziekpauzes (als meetwaarde de gewogen S/R verhouding) stoort nauwelijks; eerder is achtergrondgeruis gedurende muziekpassages hinderlijk, zeker als het niet constant maar fluctuerend is. Over dat soort fenomenen zwijgen de prospectussen. De volledige werking van ruisonderdrukkingssystemen geldt alleen gedurende de pauzes!

Waarom companders het beste door kinderen kunnen worden getest

De achtergrondruis kan bij een in de pauzes krachtig ingrijpend compandersysteem bij bepaalde muzieksoorten meer storen (met "hijg- of pomp" effecten) dan bij een van huis uit milder reagerend systeem.

Een krachtig ingrijpende compander valt in de praktijk vaak kwalitatief af, omdat de eigenruis van de ingangsversterker (speciaal bij microfooningangen) al zo groot is, dat de ruisvermindering nooit geheel tot effect kan komen.

De hoorbaarheid van achtergrondruis hangt sterk van de leeftijd af. Compander ontwikkelaars zouden er daarom goed aan doen, hun produkten door kinderen te laten testen. Met het ouder worden neemt de gevoeligheid voor subtiele hoogfrequente ruis af.

Deze ruis kan bovendien nog aan- en afzwellen (ruismodulatie) en bij het wegsterven van luid fff geluid nog een kwalijke "ruis-sliert" opwekken. De eerste generatie dbx en High Com companders had daar duidelijk veel last van.

Luide tonen van de menselijke stem, slagwerk of synthesizers klinken maar al te vaak onzuiver en dof. Daartegen helpt alleen een zachtere uitsturing, maar dan wordt soms de ruis weer hinderlijk.

Op dit punt is een zinvolle meting in zwang gekomen: de hoogdynamiek, die voor de hoge tonen bij 10 of 14kHz geldt. Ook deze moet natuurlijk liefst zo groot mogelijk zijn. Dat spoelenrecorders in deze discipline hoger scoren dan cassettedecks zal geen verwondering wekken. Daarom hoeft daar de haalbare dynamiek bij muziek, die rijk is aan hoge tonen, ook nauwelijks te worden begrensd.

Ruis effectief en op de spits gedreven

De stoorspanningen, vooral die van de ruis, maar ook die van de brom, kunnen op heel verschillende manieren worden gemeten. We hadden het elders al over de weegfilters.

Voor de gewogen S/R verhouding wordt volgens DIN 45.500 een A-filter gebruikt. Het frequentieverloop daarvan komt overeen met de fooncurve bij geringe luidsterktes.

Vroeger hanteerde DIN een ander filter; de duidelijk fraaiere A-waarden van Japanse fabrikanten hebben er destijds toe geleid, dat men zich onder druk van de markt en de buitenlandse concurrentie aanpaste en dat meteen werd omgeschakeld naar het meten van effectieve waarden.

Hoogwaardige metingen van wisselspanningen worden uitgevoerd als meting van de effectieve waarde. Die is recht evenredig met de energie-inhoud van het signaal, ongeacht de soort signaal (sinus, blokgolf, ruis, muziekprogramma).

Met eenvoudige meetapparaten wordt slechts de gemiddelde waarde bepaald, die voor de sinus volgens een aanduiding van de effectieve waarde kan worden gecorrigeerd. Bij andere signalen geven dergelijke meetinstrumenten niet meer de juiste waarde aan.

Wanneer terwille van de uitsturing of om de subjectieve stooreffecten te bepalen de maximale amplitudewaarde moet worden opgegeven, is een piekwaarde karakteristiek nodig.

Bij gebruik als VU meter of uitsturingsinstrument slaan piekwaarde instrumenten ten opzichte van gemiddelde waarden aangevende instrumenten ondanks identieke aanwijzing bij sinustonen bij muziek materiaal 10dB verder uit.

Als stoorspanningsmeter zijn een 3 tot 5dB hogere uitslag ten opzichte van een meting van de effectieve waarde usance. Quasi piekwaarde instrumenten zijn zodanig gecorrigeerd, dat ze bij sinusvormige signalen even ver uitslaan als bij effectieve waarden.

De dynamiek aan de bovengrens

De weergave van een zuivere sinustoon via een moderne versterker met 0,1% harmonische vervorming klinkt aanzienlijk onplezieriger dan dezelfde toon via een bandrecorder met 3%- of een buizenversterker met 1% harmonische vervorming.

Heel wat buizenversterkers zorgen ondanks hun matige specificaties en naar de huidige begrippen ongunstige meetwaarden voor een opvallend mooi aangenaam en voldoende luid geluid. Daarentegen zijn er nog steeds transistorversterkers, die met imposante meetwaarden pronken en die toch gehoormatig onaangenaam opvallen.

De fysiologie van het menselijk oor tolereert sommige vervormingssoorten nauwelijks. Speciale vervormingssoorten storen bij het meten met gangbare signalen nauwelijks, maar vallen bij luidspreker weergave hinderlijk op.

Bij hoge uitsturing van een band wordt het opgenomen sinusvormige signaal in toenemende mate verbogen. De positieve en negatieve piek van de sinus worden afgevlakt. Er is van een langzame toename sprake. Op de oscilloscoop gezien blijft het curve-verloop rond, zonder scherpe hoeken of overgangen.

De vervormingscurve loopt continu op met het stijgende niveau en er ontstaan vrijwel louter 3e harmonischen. Een dergelijk interval klinkt zuiver: het is een kwint (duodeciem). Daarom schrikt het oor niet van waarden van 3% K_3 , zoals die gelden als tolerantie voor nominaal uitgestuurde HiFi recorders.

Bij de goede, oude buizenversterker loopt de vervormingscurve ook continu op, maar wel wat steiler. De vervorming bestaat hier bovendien uit een behoorlijk aandeel 2e harmonischen. Als octaaf klinkt ook dit vervormingseffect harmonisch, al is het dan ook kritischer dan bij een recorder.

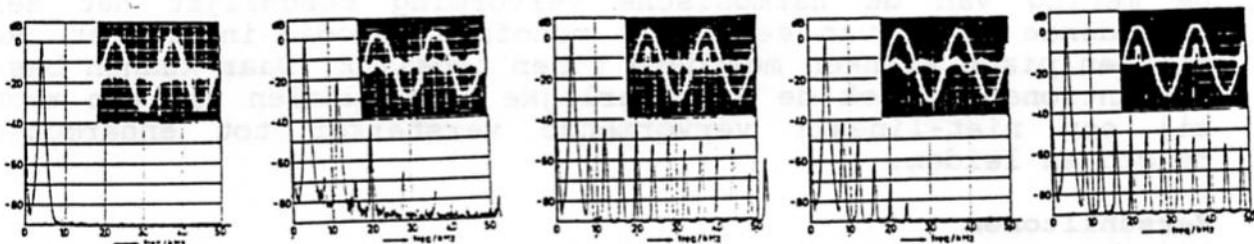
Wordt de versterker - zoals dat bij veel transistorversterkers het geval is - met behulp van grote tegenkoppeling vervormingsvrij gehouden, dan treedt bij de uitsturingsgrens een abrupte toename van de vervormingswaarden op. Binnen 0,3dB kan de harmonische

vervorming oplopen van 0,001% tot ruim 1%.

Daarbij treden behalve 2e en 3e lagere orde harmonischen ook veel hogere (tot boven de 10) op. Deze boventonen zijn vergeleken met die, welke in de spectra van muziekinstrumenten voorkomen, ongevoelbaar krachtig en liggen bovendien zo ver boven de grondtoon, dat ze in het gehoor sterk opvallen.

Ook de plotselinge klankverandering bij overschrijding van de oversturingsdrempel stoort enorm. Bij muziekweergave moet die oversturingsgrens in acht worden genomen, wat niet zo moeilijk is. Bij eindversterkers treedt bovendien een modulatie van de vervormingsfrequentie met de netfrequentie (50 en/of 100Hz) op, wat dat bereik volkomen onbruikbaar maakt.

Spectraalanalyse van vervorming bij een 400Hz toon



V.l.n.r. 1) "Vervormingsvrij". Harmonische vervorming: $< -95\text{dB} = 0,0018\%$; geen zichtbare vervormingsspooren (toongenerator), 2) Weke 3e harmonische vervorming: $-20\text{dB} = 10\%$. Oneven harmonische vervorming is vrijwel verwaarloosbaar. Vervormingsresten boven K_6 bedragen onder $-65\text{dB} = 0,06\%$. De sinuscurve is duidelijk, zij het licht afgevlakt en de drievoudige frequentie van het vervormingsaandeel is zichtbaar (bandrecorder), 3) harde, voornamelijk 3e harmonische vervorming $-40\text{dB} = 1\%$. De even vervormingsaandelen zijn duidelijk geringer dan de oneven dito's. Vervormingsaandelen boven K_6 bedragen nog altijd $-45\text{dB} = 0,55\%$! De harde begrenzing van de positieve halve golfvorm is duidelijk ingezet, de begrenzing van de negatieve halve golfvorm is slechts gering. Door de verschillend reagerende begrenzing zijn naast oneven harmonischen ook even dito's aanwezig (voorversterker), 4) weke, voornamelijk even harmonische vervorming: $-40\text{dB} = 1\%$. Vervormingsaandeel is in alle ordes aanwezig. Maar de hogere orde aandelen nemen snel af. Vervormingsaandeel boven K_6 bedraagt $-81\text{dB} = 0,009\%$. De spitsere vorm van de negatieve halve golf is al zichtbaar. Het vervormingsaandeel heeft meest dubbele frequenties (microfoonversterker met zwakke uitwendige tegenkoppeling) en 5) harde, ook even harmonische vervorming $= -40\text{dB} = 1\%$. Alle ordes zijn even sterk vertegenwoordigd. De hogere orde aandelen nemen nauwelijks af. Het aandeel boven K_6 bedraagt altijd nog -44dB of $0,6\%$! Alleen de positieve halve golfvorm is sterk begrensd, de vervormingsfout is kort van duur, maar heeft een grote intensiteit (eindversterker met enkelzijdige stroombegrenzing).

Digitale vervorming is erger

Ook bij digitale signaalverwerking kan de vervorming hevig toeslaan. Wanneer bij grote uitsturing de getallenvoorraad voor het

hoogste uit te drukken getal overschreden, dan zet die vervorming extreem abrupt en dramatisch in. Behalve de genoemde effecten treden ook de gevolgen van som/verschiltonen tengevolge van de interactie met de bemonsteringsfrequentie op.

Het ontstaan van deze Aliasing tonen komt bij het onderwerp "PCM codering" nader aan de orde.

Omdat deze in geen enkele nauwe relatie staan met de effectieve tonen en daar als regel in de frequentieband ver van verwijderd zijn, storen ze ernstig. Het gaat om disharmoniën, die ook niet worden gemaskeerd.

Harmonische en dissonante vervorming

De meting van harmonische vervorming is slechts één manier om het optreden van niet-lineaire vervorming in een elektro-akoestisch hulpmiddel te bepalen. Muziek heeft tenslotte maar weinig gemeen met een sinustoon.

De meting van de harmonische vervorming beschrijft het zelden optredende geval van een apart monofoon melodie-instrument. Reeds bij een piano klinken meerdere tonen tegelijk. Daar kunnen bas- en discanttonen of ook de afzonderlijke bestanddelen uit een accoord bij een niet-lineair vervormende versterker tot enharmonische mengtonen leiden.

Verschiltonen

Bij het meten van intermodulatie vervorming wordt bepaald, in hoeverre een krachtige lage toon een hogere met zijn intensiteit moduleert. Een geplukte bas kan bijvoorbeeld een fluittoon van een onbedoeld vibrato voorzien. De lage toon moduleert de hoge in zijn amplitude. Deze amplitudemodulatie wordt gemeten.

Het voordeel van deze procedure bestaat daarin, dat ook bij signalen met een wat forser ruis- en bromandeel nog een betrekkelijk eenvoudige meetopzet uitkomst brengt.

De IM vervorming leent zich daarom ook goed voor het bepalen van crossoververvorming bij geringe versterkervermogens. Het resultaat geldt in wezen voor het lage tonen bereik. Als bastest is de intermodulatie daarom ook heel geschikt om versterkers met ingangs- of uitgangstransformatoren te testen, omdat ze bij lage tonen zo makkelijk door de knieën gaan.

Een derde soort effect bij niet-lineair gedrag is heel storend: de verschiltoon vervorming. Twee tonen vormen in slechte HiFi componenten altijd mengtonen en dat zijn bijna altijd opvallende dissonanten.

Wanneer een versterker een kwart moet weergeven, bestaande uit een a (220Hz) en een d^1 (275Hz), dan worden als vervormingsproducten ook nog een A_1 (55Hz) en een b^1 (495) gevormd. De verschiltoon A_1 past nog enigszins in het klankbeeld, de somtoon b^1 stoort danig.

Een niet-lineair gedrag draagt niet slechts eenvoudige som- en verschiltonen (tengevolge van even harmonischen) bij, maar ook verschiltonen tussen de dubbele waarde van de ene en de enkelvoudige waarde van de andere frequentie. En omgekeerd.

In ons voorbeeld levert dat op: $(2 \cdot 220\text{Hz}) - 275\text{Hz} = 165\text{Hz}$ (ca. fis) en $(2 \cdot 275\text{Hz}) - 220\text{Hz} = 330\text{Hz}$ (e¹).

Deze even vervormingscomponenten vallen beslist hinderlijk op. Bij andere intervallen en vooral uiteraard bij complexe klankbeelden leiden dergelijke verschiltoonvervormingen tot een versmeerde klank op de achtergrond, die dissonant storend klinkt en die de

subtiliteiten uit de muziek te niet doet.

Met name bij muziek, die rijk is aan hoge tonen kunnen zich vervormingscomponenten in het presence- en brillebereik openbaren, die het klankbeeld "agressief" en "schril" maken. Dergelijke effecten komen vooral bij overstuurd opgenomen cassettes en bij ongelukkig smalbandig opgezette tuners voor. Ook de oversturing van sisklanken is een gevolg van verschiltönen.

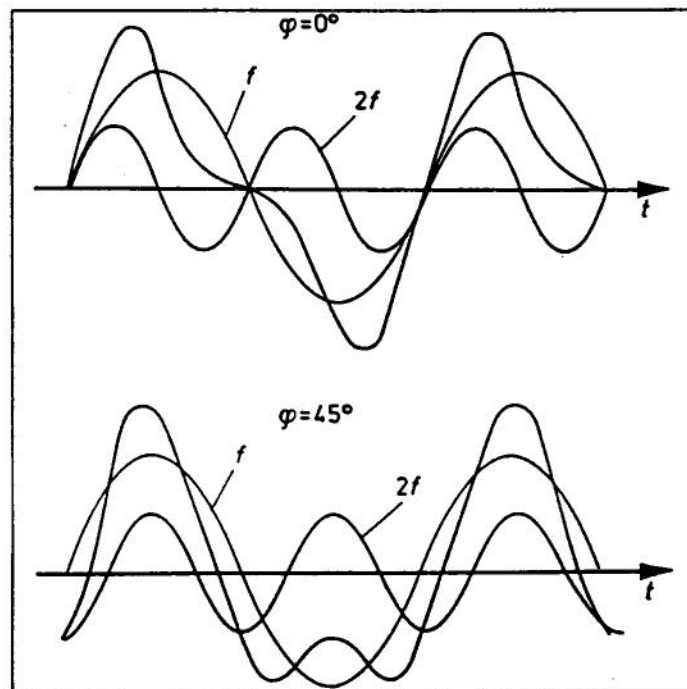
Harmonische-, intermodulatie- en verschiltone vervorming

De vervormingsmeting vormt slechts één van de mogelijke methodes om ongewenst niet-lineair gedrag van HiFi componenten aan het licht te brengen.

Harmonische vervorming wordt meestal als het minst ernstig beschouwd, zeker wanneer de inzet van die vervorming op weke wijze plaatsvindt en alleen zwakke boventonen van hogere orde ontstaan. Zinvoller zijn metingen van verschiltönen in het hogere frequentiegebied en van IM vervorming (combinatietonen) bij geringe uitgangsspanningen of lage frequenties.

Specificaties mogen strikt genomen alleen bij gelijksoortig werkende apparaten direct met elkaar worden vergeleken, anders moet eerst de spectrale verdeling van de vervormingscomponenten bekend zijn (frequentie-afhankelijke effecten) en de abruptheid van de inzet van die vervorming.

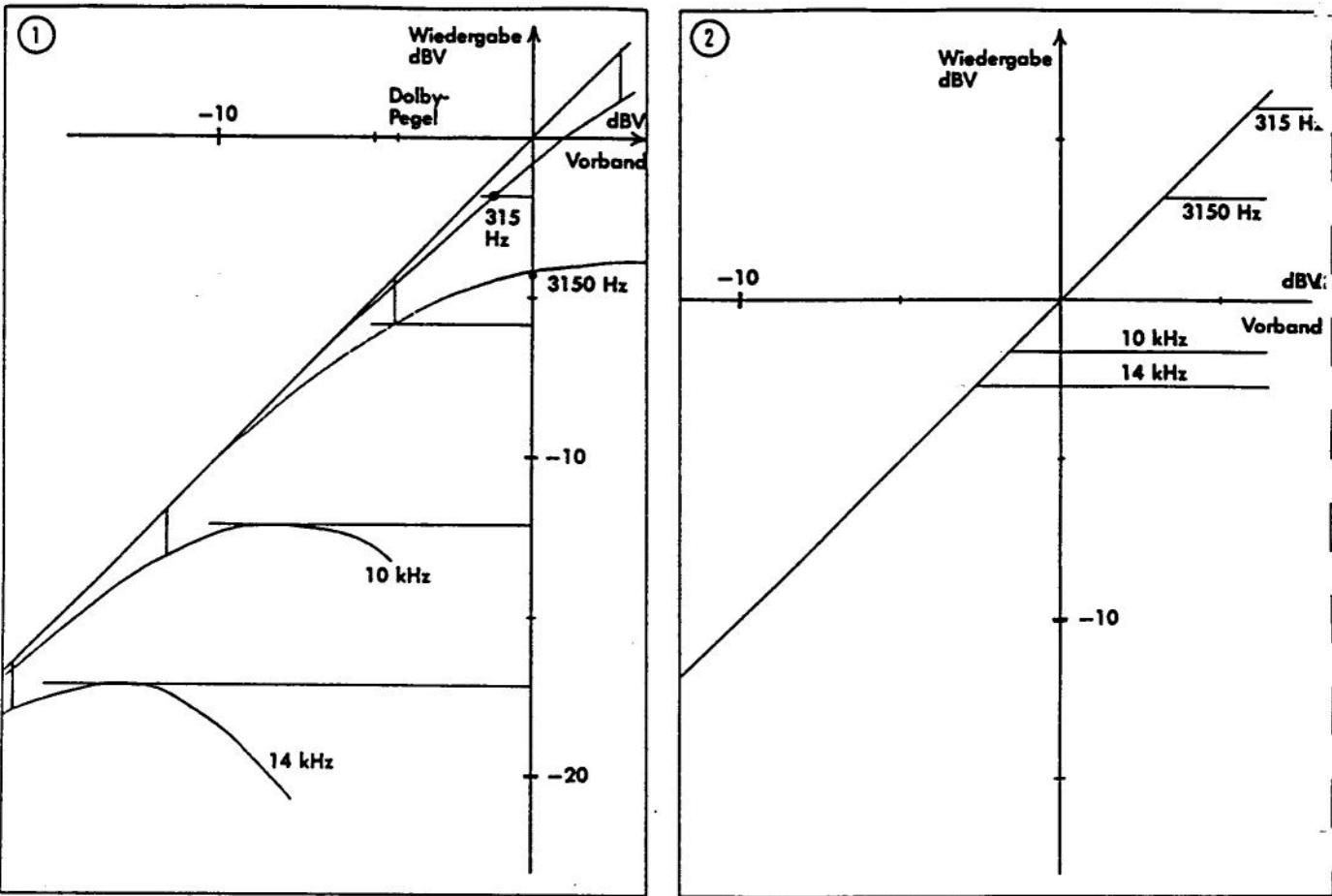
een waarde van 1% = -40dB voor de harmonische vervorming komt principieel overeen met 0,7 tot 0,75% (-43 - -42dB) verschiltonevervorming en 4 - 6% (-28 tot - 24dB) IM vervorming.



Verschillende looptijden (faseverschuivingen) kunnen oversturing tot gevolg hebben. De beide bovenstaande afbeeldingen laten zien, hoe tengevolge van een verschuiving van de signalen f en $2f$ ten opzichte van elkaar de piekwaarde (uitsturingswaarde) danig kan verschuiven. Hoewel de signaalinhoud precies gelijk blijft, is het

onderste mengsel (in het positieve bereik) zwakker uitstuurbaar.

Weke inzet van de vervorming



Terwijl de oscillograafbeelden laten zien, of de vervormingen in het verloop van de signaalfom plotseling met een knik inzetten, heeft het daarnaast ook zin om inplaats van de verschillen in de vervorming van het signaal zelf ook de reactie bij toename van het geluidsvolume af te beelden. Hierboven is op de horizontale as het ingangsniveau (voor de band) aangegeven en verticaal de uitgang (weergave, na de band). De curven zijn kenmerkend voor een cassette-deck. Links (1) geldt voor een redelijk goede chroomdioxideband, rechts (2) voor een videorecorder met PCM processor.

Voor de vier belangrijke frequentiegebieden zijn de gangbare uitsturingsgrenzen aangegeven. Dat zijn bij 315Hz 3% harmonische vervorming, bij 10 en 14kHz de verzadiging (het weergavemaximum tout court). Voor alle frequenties is bovendien de plaats op de curve aangegeven, waarbij de weergave op grond van de door de vervorming bepaalde compressie 1,5dB zwakker en zo verkeerd wordt. Vaak geldt deze grenswaarde bij 3150Hz ook als waarde voor de uitstuurbaarheid van cassettebanden in tests.

Elke afwijking van de 1:1 bissectrice betekent een afwijking bij weergave van de opname en dus vervorming. Bij de analoge bandopname zet de vervorming heel week in. Dat is echter ook heel bepalend, omdat deze banden om een grote ruisafstand te realiseren ook

voortdurend tot in de vervormingszone worden uitgestuurd.

Een PCM pseudo videorecorder (en de compact disc met emphasis) werkt strikt langs de lineaire 1:1 lijn. Maar bij de uitsturingsgrens knikt de curve snel af; de klankkleur slaat bij de geringste niveauverandering om. Tengevolge van de vooral in de hoge tonen grotere uitstuurbaarheid bestaat hier de mogelijkheid om in de praktijk een reserve tot het plotselinge begin van de vervorming te realiseren.

Bij FM tuners liggen de verhoudingen weer heel anders. Hier vormt niet de krachtige inzet van de vervorming de grens, maar de voorschriften van Telecom. De zenders mogen elkaar niet storen en om dat te bereiken, wordt de uitsturing begrensd. Deze grenzen liggen bij FM ver boven die van het gangbare cassetteniveau. Bovendien worden ze nog in het lineaire deel bereikt. Cassettes vervormen daarentegen bij de opgegeven grenswaarden al heel behoorlijk. Terwille van echt onvervormde opnamen verdient het aanbeveling niet de luid uit te sturen.

Uitwisselbare metingen

Hoe komt het echter, dat de zo kritische verschiltoonvervorming in geen enkele specificatie te vinden is? Het antwoord is simpel: omdat de meting een complexe opzet van de meetapparatuur en veel tijd vergt.

Gelukkig is het niet zo, dat hier nonchalant kosten worden bespaard en belangrijke gegevens worden verdonkeremaand. Alle drie de meetmethoden (harmonische-, IM- en verschiltoon vervorming) beschrijven tenslotte één en hetzelfde tekort van een HiFi apparaat.

Het is principieel mogelijk om de ene vervorming in de andere om te rekenen. Zo kan men uit het harmonische vervormingsgedrag de sterkte van de verschiltoonvervorming afleiden.

De vervormingswaarden zullen geleidelijk steeds meer aan betekenis inboeten. De meting is weliswaar simpel, maar laat bij sommige componenten verstek gaan in de hoge tonen, met name bij digitale componenten, die het veld langzamerhand domineren.

Bij hen eindigt het frequentiebereik plotseling bij 20kHz (voor de CD norm) of 15kHz (FM). Bij cassetterecorders worden klankcomponenten van 2kHz tengevolge van de laagdikte-damping sterk afgezwakt.

Dergelijke frequentieverlopen beïnvloeden de harmonische vervormingscomponenten. Bij de 7kHz meetfrequentie wordt de belangrijke 3e harmonische vervormingscomponent bij 21kHz al vrijwel geheel door het "brick wall" filter in het digitale systeem onderdrukt. Derde orde vervormingen schijnen dus niet aanwezig te zijn in het hoge tonen bereik; de harmonische vervormingsmeting is hier heel bedrieglijk!

Wel helpt hier de verschiltoon meting verder. Twee even sterke meettonen van 14 en 15kHz wekken vervormingscomponenten bij 1kHz op (even, d_2) en bij 13 en 16kHz (oneven, d_3). Een gemeenschappelijke meting van de 2e- en 3e orde componenten wordt mogelijk gemaakt door de IEC methode met 8 en 11,95kHz. De even en oneven componenten liggen dan rond de 4kHz.

In omroepkringen worden de recorders bij voorkeur met 7 en 11kHz

gemeten. De vervormingscomponent (even, want het gaat om een analoge machine) ligt bij 3kHz (= 2.7kHz - 1.1kHz). Analysatorfilters bij 3kHz zijn voor de vervormingsmeting bij 1kHz voorhanden (even vervorming: 3:1kHz).

Equivalent uitsturningsniveau

Voor verschillende signalen zijn andere verhoudingen van effectieve- en piekwaarde kenmerkend. De effectieve waarde als gangbare meetgrootte is echter veel minder bepalend voor de uitsturing van HiFi componenten dan de piekwaarde.

Met de volgende decibelwaarden kunnen de effectieve waarden worden gecorrigeerd om de equivalente sinus uitsturningswaarden te verkrijgen:

Intermodulatiesignaal (verhouding 4:1): +1,7dB

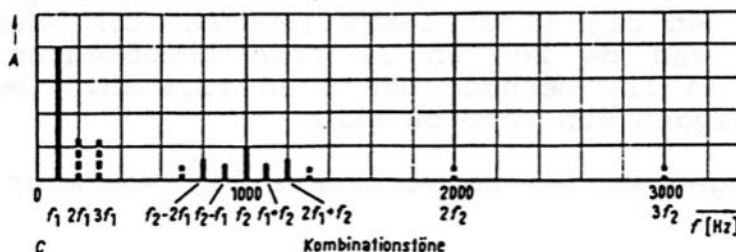
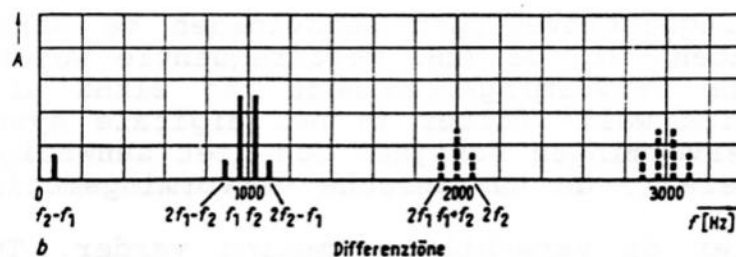
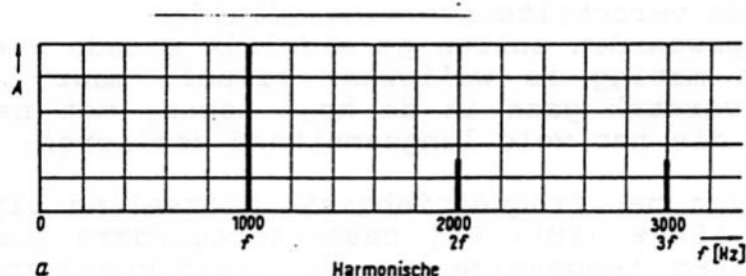
Verschiltoonsignaal (verhouding 1:1): + 3dB

Blokgolf signaal: -3dB.

Berekening van de vervormingswaarde aan de hand van de afzonderlijke componenten

● Harmonische vervorming

De harmonische vervormingscomponenten ($2f$, $3f$, $4f$, ..., nf) worden afzonderlijk gemeten, als effectieve waarden opgeteld en in verhouding tot de effectieve waarde van het totaal gehanteerd. Minder nauwkeurige, maar goedkopere meetapparaten bepalen direct de som van de effectieve waarden van alle vervormingscomponenten.



● Verschiltonen

Discrepanties treden bij de verschiltoonmethode op als het erom gaat de verkregen waarden te interpreteren. De specificaties in de normbladen zijn eenduidig en ook niet helemaal duidelijk. IEC 268, deel 2 beschrijft weliswaar een methode om een totale vervormingswaarde te bepalen, maar het is gebruikelijker om de 2e harmonische (d_2) en de 3e harmonische (d_3) verschiltoonfactor te vermelden.

Volgens een laatste IEC norm van juli 1984 bestaat er voor gewone HiFi apparatuur geen verschil meer met DIN 45503, blad 3. Bij d_2 wordt vlg. IEC de helft van de component $f_1 - f_2$ in relatie gebracht met één van de even luide tonen f_1 of f_2 . De vroegere IEC waarde was twee keer zo groot. Voor d_3 wordt de gemiddelde waarde van de bovenste en onderste zijband ($2f_1 - f_2$ en $2f_2 - f_1$) in relatie tot één van de testtonen gebracht. De vroegere IEC waarde lag een derde hoger.

● Intermodulatie

Bij de IM vervorming worden de rekenkundige sommen van de rond f_2 optredende frequentieparen als effectieve waarden opgeteld en gerelateerd aan het afzonderlijke signaal f_2 . Omdat deze nevenfrequentie paren een amplitudemodulatie van f_2 vormen, kunnen eenvoudige meetapparaten de totale vervormingswaarde via een amplitudemodulatie direct verstrekken.

Principieel kan harmonische vervorming in IM een IM vervormingsfactor en een verschiltoonfactor worden omgerekend, zoals we hierboven zagen.