

Een Fliege-notchfilter voor audiometingen

meet beter met een notchfilter

Alfred Rosenkränzer (Duitsland)

Bij het meten van de belangrijkste karakteristieken van een audioschakeling is het voor sommige parameters zeer wenselijk om het testsignaal weg te filteren voordat het uitgangssignaal aan de ingang van de testapparatuur wordt toegevoerd. Dat is precies waar dit artikel over gaat.

Zoals we al opmerkten in het artikel “Goedkope audiotester” [1] in Elektor juli/augustus 2022, hebben de USB-audio-interfaces die met geschikte software gebruikt kunnen worden om een audio-teststation op te zetten een belangrijke tekortkoming: ze missen een schakelbaar notchfilter vóór de ingang om de testfrequentie-component in het uitgangssignaal van het te testen audio-apparaat te onderdrukken. Maar waarom is een notchfilter zo belangrijk?

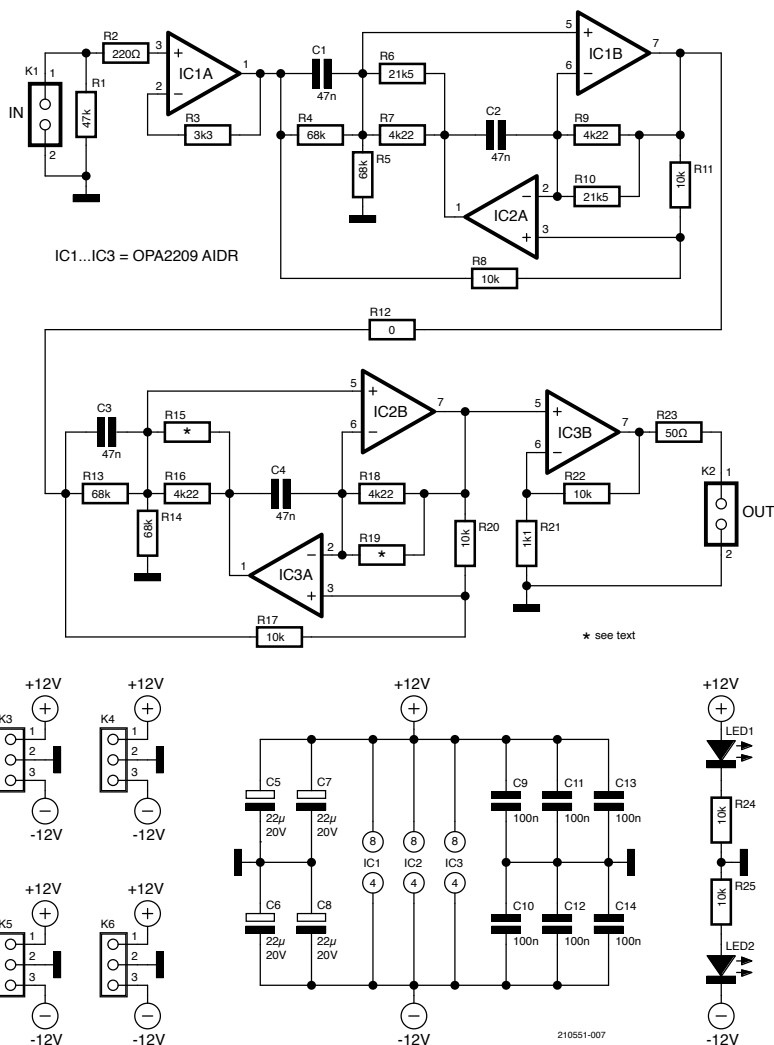
Optimaliseren met een notchfilter

De eenvoudigste manier om het belang van een notchfilter te illustreren is te kijken naar een testopstelling (zoals beschreven in bovengenoemd artikel), bedoeld om de kwaliteit van de audio-interface zelf te meten. Als je de in- en uitgang van de interface met elkaar verbindt (loopback) en een typisch testsignaal genereert – meestal een sinus met een frequentie van 1 kHz – kun je de harmonischen in het resulterende frequentiespectrum bekijken. Helaas is het met deze opstelling niet mogelijk onderscheid te maken tussen de harmonischen die al aanwezig zijn in het signaal van de generator en de harmonischen die door de testapparatuur worden

toegevoegd (bijvoorbeeld in de A/D-omzetter).

Bij relatief hoge harmonische niveaus, zoals van een volledig uitgestuurde audio-eindtrap, is dit niet zo'n probleem omdat het duidelijk is dat het leeuwendeel van de harmonischen afkomstig is van de te testen schakeling en niet van de signaalgenerator of de testapparatuur. Wanneer men echter de vervormingskarakteristieken van een goede audioversterker wil meten, wordt het moeilijker omdat de vervorming van het te testen apparaat ongeveer even groot is als de vervorming van de testapparatuur. Om dit probleem op te lossen, is professionele audio-testapparatuur voorzien van een notchfilter vóór de ingangstrap. Dit filter verzwakt de amplitude van het testsignaal (dat wil zeggen de grondtoon) sterk. Door de frequentie van het testsignaal uit het uitgangssignaal van de te testen apparatuur te verwijderen, wordt het probleem van de harmonischen veroorzaakt door de signaalverwerkende schakelingen in de testapparatuur geëlimineerd, aangezien de testapparatuur alleen de signaalartefacten ziet die door de te testen apparatuur worden toegevoegd. Het niveau van deze artefacten is veel lager dan het niveau van de grondtoon van het testsignaal. Een notchfilter biedt nog een ander belangrijk voordeel: door een sterke verzwakking van de grondtoon van het testsignaal kan de gevoeligheid of de versterking van de testapparatuur aanzienlijk worden opgevoerd, zodat harmonischen en vervormingscomponenten met zeer geringe amplitude, die anders niet zichtbaar zouden zijn (bijvoorbeeld door de beperkte resolutie van de A/D-omzetter), toch kunnen worden gemeten. Als je de gevoeligheid van de testapparatuur met een factor 10 verhoogt met het notch-gefilterde signaal en de signaal/ruis-verhouding van de testapparatuur is iets minder dan 90 dB (typisch voor een 16-bit A/D-omzetter), dan kun je gemakkelijk harmonischen en ruis meten zo laag als -110 dB. Helemaal niet slecht.

De in professionele audio-testapparatuur ingebouwde notchfilters zijn schakelbaar, wat betekent dat de notchfrequentie kan worden



Figuur 1. De schakeling van het dubbele notchfilter bevat slechts drie opamps, maar dan wel van hoge kwaliteit.

ingesteld. Deze filters zijn gewoonlijk zo ontworpen dat de filterfrequentie automatisch de generatorfrequentie volgt, zodat gemakkelijk gevoelige metingen kunnen worden verricht bij verschillende frequenties. Zoals te verwachten zijn dergelijke filterschakelingen complex en kostbaar.

Vereisten en beperkingen

Een notchfilter dat geschikt is voor audiometingen moet idealiter het testsignaal zo veel mogelijk verzwakken (in de praktijk met meer dan 50 dB), terwijl de harmonischen onveranderd worden doorgelaten. Aangezien zelfs de tweede harmonische niet noemenswaardig mag worden verzwakt en deze slechts tweemaal de frequentie van het testsignaal heeft, moet het notchfilter een hoge Q-factor hebben. En natuurlijk moet de filterschakeling zo zijn ontworpen dat hij geen noemenswaardige eigen harmonischen of ruis genereert. Dit betekent dat je bijzonder goede opamps nodig hebt om dit soort filters te bouwen, maar op dit moment zijn die moeilijk te vinden. Om de kosten en de complexiteit van een doe-het-zelf-notchfilter binnen acceptabele grenzen te houden, heeft het hieronder beschreven notchfilter geen instelbare frequentie. Aan de andere kant heeft het een extra eigenschap die essentieel is voor gebruik met

USB-audio-interfaces, waarvan de meeste geen gekalibreerde versterkingsinstellingen hebben: het uitgangssignaal wordt intern versterkt met een factor 10 (20 dB). Dit maakt het gemakkelijk om lage vervormingscomponenten te meten.

Filterschakeling

Bij mijn weten zijn er twee geschikte implementaties voor dit doel: het Fliege-notchfilter en het state-variable filter. Ik heb gekozen voor de Fliege-versie vanwege zijn eigenschappen, en ik heb twee van die Fliege-filters in serie geschakeld om voldoende demping te verkrijgen.

Figuur 1 toont de complete schakeling. Opamp IC1A buffert het ingangssignaal, zodat de eerste Fliege-filtertrap, opgebouwd rond IC1B en IC2A, wordt aangestuurd door een laagohmige bron met gedefinieerde signaalcondities. De uitgang van de eerste filtertrap wordt via de 0Ω -weerstand R12 naar de tweede filtertrap gevoerd, die dezelfde componentwaarden heeft. IC3B versterkt het gefilterde signaal met 20 dB. Als dit niet gewenst is, kan de versterking worden gereduceerd tot 1 door R21 weg te laten en de waarde van R22 te verlagen tot 3,3 k Ω .

Berekening en afstemming

Voor hulp bij de berekeningen zijn online-instructies en software [2] beschikbaar. De Q van het filter moet worden ingesteld op 10 om een te grote verzwakking van de tweede harmonische te voorkomen. Een hogere Q zou het bepalen van de juiste componentwaarden bemoeilijken, omdat dan ook rekening moet worden gehouden met de beperkte versterkingsbandbreedte van de opamps. In ieder geval wordt de Q-factor vergroot door de serieschakeling van de twee filtertrappen.

De weerstanden R4 en R5 samen met R6 en R7 parallel (of in de tweede filtertrap R13 en R14 samen met R15 en R16 parallel) bepalen de Q van het filter. De formule voor de Q van de eerste filtertrap is

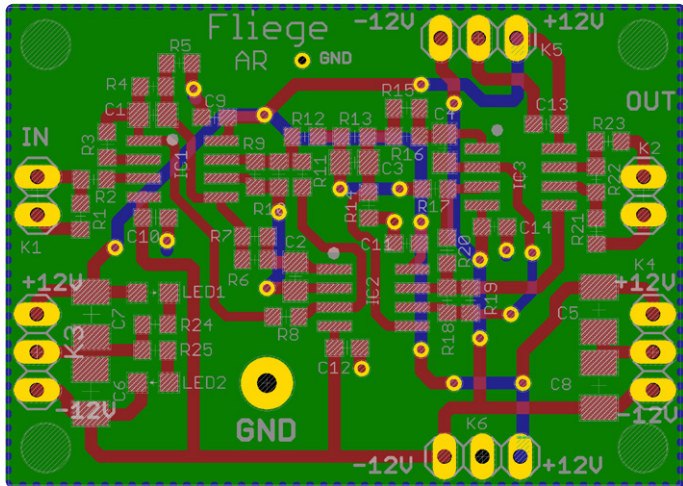
$$Q = R_4 / (2 \times R_6 || R_7)$$

met als de voorwaarde dat $R_4 = R_5$ zodat de versterking 1 is. De Q is bijna 10 omdat de waarde van $R_6 || R_7$ ongeveer 3,5 k Ω is. Condensatoren C1 en C2, alsmede $R_6 || R_7$ en $R_9 || R_{10}$, hebben dezelfde waarden en bepalen de notchfrequentie volgens de formule:

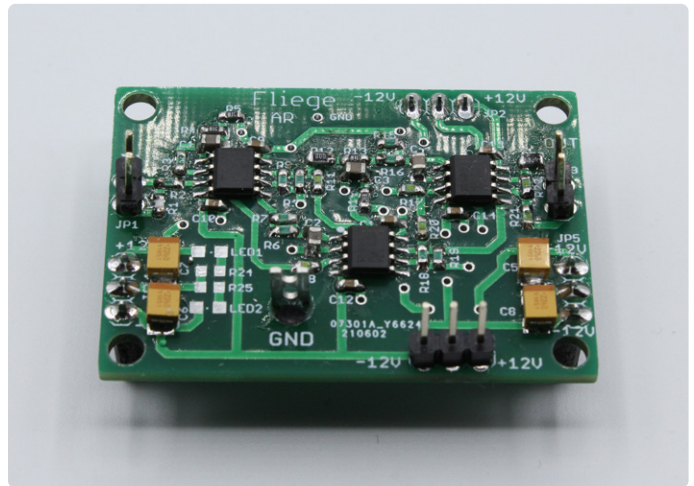
$$f = 1 / (2 \pi RC)$$

Weerstanden R8 en R11 hebben ook dezelfde waarde. De tweede filtertrap heeft dezelfde topologie als de eerste.

De condensatoren C1 tot C4 moeten zo goed mogelijk dezelfde



Figuur 2. De print is ontworpen voor SMD-componenten, maar ze zijn groot genoeg om met de hand te solderen.



Figuur 3. Het door de auteur gebouwde prototype van de filterprint.

waarde hebben, en daarom moeten zij met een geschikte LCR-meter worden nagemeten. Indien de werkelijke waarde afwijkt van de berekende waarde, kan de notchfrequentie worden bijgesteld met de parallelweerstand R6 en R10 of R15 en R19.

Bovendien moeten beide filtertrappen niet alleen op de frequentie van het testsignaal worden afgestemd, maar ook zo veel mogelijk dezelfde notchfrequentie hebben. Dit is waar R12 van pas komt: deze kan tijdelijk worden verwijderd (of in eerste instantie niet worden gemonteerd) om de beide filtertrappen onafhankelijk van elkaar te kunnen afstemmen.

Vervolgens kan het uitgangssignaal van de eerste filtertrap worden afgenomen en gemeten aan de uitgang van IC1B, en kan de eerste filtertrap met behulp van R6 en R10 op de gewenste frequentie worden ingesteld. Zodra de juiste weerstandswaarden proefondervindelijk zijn vastgesteld, kunnen deze worden gemonteerd. Vervolgens moet de tweede filtertrap worden afgeregeld. Hiertoe kan de ingang (het knooppunt van C3, R12 en R13) tijdelijk worden verbonden met de uitgang van IC1A en kan de filterfrequentie eveneens worden afgestemd met behulp van geschikte waarden voor R15 en R19. Zodra de notchfrequenties van de twee filtertrappen voldoende op elkaar zijn afgestemd, kan deze verbinding worden verwijderd en R12 worden gemonteerd. De notchfrequenties hoeven niet perfect overeen te komen.

De laatste fijnregeling met de weerstanden R15 en R19 kan worden gedaan met behulp van een audio-spanningsmeter door de generatorfrequentie licht te variëren. Een grote verzwakking van de doelfrequentie is een teken van een hoge totale Q en wijst op een goede algemene aanpassing van de notchfrequenties van de beide filtertrappen. Als alles naar tevredenheid is, worden de weerstanden R15 en R19 gemonteerd.

Print(en) en filterkwaliteit

Figuur 2 toont de print-layout voor de schakeling. De layout-bestanden in Eagle-formaat kunnen gratis worden gedownload van de projectpagina bij dit artikel [4]. **Figuur 3** toont mijn compleet opgebouwd exemplaar. Aan alle vier randen zijn headers voor de 12V-voeding voorzien. Dit maakt het gemakkelijk om filterprinten in serie te schakelen of een filter in te prikken in een passende print met spanningsregelaars om zo een compacte sandwich te verkrijgen, zoals in **figuur 4**. De gecombineerde filterprint en voedingsprint passen overigens precies in een aluminium behuizing van het type 1550Q (Hammond), zoals te zien is in **figuur 5**. De componentenopdruk op de print is omwille van de eenvoud weggelaten, maar de schema- en print-layout-bestanden in Eagle-formaat kunnen ook worden gedownload van [4]. Ik heb nog een paar 'kale' printen



ONDERDELENLIJST

Weerstand (alle SMD 0603, 1%):

R1 = 47 k
R2 = 220 Ω
R3 = 3k3
R4, R5, R13, R14 = 68 k
R6, R10 = 21k5
R7, R9, R16, R18 = 4k22
R8, R11, R17, R20, R22, R24, R25 = 10 k
R12 = 0 Ω
R15, R19 = zie tekst
R21 = 1k1
R23 = 50 Ω

Condensatoren:

C1, C2, C3, C4 = 47 n, SMD 0805
C5, C6, C7, C8 = 22 μ /20 V, elco, SMC-B
C9, C10, C11, C12, C13, C14 = 100 n, SMD 0603

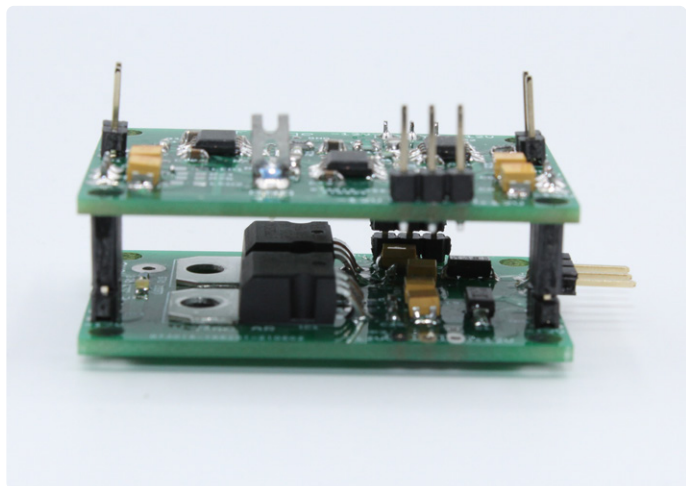
Halfgeleiders:

LED1 = LED rood, SMD 0805
LED2 = LED groen, SMD 0805
IC1...IC3 = OPA2209 AIDR, SO08

Overig:

K1, K2 = 2-polige pinheader, steek 0,1"
K3...K6 = 3-polige pinheader, steek 0,1"
Print*
Voedingsprint*
Aluminium behuizing Hammond 1550Q

* zie tekst



Figuur 4. De filterprint is hier aangesloten op een print van dezelfde afmetingen die is voorzien van spanningsregelaars.

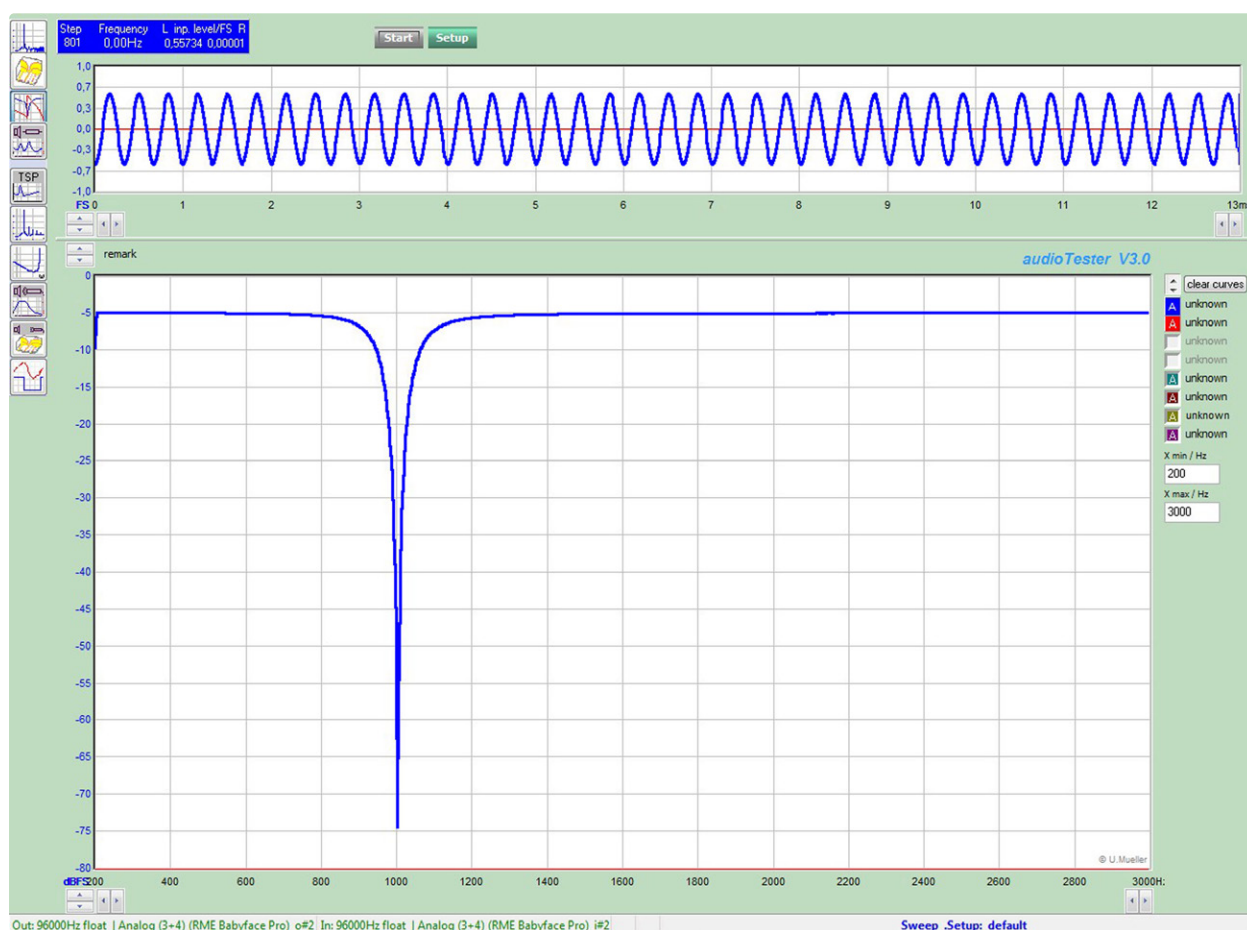


Figuur 5. De print-sandwich in een aluminium behuizing.

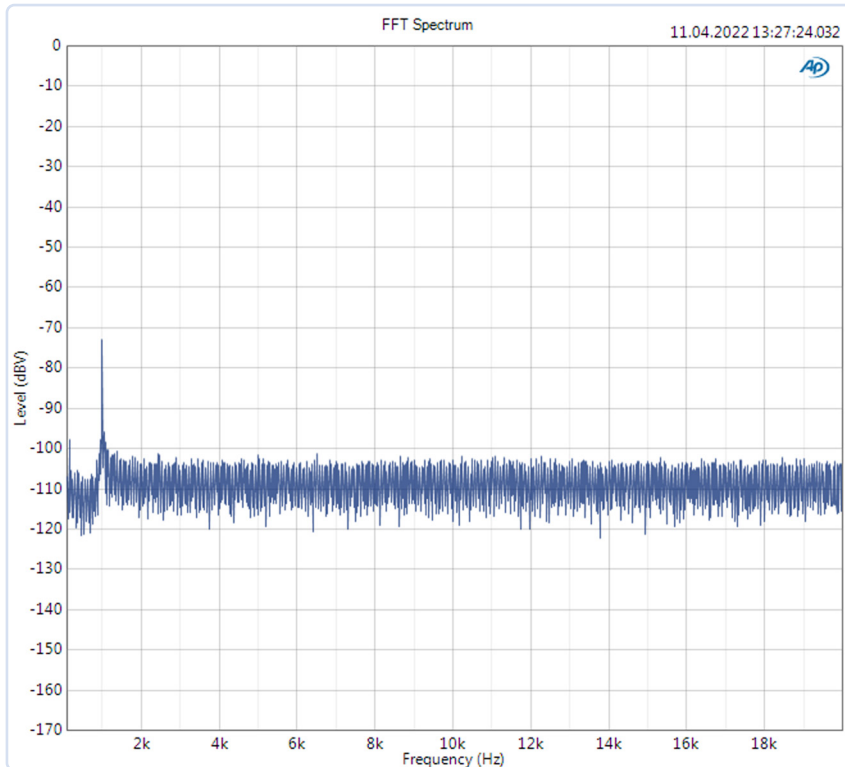
liggen, dus als je geïnteresseerd bent kun je per e-mail contact met me opnemen (zie **kader**). Het gelinkte archief bevat de bestanden voor alle schakelingen, inclusief een B-versie van de voedingsprint die ik nog niet getest heb.

Figuur 6 toont de frequentierespons van het notchfilter met de gebruikelijke middenfrequentie van 1 kHz. De verzwakking van

bijna 70 dB bij 1 kHz is behoorlijk goed voor onze doeleinden. Een spectrumplot (**figuur 7**) werd gegenereerd met een Audio Precision APx555 om de vervorming en eigen harmonischen van het notchfilter te controleren. Gezien de kosten en moeite is het resultaat – met meer dan 90 dB SNR – zeer respectabel.



Figuur 6. Frequentierespons van het dubbele Fliege-notchfilter. De demping bij de frequentie van het testsignaal bedraagt bijna 70 dB, wat werkelijk goed is.



Figuur 7. Spectrumplot van het notchfilter.
De harmonischen zijn verborgen in de ruisvloer bij -100 dB.

Gebruik

Om een beginpunt te bepalen moet je eerst met een schakelbare verzwakker het niveau van het te meten signaal (zonder het notchfilter) instellen op een bruikbaar bereik van ongeveer -5 tot -10 dBFS (decibel ten opzichte van volle schaal) van de betreffende audio-testapparatuur of USB-audio-interface, en dit niveau noteren. Sluit vervolgens het notchfilter aan vóór de ingang van het instrument. Stel de frequentie van de generator zodanig in dat het niveau van de grondtoon van dit signaal, zoals geregistreerd door het instrument of de audio-interface, zo gering mogelijk is. Meet vervolgens de niveaus van de harmonischen. De versterking van IC3B moet worden afgetrokken van de gemeten harmonische niveaus in dit spectrum. Een gemeten waarde van -80 dB wordt bijvoorbeeld met 10x versterking -100 dB. Indien het instrument of de audio-interface een gekalibreerde of kalibreerbare versterkingsinstelling heeft, kun je de totale versterking voor specifieke doeleinden verder verhogen om extreem geringe signaalniveaus te meten.

Om met het notchfilter zinvolle metingen te kunnen verrichten, moet men er rekening mee houden dat goede metingen alleen mogelijk zijn als het signaal van de generator een zo gering mogelijke vervorming en ruis heeft. In sommige gevallen kan het nodig zijn na de generator een smalbandig laagdoorlaatfilter aan te sluiten om een echt goed testsignaal te verkrijgen. ◀

210551-03

Over de auteur

Alfred Rosenkränzer werkte vele jaren als ontwikkelingsingenieur, aanvankelijk op het gebied van professionele televisieapparatuur. Sinds het eind van de jaren negentig ontwikkelt hij digitale en analoge high-speed schakelingen voor IC-testers. Audio is zijn privéhobby.

Vragen of opmerkingen?

Hebt u technische vragen of opmerkingen naar aanleiding van dit artikel? Stuur een e-mail naar de auteur via alfred_rosenkraenzer@gmx.de of naar de redactie van Elektor via redactie@elektor.com.



GERELATEERDE PRODUCTEN

- > Joy-IT JDS2915 Signal-Generator (15 MHz)
www.elektor.nl/19169
- > Elektor Audio Collection (USB Stick)
www.elektor.nl/19892
- > D. Self, Small Signal Audio Design (2nd Edition)
www.elektor.nl/18046

WEBLINKS

- [1] A. Rosenkränzer, "Goedkope audiotester", Elektor juli/augustus 2022: www.elektormagazine.nl/200604-03
- [2] Notchfilter-calculator 1: <https://earmark.net/gesr/opamp/notch.htm>
- [3] Notchfilter-calculator 2: <https://tinyurl.com/yc2wj73v>
- [4] Download print-layout: www.elektormagazine.nl/210551-03