

# Hoe goed zijn jouw oren?

## Gehoordrempelmeter voor pc

Jan Breemer (NL)

Tegenwoordig heeft bijna iedereen wel een draagbare muzikspeler (iPod, mp3-speler, etc.). Maar weinig mensen staan er echter bij stil dat deze apparaatjes een behoorlijke aanslag op ons gehoor kunnen zijn.

Om te controleren hoe het met uw oren gesteld is, hebben we de hier gepresenteerde gehoordrempelmeter ontworpen.

De hard- en software die we hier presenteren, is bedoeld om eenvoudig het gehoor te kunnen testen. De gehoordrempel kan vastgesteld worden en er kan een A-B-X-test [1] gedaan worden om bijvoorbeeld het verschil in geluidskwaliteit van een .MP3- en een .WAV bestand vast te stellen. Met toekomstige uitbreidingen van de software (die eenvoudig zelf te schrijven zijn) kun je daarnaast nog allerlei andere tests doen om meer begrip te krijgen over hoe onze oren werken en wat je wel of niet kunt horen.

De procedure voor het meten van de gehoordrempel is eigenlijk erg eenvoud-

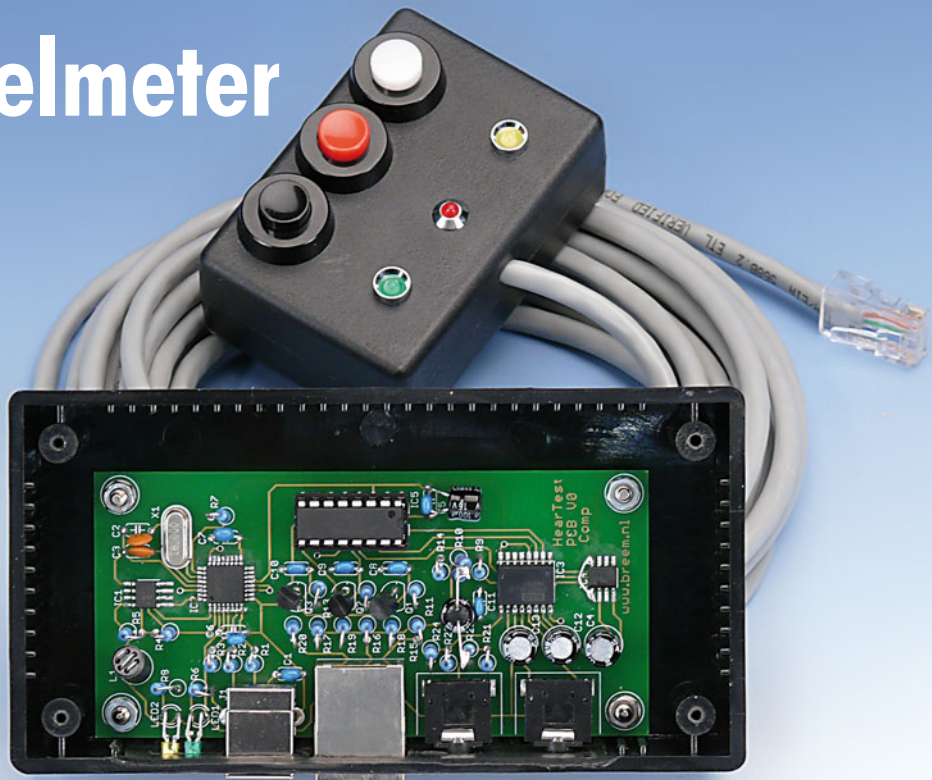
dig: Het systeem produceert zuivere toontjes van diverse frequenties (door pc of laptop gegenereerd) en sterktes (door verzwakkerkastje bepaald); met een LED wordt aangegeven dat er een toon wordt weergegeven en met drukknoppen kun je aangeven of je het geluid wel of niet gehoord hebt. Zo wordt er gezocht naar het zachtste geluid dat je nog net kunt waarnemen. Het resultaat wordt weergegeven in een grafiek en het gehele proces kan worden gelogd in een logbestand. In het programma kunnen de laagste en hoogste testfrequentie en het aantal frequenties daartussen inge-

steld worden. De frequentieschaal is logaritmisch.

### Kalibratie

Voor enigszins nauwkeurige metingen zijn er twee kalibraties nodig. Ten eerste de relatie tussen de digitaal aangeboden getalswaarden en de elektrische spanning die de geluidskaart levert, ten tweede de gevoeligheid van de gebruikte hoofdtelefoon.

Voor die eerste is er een automatische procedure. De microprocessor in het stuurkastje heeft een A/D-converter aan boord waarmee het ingangssig-



De hier aangereikte middelen zijn educatief bedoeld en geven slechts grove indicaties. Bij een vermoeden van gehoorproblemen dient men zich altijd tot de huisarts en / of specialisten op dit gebied te wenden.

## Over het gehoor

Bij het meten van geluid en hoe ons oor daarop reageert, zijn de belangrijkste begrippen het geluidsdruk niveau (Sound Pressure Level, SPL) en de luidheid (Loudness). SPL is een objectieve natuurkundige

de geluidsdruk (SPL) aan die nodig is om een bepaalde luidheid in Foon of Soon te krijgen (de Soon is een wat verouderde, niet-logaritmische eenheid). Om bijvoorbeeld een luidheid van 40 Foon te ervaren is bij 1 kHz een geluidsdruk van 40 dB nodig. Bij 20 Hz is hiervoor echter iets meer dan 90 dB nodig.

Druk (Pascal)	Snelheid (m/s)	Intensiteit (W/m <sup>2</sup> )	SPL (dB)	Opmerking
200	$5 \times 10^{-1}$	100	140	geweerschot op 1 m, boven de pijngrens
20	$5 \times 10^{-2}$	1	120	gehoorschade bij kortdurende blootstelling
2	$5 \times 10^{-3}$	$10^{-2}$	100	drilboor op 1 m afstand
$2 \times 10^{-1}$	$5 \times 10^{-4}$	$10^{-4}$	80	snelweg op 10 m afstand
$2 \times 10^{-2}$	$5 \times 10^{-5}$	$10^{-6}$	60	Tv op 1 m afstand
$2 \times 10^{-3}$	$5 \times 10^{-6}$	$10^{-8}$	40	rustig gesprek op 1 m afstand
$2 \times 10^{-4}$	$5 \times 10^{-7}$	$10^{-10}$	20	stille kamer
$2 \times 10^{-5}$	$5 \times 10^{-8}$	$10^{-12}$	0	de gehoordrempel

grootheid die aangeeft welke akoestische vermogensdichtheid er met een bepaald geluid geassocieerd wordt. Het wordt meestal opgegeven in dB waarbij 0 dB overeenkomt met een geluidsdruk van 20 micropascal. Dat is ongeveer het zachtste geluid dat het menselijk gehoor nog kan waarnemen bij 2 – 4 kHz. (1 Pascal = 1 Newton/m<sup>2</sup>).

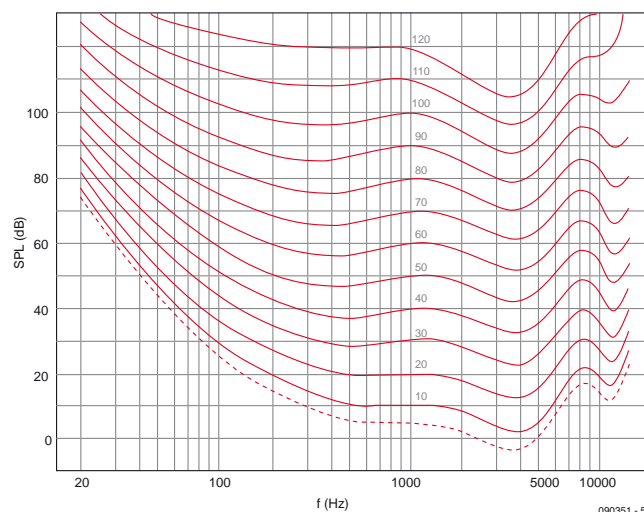
De verhouding tussen SPL en de feitelijke geluidsdruk in Pascal is kwadratisch. Er is nog een factor in het spel, namelijk de snelheid waarmee de luchtdeeltjes bewegen ten gevolge van de drukverschillen. De akoestische vermogensdichtheid is het product van die druk en die snelheid. De snelheid is evenredig met de feitelijke geluidsdruk, omdat de verhouding daartussen, de Akoestische Impedantie, constant is voor lucht van atmosferische druk. Geluidsdruk, snelheid en SPL worden altijd opgegeven als RMS-waarden.

In de tabel zijn de onderlinge verhoudingen weergegeven.

Luidheid is de subjectieve beleving van de sterkte van een geluid. Die beleving is nogal afhankelijk van de frequentie van het geluid. Het verband tussen SPL en luidheid als functie van de frequentie wordt voor het menselijk gehoor gegeven door de Fletcher-Munson-grafieken (zie figuur). Deze grafieken zijn ontstaan door metingen aan zeer veel proefpersonen. Uit deze grafieken is af te lezen dat bij frequenties die afwijken van 1 kHz de subjectieve geluidsbeleving behoorlijk kan afwijken. Vooral bij lagere frequenties neemt de gevoeligheid snel af en nog sterker bij lagere geluidsniveaus.

De onderste lijn van de Fletcher-Munson krommes geeft de gehoordrempel aan. Dat is het laagste geluidsniveau dat nog net gehoord kan worden in een extreem stille omgeving. De golvende lijnen geven

Bij het onderzoeken van gehoorproblemen wordt er vooral gekeken naar de gehoordrempel. Een verhoging in bepaalde frequentiegebieden is een indicatie van min-of-meer serieuze gehoorschade. Audiologen zullen vooral kijken naar gehoorverlies bij frequenties die belangrijk zijn voor het verstaan van spraak, omdat dat de meest verstaande sociale consequenties heeft. Dat is het frequentiegebied van ongeveer 200 tot 8000 Hz.



naal gemeten kan worden. De software beschikt over een kalibratieprocedure waarmee de relatie tussen getallen en spanning vastgelegd wordt. Daarbij geeft de geluidskaart gedurende 1 s een toon van 3 kHz en een bepaalde amplitude. De piek-piek waarde wordt gemeten met de A/D-converter. Hieruit wordt vastgesteld hoeveel uitsturing er nodig is om een signaal van  $1 V_{RMS}$  te genereren.

De kalibratie van de gevoeligheid van de hoofdtelefoon is wat gecompliceerder. Er zijn hierbij een aantal mogelijkheden:

- Het programma biedt de mogelijkheid gegevens van een frequentie karakteristiek in dB/V te gebruiken voor de kalibratie.

- Wanneer alleen een gevoeligheid in dB/mW is opgegeven, zul je moeten vertrouwen op de frequentielineariteit van de hoofdtelefoon. Hierbij is ook de impedantie van de hoofdtelefoon nodig (zie voor het uitrekenen [2]). Bij een opgave in dB/V is de impedantie niet van belang.

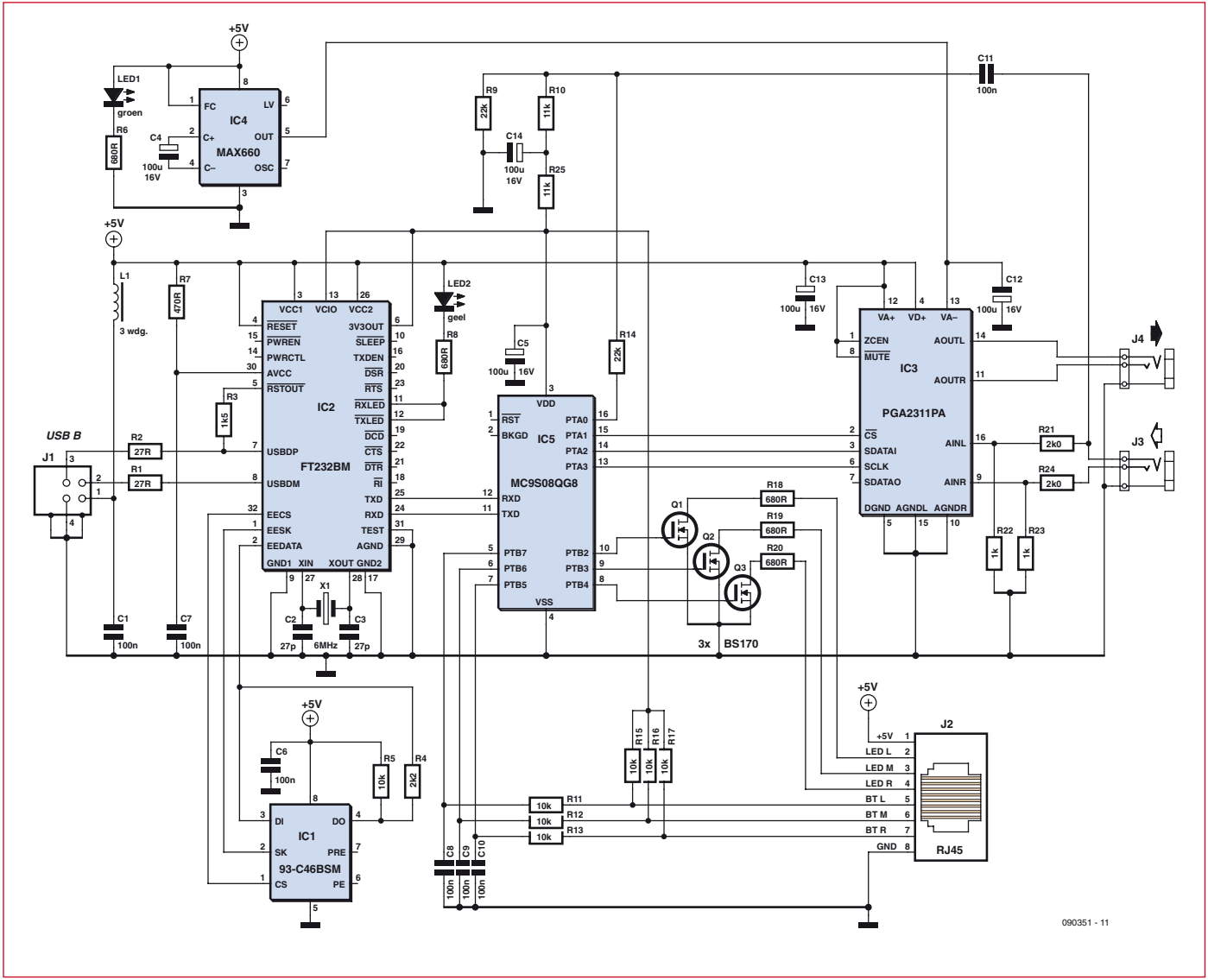
### Hoe werkt het?

In dit ontwerp worden de toontjes zoals gezegd geproduceerd door de geluidshardware van een pc of laptop. Een hoofdtelefoon en een stille ruimte zijn twee verdere vereisten. Het verzwakkerkastje is in dit project het gedeelte dat zelf gebouwd moet worden.

De verzwakkerunit is een recht-toe-

recht-aan ontwerp (zie **figuur 1**). De feitelijke verzwakker is de PGA2311 van Texas Instruments. Deze wordt aangestuurd door een Freescale microprocessor van een type zoals beschreven in het Spyder-project in Elektor maart 2007. De interface met de pc loopt via een FT232-chip. De voeding wordt uit de USB-poort betrokken.

Even tussen haakjes: Er is gekozen voor de opzet met een verzwakker, omdat deze een grotere flexibiliteit en een groter regelbereik biedt. Bovendien, als je bij bijv. A-B-X-testen met bestaande muziekfragmenten gaat werken, wordt het ondoenlijk om het volume goed onder controle te krijgen, zeker niet als er ook links/rechts verschillen geïntroduceerd moeten worden. En het direct aansturen van dri-



Figuur 1. In het schema herkennen we een aantal 'oude bekenden': de processor uit de Spyder kit, een FT232 USB-serieel-omzetter en de PGA2311 die ook in de Audio Link (april 2004) ingezet werd.

vers voor al die verschillende geluidskaarten en kastjes is niet praktisch.

**Het schema**

In het midden van het schema vinden we de microcontroller die verantwoordelijk is voor de besturing IC3, de communicatie met pc/laptop via IC2, de aansturing van de LED's en het monitoren van de drukknoppen. Via C11 wordt het onverzwakte audiosignaal aangeboden aan een analoge ingang van de microprocessor (nodig bij de kalibratie). De DC-waarde van deze ingang wordt met R9 en R10/R25 op de helft van de voedingsspanning van 3,3 V gehouden. Serieweerstand R14 voorkomt dat de IC-ingang overstuurd wordt als het signaal groter dan 3,3  $V_{pp}$  zou worden. Rechts van de controller vinden we

de verzwakker voor het audio signaal, IC3. Het bereik loopt van -95,5 dB tot +31,5 dB, in stappen van 0,5 dB. Het ingangssignaal is reeds 10 dB verzwakt (met R21...R24), zodat het bereik bij -105 dB begint (en tot +21,5 dB loopt). IC2 verzorgt de communicatie via USB. Dit is een USB-naar-serieel converter. In combinatie met een geschikte driver kan een pc-programma zo met de verzwakker-unit communiceren als ware het via een seriële poort. Voor de VID-, PID- en USB-configuratie maakt het IC gebruik van een klein EEPROM-IC, IC1. R1 en R2 zorgen voor de juiste impedantie van de USB-sigtaalverbinding. R3 is een pull-up die de USB-host duidelijk maakt welke USB-variant er gebruikt wordt (hier versie 2.0, full speed). R4 en R5 zijn pull-ups voor de bidirectionele dataverbinding met de EEPROM.

De LED's in het schakelkastje worden aangestuurd via een drietal MOSFET's, T1...T3. Het precieze type is niet zo heel belangrijk. De stroom door de LED's wordt bepaald door R18...R20. Gebruik LED's met een hoge lichtopbrengst en neem de weerstanden indien mogelijk nog wat groter. Uit de USB-aansluiting kunnen we maar maximaal 100 mA halen. De drukknopsignalen komen via filtertjes R11...R13/C8...C10 binnen. Hierbij zijn R15...R17 als pull/ups geschakeld. De negatieve voedingsspanning die IC3 nodig heeft, wordt gegenereerd door IC4. Verder zijn er de nodige ontkopelcondensatoren gebruikt. L1 vormt samen met C1, C6 en C13 een filter, om HF-storing buiten c.q. binnen te houden. D1 geeft de aanwezigheid van de voedingsspanning aan, terwijl D2 aangeeft of er communicatie plaatsvindt.

De opbouw is niet heel moeilijk. De meeste componenten zijn through-hole types. Begin met de kleinste componenten, in dit geval de SMD-IC's en eindig met de grootste. Het meest lastig zal IC2 zijn. Hier werkt de bekende 'leg een klont soldeertin op de soldeereilandjes, soldeer het IC en haal het teveel aan tin weg met desoldeerlint'-techniek prima.

De printlay-out (te downloaden van [3]) is zo ontworpen, dat alle connectors aan één kant zitten. Zo kan de print gemakkelijk in een kastje gemonteerd worden. Als je zeker weet dat je tussen de pc of laptop en de stille ruimte niet meer dan 5 m USB-kabel nodig hebt, kun je de LED's en drukknoppen in datzelfde kastje monteren. De RJ45-connector komt dan te vervallen. Als er meer dan 5 m nodig is, moeten de LED's en drukknoppen in een apart kastje gemonteerd worden, dat met een Cat5-kabel en een RJ45-8-stecker aangesloten wordt op de verzwakkerunit. Deze kabel mag net als de hoofdtelefoonkabel zonder problemen enkele tientallen meters lang zijn.

### Soft- en hardware

De firmware voor de HCS09-microcontroller handelt naast de seriële communicatie ook het instellen van de LED's en het afvragen van de drukknoppen af. Programmeren van de controller is eenvoudig met de USB-Spyder stick en de bijbehorende ontwikkelsoftware [4].

De pc-software, te downloaden van [3], hoeft niet geïnstalleerd te worden. Pak de bestanden op de computer uit in een geschikte map, bijvoorbeeld C:\Program Files\Gehoortest\. Het is wel nodig dat de Visual Basic 6 Run-time-omgeving geïnstalleerd is (te downloaden van [5]).

De gehoordrempelmeter maakt gebruik van een virtuele COM-poort via USB. Om dit te laten werken, moet er op de pc een driver voor een virtuele USB-COM-poort geïnstalleerd zijn. De op [6] te vinden driver is door de auteur getest en werkt goed.

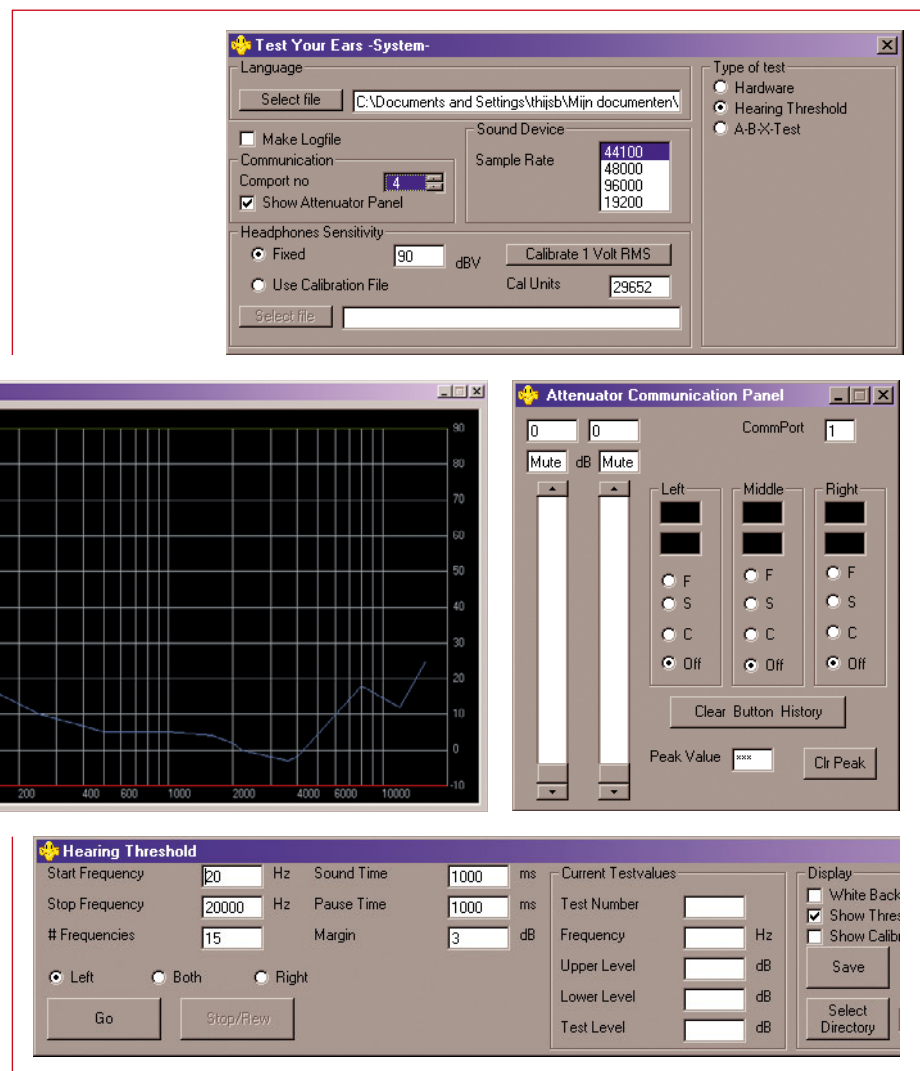
In principe is iedere geluidskaart



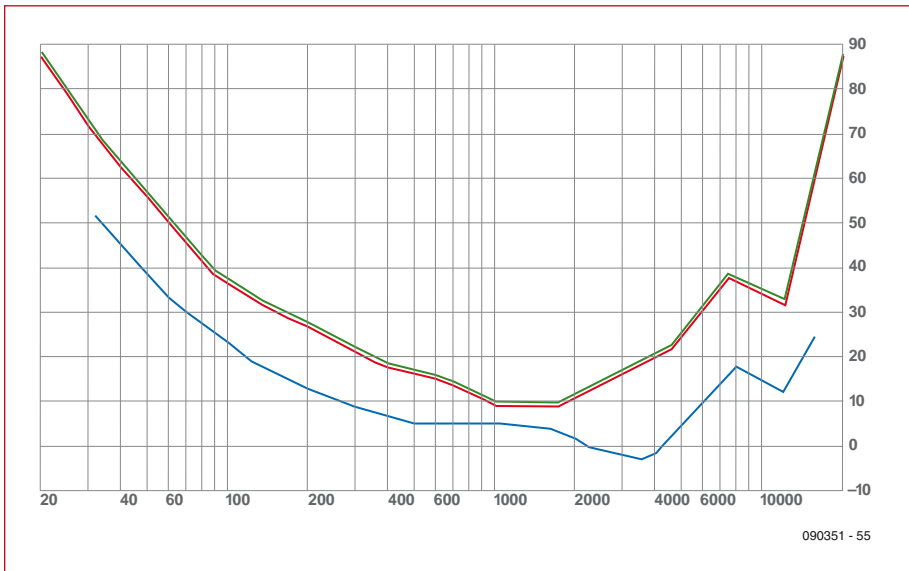
Figuur 2. De verzwakker-unit. V.l.n.r. de gele LED geeft pc-communicatie aan, de groene LED geeft de voedingsspanning aan, daarnaast vinden we de USB-aansluiting en de RJ45-aansluiting voor het drukknoppenkastje, dan komt de signaalgang en helemaal rechts ten slotte zit de aansluiting voor de hoofdtelefoon.

bruikbaar. Sluit de verzwakkerunit aan op de lijnuitgang of de hoofdtelefoonaansluiting. Gebruik geen uitgang die bedoeld is om luidsprekers aan te sturen. Zet verder alle toeters en belten van de geluidskaart uit. Dus geen (pseudo-) multikanaal, bass-boost, echo- of galmeffecten, etc. Het volume

dient op maximum te staan. Zet andere programma's die de geluidskaart (mogelijk) gebruiken uit. De ideale hoofdtelefoon voor gehoor-metingen is een gesloten type dat de oorschelp geheel omvat. Helaas worden kwalitatief goede gesloten hoofdtelefoons voornamelijk voor de



Figuur 3. Het programma bestaat uit een hoofdvenster ('Systeem') en een aantal subvensters, afhankelijk van het soort test.



Figuur 4. Het resultaat geeft een duidelijk overzicht van de gehoordrempelcurve. De blauwe lijn is de normale gehoordrempel voor jonge, gezonde oren, gemeten in een volstrekt stille ruimte.

professionele markt gemaakt en zal er een bijpassend prijskaartje aan hangen. Zeer laag-ohmige hoofdtelefoons (<300 Ohm) zijn overigens niet bruikbaar.

### Werkwijze

We gaan beginnen met de gehoordrempelmeting. Sluit de verzwakkerunit op de pc aan met een USB-kabel en sluit de audio-ingang aan op de lijnuitgang van de geluidskaart (zie **figuur 2**). Als het goed is, vindt de computer nu een USB Serial Port. Kijk via het Apparaatbeheer (in WinXP: Start -> Configuratiescherm -> Systeem -> tab Hardware -> Apparaatbeheer) welk COM-poortnummer de unit gekregen heeft. Start nu het programma (TestYourEars.exe) en kies de gewenste taal (zie **figuur 3**). Geef vervolgens in het hoofdvenster van het programma het juiste COM-poortnummer aan en vink aan of uit of je in de toekomst het verzwakkerpaneel wilt blijven zien. Meestal is dat niet nodig. Geef aan of je voor de kalibratie van de hoofdtelefoon een enkel vast getal wilt gebruiken of dat je een kalibratiebestand hebt. Laat het programma nu kalibreren op 1V<sub>RMS</sub>. In het vakje 'Kal. eenheden' is de piekgetalswaarde te zien die nodig is voor 1 V<sub>RMS</sub> aan de uitgang van de geluidskaart. Verwacht hier een getal tussen ongeveer 10000 en 32000. Kies nu de gehoordrempeltest. Pas eventueel de instellingen aan in het gehoordrempelvenster en klik op *Begin* om de test te starten. Neem nu met het

knoppenkastje plaats in een zeer stille ruimte - een volle klerenkast is zeer geschikt - en zet de hoofdtelefoon op. De (middelste) rode LED licht op wanneer er een toon wordt weergegeven via de hoofdtelefoon. Als je niet zeker weet of je de toon gehoord hebt of er was net een ander geluid dat stoorde, dan kun je met de middelste knop de toon nogmaals met dezelfde sterkte weer laten geven. De linker en rechter LED's geven aan dat je één van de bijbehorende knoppen moet indrukken. Met de linker drukknop geef je aan dat je de toon hebt gehoord. Wanneer je de toon niet gehoord hebt, druk je op de rechter knop. Daarna wordt diezelfde toon opnieuw weergegeven, maar nu luider als je hem niet gehoord hebt of zwakker als je hem wel hoorde. Als het sterkteverschil kleiner is geworden dan de ingestelde 'Marge', volgt dezelfde procedure met een volgende, hogere frequentie. Het systeem gaat zo interactief op zoek naar het laagste niveau waarop je een frequentie kunt horen en schakelt dan over naar de volgende frequentie. De resultaten worden direct weergegeven in een grafiek op het scherm. Als de test klaar is, knippert de rode LED snel en kan het resultaat bekeken worden op het scherm. De groene lijn geeft het laagste niveau dat nog net gehoord werd en de rode lijn het hoogste niveau dat net niet meer te horen was. De resultaten kunnen worden opgeslagen als bitmap of als een kommagescheiden tekstbestand. In het vak

'Weergave' kunnen enkele zaken m.b.t. de grafische weergave ingesteld worden. Een witte achtergrond is meestal prettiger als je de grafiek wilt printen. 'Toon drempel' laat de standaard menselijke gehoordrempel zien. 'Toon Kalibratie' laat de kalibratiecurve van de hoofdtelefoon zien, indien gebruikt.

### Uitbreidingen

Het programma wijst zich verder eigenlijk vanzelf. In eerste instantie kun je de gehoordrempel bepalen als functie van de frequentie. Dat is het belangrijkste criterium als je op zoek bent naar gehoorschade door discobezoek of het gebruik van iPod's en dergelijke. Deze hardware biedt echter veel meer mogelijkheden. Met uitbreidingen van de pc-software kun je maskeringen gaan onderzoeken, bijvoorbeeld:

- Pure harmonischen; hoeveel % harmonische vervorming kun je nog waarnemen?
- Nabije frequenties; hoe zwak moet een toon die vlakbij een andere ligt, zijn om hem niet meer te horen?
- Frequenties veraf; hoe zwak moet een toon met een duidelijk andere frequentie zijn om hem niet meer te horen?
- Ruis; hoe sterk moet een toon zijn om hem nog net boven een witte ruis te kunnen waarnemen? De ruis kan ook smalbandig zijn, bijvoorbeeld octaaf-ruis, quintruïis of tertsruiis. De toon kan binnen of buiten de ruisband liggen. Al deze testen kunnen met één oor of met twee oren gedaan worden.

De hardware laat het ook toe om A-B-X-testen te doen met bijvoorbeeld muziekfragmenten. Zo zou je een programma kunnen maken waarmee muziekfragmenten voorzien kunnen worden van een bepaalde hoeveelheid vervorming, zodat je kunt testen hoeveel vervorming je nog kunt waarnemen bij wat voor soort muziek. De interfacegegevens zijn te vinden op de website van de auteur [2].

(090351)

### Links:

- [1] [http://en.wikipedia.org/wiki/ABX\\_test](http://en.wikipedia.org/wiki/ABX_test)
- [2] <http://www.breem.nl/TyE>
- [3] [www.elektor.nl/090351](http://www.elektor.nl/090351)
- [4] [www.elektor.nl/shop](http://www.elektor.nl/shop), gebruik de zoekterm 'spyder' of '060296-91'
- [5] <http://support.microsoft.com/kb/290887>
- [6] <http://www.ftdichip.com/Drivers/VCP.htm>