

De werking van een passief scheidingsfilter is sterk afhankelijk van het impedantieverloop van de erop aangesloten luidspreker-units. Vaak is het noodzakelijk om die nogal wispelturige impedantie van een driver te compenseren om zo een konstant ohms gedrag over een bepaald frekwentiebereik te verkrijgen.

Harry Baggen

Impedantiekorrektie

met een bijdrage
van M. van de Gevel

De wijdverbreide elektrodynamische luidspreker is door zijn opbouw helaas niet geschikt om het hele audiobereik in zijn eentje goed weer te geven. In een hifi-systeem zitten gewoonlijk dan ook 2, 3, 4 of zelfs nog meer drivers met allemaal andere konus-(of dome-)diameters. Om er voor te zorgen dat iedere driver alleen dat frekwentiebereik krijgt toebedeeld dat hij goed kan verwerken, is een scheidingsfilter nodig (zoals elke luidspreker-hobbyist wel weet). Bij een actief scheidingsfilter is het elektrische (ingangs)gedrag van de luidsprekers niet zo belangrijk. Of er nu een weerstand van $6\ \Omega$ aan de uitgang van de eindtrap hangt, een weerstand van $15\ \Omega$ of een (enigszins) complexe belasting, de versterker blijft de korrekte spanning aanbieden. Zo'n actief filter is rond een paar opamps vóór de eindversterker opgezet en op die wijze geïsoleerd ten opzichte van de luidspreker. Nu zijn er slechts weinigen die zich een actief luidsprekersysteem kunnen veroorloven; in de meeste gevallen zal het scheidingsfilter bestaan uit een aantal spoelen en condensatoren die direkt voor de luidsprekers zijn geschakeld. De werking van een passief scheidingsfilter staat of valt echter met de afsluit-impedantie van iedere filtersektie. U kunt wel de componentenwaarden berekenen voor een derde-orde Butterworth-filter, maar dat werkt alleen goed als aan de uitgang de weerstand hangt waarvoor u dat specifieke filter gedimensioneerd heeft. Een luidspreker is

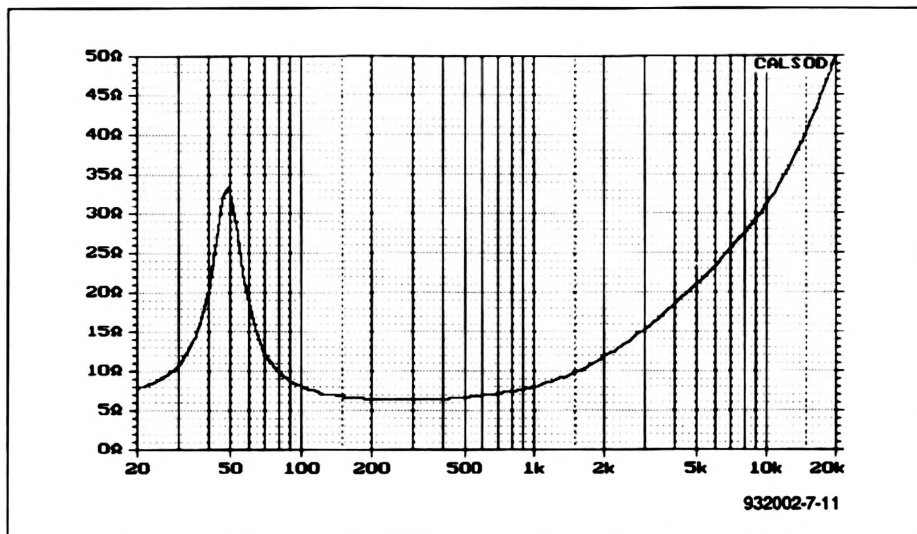


echter nogal variabel wat zijn elektrische gedrag betreft. We hebben u dit in de vorige specials al verschillende keren laten zien, maar we vertellen het hier nog maar eens. Enerzijds omdat LS-special 1 (met daarin een artikel over impedantiekorrektie) al geruime tijd uitverkocht is, en anderzijds omdat dit onderwerp hier weer aktueel is i.v.m. het verhaal in deze special over tijdvertragingen.

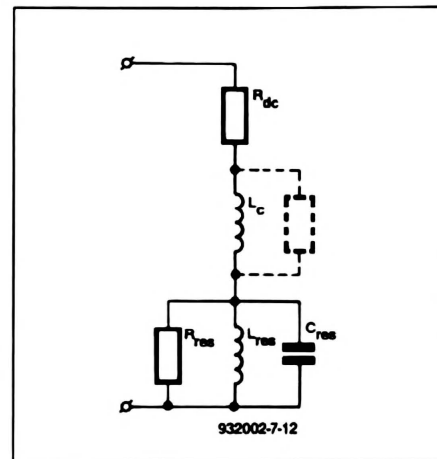
Grillig gedrag

In figuur 1 is de impedantiekarakteristiek van een 25-cm-konusluidspreker afgebeeld. Dit is de curve zoals die gemeten is aan de luidspreker met behulp van een konstante meetstroom. De weerstandswaarde is hier bepaald niet konstant, maar varieert behoorlijk tussen circa $6\ \Omega$ en $50\ \Omega$.

Onderin de curve zit de zogenaamde resonantiepiek. Deze verhoging ontstaat door de resonantiefrekwentie van de luidspreker. De konus vormt samen met de ophanging een massaveer-systeem dat op een bepaalde frekwentie gemakkelijk in trilling gebracht kan worden en dan weinig energie opneemt. Dat gedrag wordt teruggetransformeerd naar de elektrische kant van de luidspreker als een LC-kring en in de impedantiecurve zien we dat als een piek terug. Het oplopen bij hogere frekwenties wordt veroorzaakt door de spreekspoel zelf. Deze heeft namelijk een inwendige weerstand en een zelfinduktie. Beide staan in serie en dat heeft tot gevolg dat de impedantie bij hogere frekwenties door die zelfinduktie stijgt. Iedere luidspreker heeft in meer of mindere mate te maken met deze ver-



Figuur 1. De impedantië karakteristiek van een woofer. De resonantiefrequentie van de luidspreker (+ kast) veroorzaakt de piek in het laag. Het oplopen bij hogere frequenties wordt veroorzaakt door de spreekspoel-inductie.



Figuur 2. Het vervangingsschema dat nodig is om de impedantiëcurve te kunnen compenseren. Dit is dus wat de versterker (of het scheidingsfilter) aan zijn uitgang ziet hangen.

schijnselen. Woofers en middentoners hebben er het meeste last van; tweeters blijven vlakker lopen en hoeven vaak dan ook niet gecorrigeerd te worden. Bij de grotere konusluidsprekers kan de zelfinductie van de spreekspoel soms wel 1 mH bedragen. Als je daarvoor een spoel zet om een laagdoorlaatfilter te maken, dan begrijpt u wel dat die spoel zijn werking niet goed kan verrichten. Bij tweeters ligt de zelfinductie meestal op zo'n 50 tot 100 μ H.

De plaats, de vorm en de grootte van de resonantiepiek hangen af van de behuizing waarin de luidspreker is geplaatst, de grootte van het magneetsysteem en eventuele extra maatregelen, zoals de aanwezigheid van ferrofluid in de luchtspleet bij tweeters.

Wie zelf een scheidingsfilter wil berekenen, moet eerst de nodige metingen verrichten aan de luidsprekers voordat een filter ontworpen kan worden. Naast de frequentie karakteristiek van iedere unit moet dus ook de impedantie gemeten worden om er achter te komen of, en zo ja hoe, deze gecorrigeerd moet worden. Met de huidige luidspreker-simulatie- en -optimalisatieprogramma's kan overigens het filter worden aangepast aan het impedantiegedrag van een luidspreker, maar ook daarbij ontkomt men vaak niet aan compensatiemaatregelen.

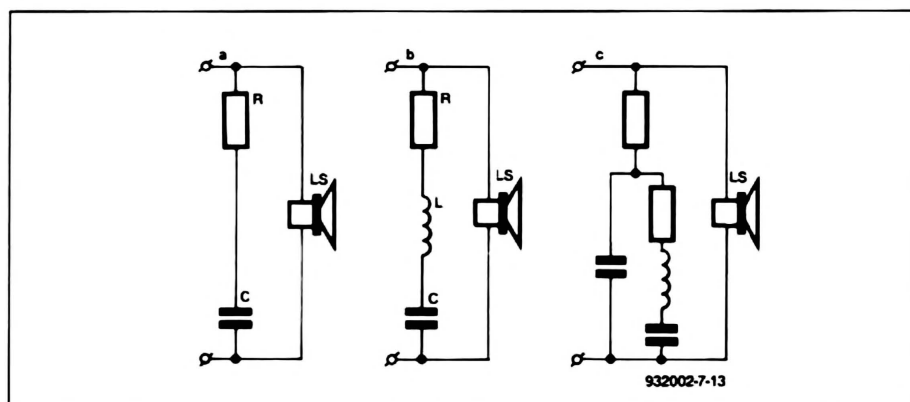
Om nu te weten hoe de impedantie gecorrigeerd moet worden, moeten we eerst een elektrisch vervangingsschema hebben voor de luidspreker.

Daar kan dan van afgeleid worden hoe we moeten corrigeren. In figuur 2 is een eenvoudig vervangingsschema getekend dat de curve van figuur 1 heel goed benadert. Bovenaan zien we R_{dc} , de gelijkstroomweerstand van de spreekspoel. Deze kan eenvoudig met een ohmmeter worden vastgesteld. Vervolgens komen we bij L_c , de zelfinductie van de spreekspoel. De luidsprekerfabrikant geeft hier vaak een waarde voor op die ons al heel aardig in de goede richting helpt. Aangezien het elektrische vervangingsschema van de spreekspoel iets ingewikkelder is dan de serieschakeling van een weerstand en een spoel, kan het vooral bij konusluidsprekers van voordeel zijn om het inductieve gedrag bij hogere frequenties iets te corrigeren door parallel aan die spoel nog een weerstand te zetten; zo wordt de curve in het hoog een stuk nauwkeuriger nagebootst.

De weerstand is in het schema gestippeld getekend.

De onderste drie componenten L_{res} , C_{res} en R_{res} dienen (u had het al geraden) voor het nabootsen van de resonantiepiek in de curve. De grootte van L en C bepaalt de resonantiefrequentie, de verhouding tussen L en C is verantwoordelijk voor de breedte van de piek en R bepaalt de hoogte ervan.

Nu we weten hoe de elektrische kant van de luidspreker er (ongeveer) uit ziet, kunnen ook maatregelen worden genomen om dit te compenseren. De compensatie van de spreekspoel-zelfinductie is (grotendeels) mogelijk door parallel hieraan een condensator te schakelen. Om hierbij de gelijkstroomweerstand van de speaker niet om zeep te helpen, moet in serie met deze condensator nog een weerstand worden geschakeld. Dit netwerkje is getekend in fi-



Figuur 3. De compensatiemaatregelen: a) RC-netwerk ter correctie van de spreekspoel-inductie, b) RLC-kring voor het wegwerken van de piek rond de resonantiefrequentie, c) combinatie van beide netwerken.

guur 3a. De resonantiepiek in de impedantiecurve (de RLC-parallelschakeling in figuur 2) kan worden gecompenseerd door zijn tegenhanger, een RLC-seriekring. Dat is weergegeven in figuur 3b. Zo kan de impedantie van een luidspreker over het hele audiogebied praktisch ohms worden gemaakt. In figuur 4 ziet u achtereenvolgens wat er gebeurt als een RC-netwerk en daarna ook nog eens een RLC-netwerk parallel aan de driver worden geschakeld.

Eventueel kan men met een extra RLC-netwerk ook nog de tweede resonantiepiek compenseren die ontstaat bij een basreflex-systeem. Die frekwentie ligt gewoonlijk zo laag (tussen 10 en 50 Hz) dat het meestal niet nodig is om deze te compenseren. Het kantelpunt van het voor de woofer geschakelde filter ligt normaliter veel hoger en het filter ondervindt daar dan nauwelijks hinder van.

Wilt u de impedantie van een luidspreker geheel corrigeren, dan kunnen de schema's van 3a en 3b nog gekombineerd worden tot de schakeling zoals die in figuur 3c getekend is. Hierbij worden de weerstanden van de twee netwerken deels gekombineerd. Het aantal componenten blijft echter even groot als bij de afzonderlijke korrektienetwerken.

Even rekenen

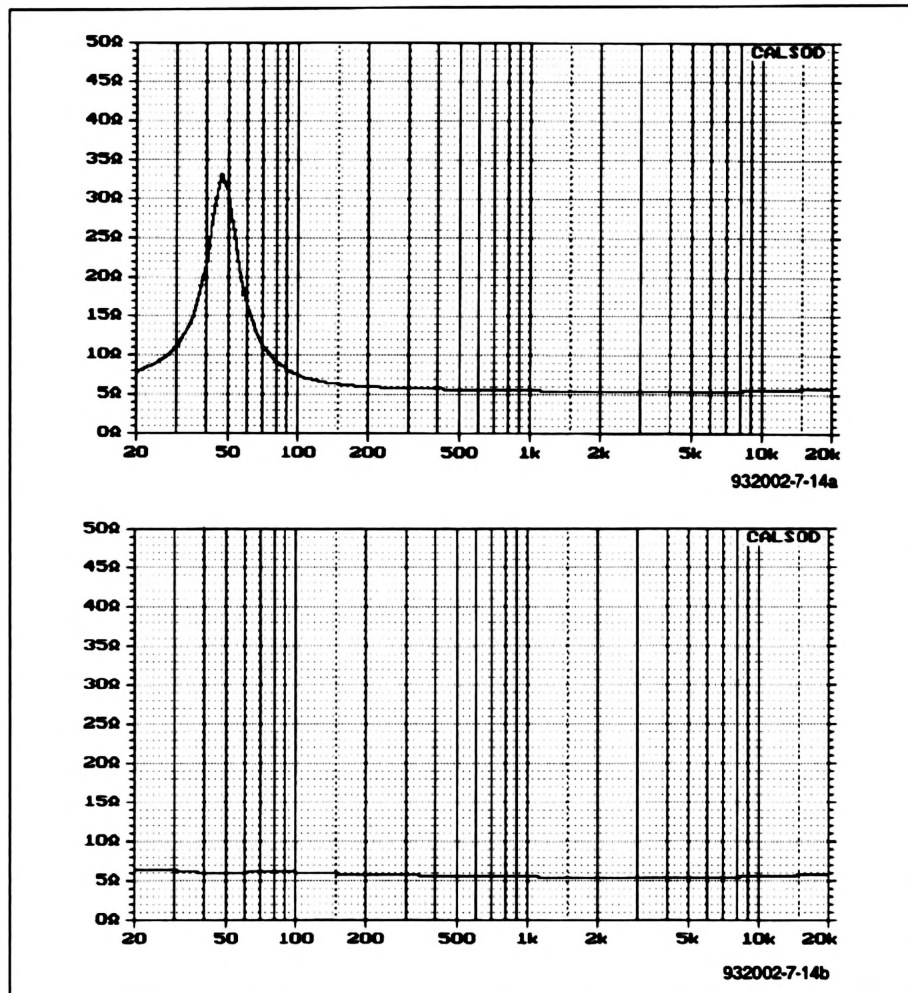
De berekening van de compensatienetwerken is niet moeilijk als u eenmaal de impedantiecurve van de (ingebouwde) luidspreker heeft. Eerst wordt met een goede ohmmeter de gelijkstroomweerstand R_{dc} gemeten. Bij gebrek aan een ohmmeter kunt u hiervoor de minimale weerstandswaarde van de impedantiecurve minus 5 à 10 % nemen, dat komt ook heel goed in de buurt. Het maximum van de resonantiepiek heeft een waarde Z_{res} , de frekwentie waarbij deze optreedt is f_{res} . De resonantiepiek zelf heeft dan een hoogte van:

$$Z_{max} = Z_{res} - R_{dc}$$

Bereken vervolgens de -3-dB-impedantiepunten rond die piek met de formule:

$$Z_{-3dB} = \sqrt{\left(\frac{1}{2} Z_{max}^2 + Z_{max} \cdot R_{dc} + R_{dc}^2\right)}$$

Zoek in de curve (of meet dit) de frekwenties onder (f_l) en boven (f_h) de resonatiefrekventie waarbij de



Figuur 4. Hier is de werking van korrektienetwerken te zien: a) RC-netwerk toegevoegd aan de woofer uit figuur 1, b) RC-netwerk plus RLC-netwerk.

curve deze waarde heeft. De bandbreedte van de piek is:

$$B = f_h - f_l$$

Nu heeft u voldoende gegevens om de componenten van de resonantiekring in het vervangingsschema van figuur 2 te kunnen berekenen:

$$L_{res} = B \times \frac{Z_{max}}{2 \times \pi \times f_{res}^2}$$

$$C_{res} = \frac{1}{2 \times \pi \times Z_{max} \times B}$$

$$R_{res} = Z_{max}$$

De gelijkstroomweerstand hebben we al, dus moet nu nog de zelfinductie worden berekend. Daarvoor geven we een vuistregel die niet 100% nauwkeurig is, maar die wel heel bruikbare resultaten geeft. Kijk in de curve bij welke frekwentie in het oplopende deel de impedantie $2 \times R_{dc}$ wordt. De zelfinductie is

dan:

$$L_c = \frac{\sqrt{3} \times R_{dc}}{2 \times \pi \times f}$$

Bij luidsprekers waarvan de impedantie niet zo hard stijgt bij hogere frekwenties (squawkers en tweeters) kunt u als meetpunt de frekwentie nemen waarbij de impedantie $\sqrt{2} \times R_{dc}$ bedraagt. Dan geldt:

$$L_c = \frac{R_{dc}}{2 \times \pi \times f}$$

Voor de gestippeld getekende weerstand in het vervangingsschema is het moeilijk om een vuistregel te geven. Bij luidsprekers met een geringe zelfinductie is die weerstand gewoonlijk niet nodig. Bij woofers kan het uiteinde van de curve (5...20 kHz) beter worden benaderd door de weerstand een waarde tussen circa 50 en 100 Ω te geven. Wordt bij een woofer uitsluitend met L_c gewerkt, dan loopt de impedantiecurve

aan het bovenende van het audio-bereik anders te veel op. Een goede benadering is mogelijk als u hierbij op een PC gebruik maakt van een simulatieprogramma zoals MicroCap (er is een boek met een studentenversie) en Calsod (ook hiervan is een goedkope versie leverbaar).

De kompensatie

De netwerkjes voor het kompenseren hebben we al laten zien in figuur 3. Nu de componentenwaarden van het luidspreker-vervangingsschema bekend zijn, kunnen ook de waarden van de korrektiecomponenten berekend worden. Het RC-netwerk (3a) wordt het meeste toegepast omdat de zelfinduktie van de luidspreker (bijv. een middentoner) vaak de filterwerking verstoort. De berekening is eenvoudig:

$$R = R_{dc}$$

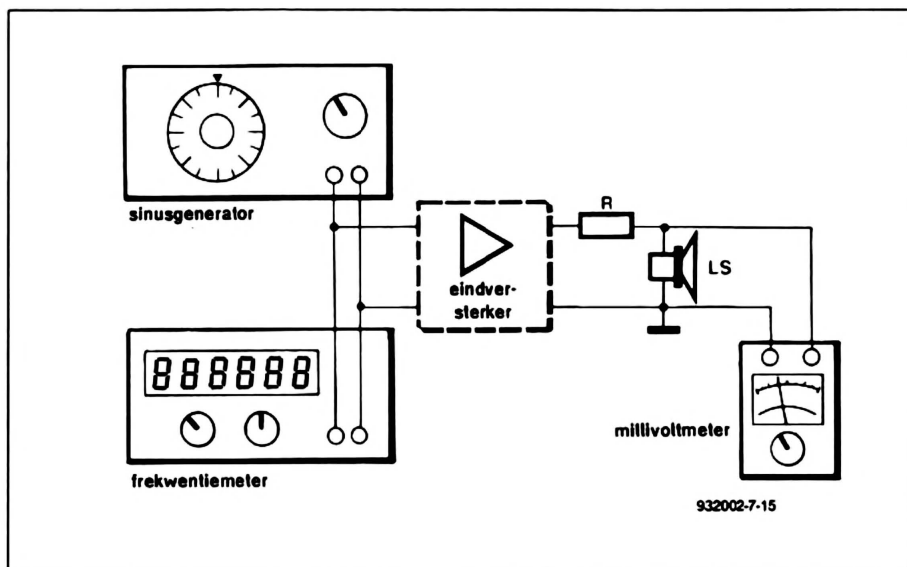
$$C = \frac{L_c}{R_{dc}^2}$$

De impedantiecurve zal daardoor vrijwel vlak lopen op een waarde die gelijk is aan R_{dc} . Soms blijkt de luidspreker-impedantie met dit netwerk toch niet vlak te lopen. Dat komt omdat de zelfinduktie van het vervangingsschema zich in werkelijkheid niet helemaal als een echte zelfinduktie gedraagt, zoals we al eerder opgemerkt hebben. Het kan daarom nodig zijn om C iets kleiner dan de berekende waarde te nemen en/of R iets groter dan R_{dc} . Indien u zelf de impedantie van de luidspreker kunt meten, dan kan het interessant zijn om hiermee wat te experimenteren.

De resonantiepiek kan ook vrij goed gekompenseerd worden. Een korrektie is echter niet altijd nodig. Als de impedantiepiek niet groot is (kleiner dan $1,5 \times R_{dc}$) of meer dan twee oktafen buiten het doorlaatgebied van het voorgeschakelde filter ligt, dan is een korrektie meestal niet nodig. Maar heeft u die korrektie wel nodig, dan worden de componenten uit figuur 3b als volgt gedimensioneerd:

$$R = R_{dc} + \frac{R_{dc}^2}{R_{res}}$$

$$L = C_{res} \times R_{dc}^2$$



Figuur 5. Met een eenvoudige meetopstelling kunnen de belangrijkste impedantiegegevens snel worden gemeten.

$$C = \frac{L_{res}}{R_{dc}^2}$$

Houdt u er bij de praktische dimensionering wel rekening mee dat in weerstand R ook de gelijkstroomweerstand van de gebruikte spoel zit. Heeft de spoel een weerstand van 1Ω , dan kiest u voor de weerstand een waarde die 1Ω kleiner is dan de berekende R. Bij het afronden op standaard-waarden kunt u het beste de spoel een iets grotere waarde dan de berekende geven en de condensator een iets kleinere waarde. Wilt u de combinatie van figuur 3c gebruiken, dan neemt u voor de bovenste weerstand in het schema de kleinste weerstandswaarde uit 3a en 3b. De andere weerstand is het verschil in weerstandswaarde tussen 3a en 3b. Het kan dus ook voorkomen dat in de LC-tak verder geen weerstand meer komt, maar wel nog een weerstand in serie met de linker condensator.

Meten: zelf doen?

Het meten van de impedantiecurve van een luidspreker is niet moeilijk. Er worden twee methoden gehanteerd, één die uitgaat van een stroombron en één die gebruik maakt van een spanningsbron. De eenvoudigste is de stroommeting. In figuur 5 is de meetopstelling weergegeven. De meetstroom wordt geleverd door een (gewone) eindversterker waarbij de uitgang in een "stroombron" wordt getransfor-

meerd door er een weerstand in serie mee te schakelen die veel groter is dan de impedantie van de luidspreker (bijv. $3,3 \text{ k}\Omega$). Achter die weerstand wordt dan de te meten luidspreker opgenomen. Stellen we het ingangsnivo van de versterker zo in dat aan de uitgang een spanning van $3,3 \text{ V}_{\text{eff}}$ staat, dan loopt er dus een uitgangsstroom van 1 mA door de weerstand. Als frekwentiebron nemen we een generator met frekwentiemeter of – indien u die niet heeft – een meet-CD met testtonen (het nadeel van een CD is dat de frekwentieverdeling bij lage frekwenties niet fijn genoeg is om nauwkeurig te meten). Parallel aan de luidspreker hangt u nu een wisselspanning-millivoltmeter en daarop kan de impedantie bij elke meetfrekwentie worden afgelezen: 1 mV komt overeen met 1Ω . Let er op dat de millivoltmeter in het hele audio-frekwentiebereik betrouwbaar kan meten, anders kloppen de resultaten natuurlijk niet. Mocht de meetspanning te laag zijn voor uw meter, dan kunt u ook een versterker-uitgangsspanning nemen van $10 \text{ V}_{\text{eff}}$ en een weerstand van $1 \text{ k}\Omega$. Elke ohm impedantie komt dan overeen met 10 mV over de speaker. De resultaten kunt u in een grafiek uitzetten, zodat u een curve krijgt die lijkt op wat in figuur 1 is afgebeeld. Maar u kunt ook alleen maar de voor de berekeningen noodzakelijke punten meten en die in de formules invoeren. Voor de kompensatiemaatregelen is dat voldoende.