

# Lichtgestuurde geluidseffecten

Spanningsgestuurd  
24 dB/oct synthesizerfilter (VCF) met LDR's

Raymond Schouten (Nederland)

Dit artikel beschrijft een eenvoudige afstembare filterschakeling waarvoor geen speciale chips nodig zijn, alleen twee op-amps die kunnen werken op een enkele 5-V voeding. Ondanks zijn eenvoud biedt het filter een zeer lage vervorming ( $\text{THD} < 0,01\%$ ), goede groot-signaalverwerking en een groot dynamisch bereik ( $> 90 \text{ dB}$ ).

Het hieronder gepresenteerde 24 dB/oct audio laagdoorlaatfilter is gebaseerd op vier lichtafhankelijke weerstanden, beter bekend als LDR's, die worden aangestuurd door een enkele LED. De helderheid van de LED regelt de afsnijfrequentie van het filter van ongeveer 20 Hz tot 20 kHz. Damping (d.w.z. de Q-factor, ook bekend als resonantie) kan worden ingesteld tot volledige oscillatie, wat aantrekkelijk is voor toepassin-

gen in muzieksynthesizers. De schakeling is eenvoudig te bouwen, en de kosten van de componenten bedragen ongeveer € 4.

Dit filter is ontworpen met het oog op muzieksynthesizers, maar de hoge signaalkwaliteit zou ook andere audio-toepassingen mogelijk kunnen maken. De schakeling werd eerst gesimuleerd voordat een prototype op een breadboard

werd gebouwd om de prestaties te meten. Geluidsvoorbeelden en een demonstratievideo zijn beschikbaar op de Elektor Labs projectpagina [1].

## Twee versies

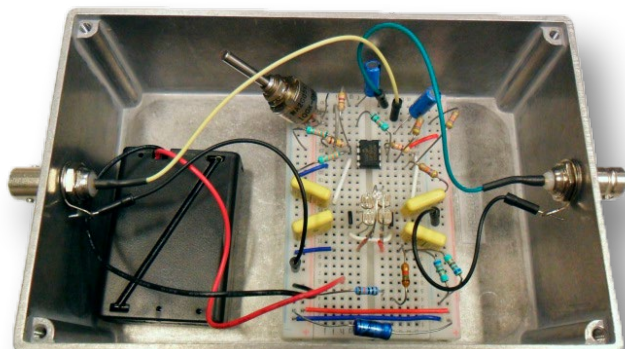
Er zijn twee versies van het filter beschikbaar, waarvan de eenvoudigste werkt op een symmetrische dubbele voeding. Door toevoeging van enkele weerstanden en condensatoren kan het worden veranderd in een versie die werkt op een enkele voeding. Deze versie werd gebouwd en gemeten (**figuur 1**).

## De schakeling (dubbele voeding)

We zullen de schakeling van het filter met symmetrische voeding uitleggen, omdat die minder componenten gebruikt, zie **figuur 2**. De single-supply versie (**figuur 3**) werkt precies hetzelfde.

Het hart van het filter is een 6 dB/octaaf RC laagdoorlaatfilter waarbij de vaste weerstand R is vervangen door een LDR. Vier van deze filters zijn in serie gezet om een helling van 24 dB/octaaf te verkrijgen. Door de weerstand van de vier LDR's tegelijkertijd door een enkele LED te regelen, ontstaat een filter met een afsnijfrequentie die over een groot bereik ( $> 1 : 1000$ ) kan worden ingesteld.

Cascadering van vier identieke RC-schakelingen zonder buffers lijkt misschien een recept voor een ramp, met als resultaat een zeer slecht filter met slappe overgang bij



*Figuur 1: De single-supply versie van het filter werd gebouwd op een breadboard en in een metalen doosje geplaatst om de prestaties te controleren terwijl het gevoed werd door drie AAA-batterijen.*

de afsnijfrequentie, maar aangezien het beroemde Moog-ladderfilter ook op dit principe is gebaseerd, kan het niet helemaal slecht zijn. Robert Moog loste het probleem op een slimme manier op, een oplossing die ook in onze schakeling wordt gebruikt. Het is gebaseerd op negatieve terugkoppeling die pas bij de afsnijfrequentie overgaat in positieve terugkoppeling. Het kader *Filter Q controle uitgelegd* gaat hier dieper op in.

Op-amp U1a buffert de ingang en voegt het feedbacksignaal toe via R9 en P1. Op-amp U1b is een hoogohmige buffer voor de LDR/C-cascade en voegt enige versterking toe ter compensatie van het verlies bij de afsnijfrequentie.

P1 regelt de hoeveelheid totale negatieve terugkoppeling. Het filter gaat van gedempte respons naar volledige oscillatie door P1 te regelen van 100 kΩ naar 0 Ω. Vervanging van P1 door nog een LED-LDR combinatie maakt een elektronisch geregelde Q-factor mogelijk. Zie het kader getiteld *Simulatie resultaten filterrespons* voor de frequentieafstemming en de Q-regelkrommen.

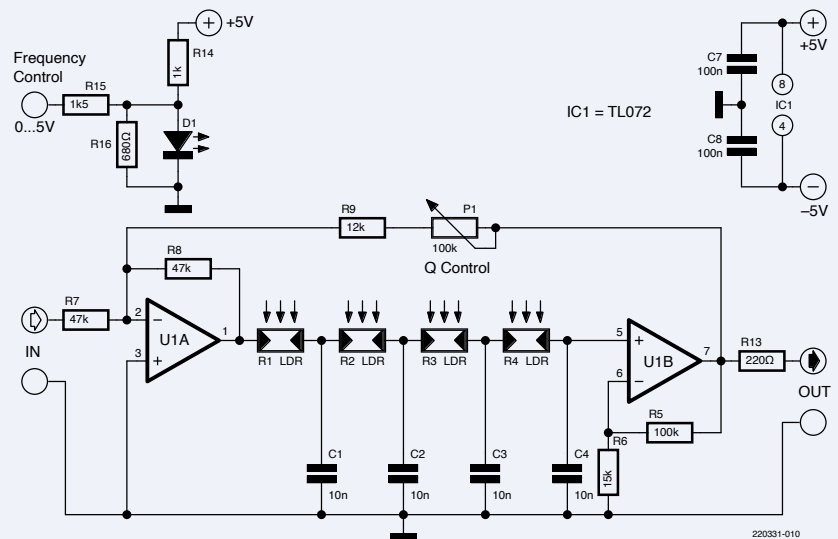
Een gedetailleerde uitleg over de keuze van LED D1 en het principe achter het

weerstandscircuit is te vinden in het kader *De LED-LDR combinatie*.

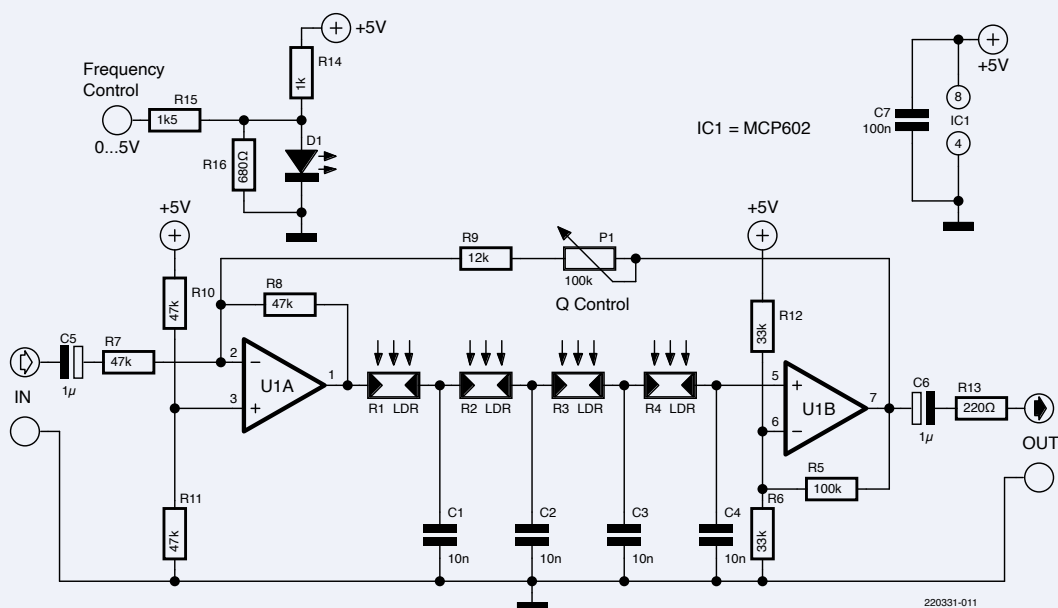
### Voordelen van het concept

De meeste analoge afstembare filters gebruiken complexere schakelingen die alleen werken bij kleine signaalniveaus ( $< 100 \text{ mV}_{PP}$ ) om de vervorming op een aanvaardbaar niveau te houden. Voorbeelden hiervan zijn filters gebaseerd op tuned-bias transistors of diodes, discreet of geïntegreerd in speciale IC's (OTA's zoals de beroemde LM13700). Dit op LDR's

gebaseerde ontwerp daarentegen kan signalen van meerdere volts aan terwijl de vervorming zeer laag blijft. Eigenlijk wordt de spanningszwaai voornamelijk beperkt door de opamps en de voedingsspanning, want de meeste LDR's kunnen tot 100 V of meer aan. Je zou dit filter zelfs met buizen kunnen bouwen! Aangezien het ruisniveau van de schakeling vrij laag is -die wordt voornamelijk bepaald door de opamps en de equivalente weerstandsruijs van de LDR's- kan een groot dynamisch bereik worden gerealiseerd.



Figuur 2: Schema van de dual-supply versie van het filter.



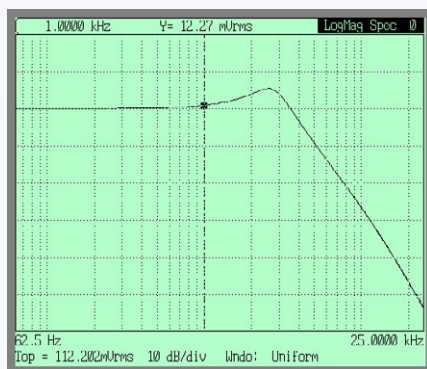
Figuur 3: Door toevoeging van enkele weerstanden en condensatoren kan het filter met dubbele voeding worden veranderd in een filter met één voeding.



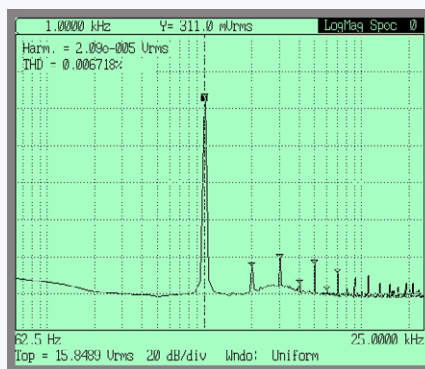
## Vervormingsmetingen

Voor deze metingen werd een Stanford Research SR770 FFT spectrum analyzer met ingebouwde signaalbron gebruikt. Om het oppikken van elektrische en optische storingen te voorkomen, werd de schakeling geplaatst in een gesloten metalen doos waarin ook de batterijvoeding was ondergebracht (zie figuur 1). De schakeling werkte hier op een enkele voeding van 4,5 V (3x AAA).

Eerst werd het instrument ingesteld om de filterresponscurve te meten. Vervolgens werd het ingesteld om een sinus van 1 kHz te genereren en het uitgangsspectrum van het filter te meten tot 25 kHz. Daaruit werd de totale harmonische vervorming (THD) berekend voor de eerste zes harmonischen. Het filter werd ingesteld op een afsnijfrequentie van 4 kHz. De reden voor deze keuze is dat er positieve terugkoppeling is bij de afsnijfrequentie en dat verhoogt de vervorming. Dit is dus een worst-case scenario voor de tweede en derde harmonische vervorming (meestal de dominante). Men zou kunnen aanvoeren dat het een deel van de hogere harmonischen onderdrukt, maar een controle bij  $f_c = 13$  kHz liet vrijwel hetzelfde harmonische patroon zien.



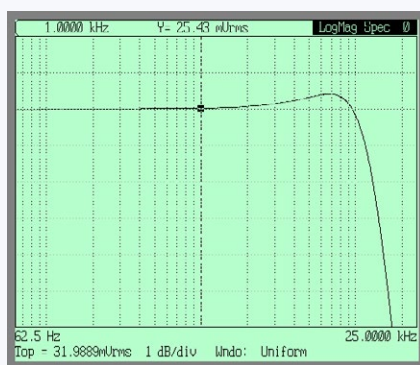
Gemeten filterrespons.



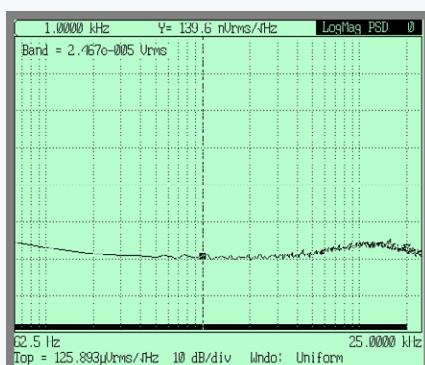
Gemeten vervorming.

## Ruismeting en dynamisch bereik

Het uitgangsspectrum is gemeten met uitgeschakelde signaalbron en geeft in totaal 25  $\mu$ Vrms in de audioband tot 20 kHz. In combinatie met de maximale signaalverwerking van 4 Vpp (1,4 Vrms) leidt dit tot een dynamisch bereik van 95 dB. Dit zou verbeterd kunnen worden door hogere voedingsspanningen te gebruiken.



Gemeten filterresponscurve (1 dB/div). Het filter was ingesteld op -3 dB bij 13 kHz.



Het gemeten spectrum aan de uitgang van het filter.

Een ander voordeel van de schakeling is de extreem lage (afwezige?) stuurspanningslekkage in het audiopad vanwege de optische koppeling.

Met geschikte op-amps werkt hij op een enkele lage voeding (3 V tot 5 V), waardoor hij compatibel is met microproceessor-toepassingen zoals Arduino.

Met een spanningsregeling op de LED (zie kader *De LED-LDR Combinatie*) kan een ruwe, grofweg exponentiële regelkromme worden verkregen die nodig is voor synthetisatoepassingen. Voor een preciezere (maar lineaire) regeling kan een stroombron of PWM-sigitaal voor de LED worden toegepast.

## Beperkingen van het concept

Om eerlijk te zijn heeft het hier gepresenteerde filter ook enkele nadelen in vergelijking met andere concepten. De instelling van de afsnijfrequentie is niet erg precies. Het is voldoende voor een muzieksynthesizer, maar voor nauwkeuriger toepassingen kan een kalibratietabel of een extra terugkoppelingsschakeling nodig zijn.

Bovendien wordt de regelsnelheid van de afsnijfrequentie beperkt door de relatief trage LDR's. Bij het verhogen van de filterfrequentie blijft de gemeten respons in de orde van een milliseconde, maar het verlagen kan tot 50 ms duren en zelfs tot 500 ms voor zeer lage afsnijffrequenties. Korte 'attack'-tijden zijn dus mogelijk voor het openen van het filter aan het begin van een toon. In de muziek is de aanslagtijd van een geluid meestal korter dan de uitsterftijd, waardoor dit filter geschikt is voor muzikale toepassingen.

## Suggesties en opmerkingen

Het dynamische bereik kan verder worden vergroot door hogere voedingsspanningen te gebruiken. Zoals gezegd kunnen LDR's doorgaans signalen tot 100 V verwerken.

Om een nauwkeurigere en stabielere frequentieregeling te krijgen, zou je vijf LDR's kunnen gebruiken in plaats van vier en er eentje in de feedbacklus opnemen van een op-amp die de LED aanstuurt. Omdat het filter is ontworpen met toepassingen voor muzieksynthesizers in gedachten, is de

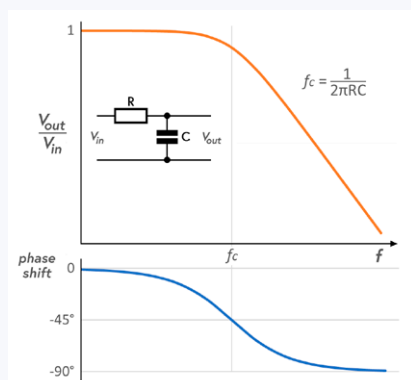
versterking sterk afhankelijk gemaakt van de Q-waarde om grote verhogingen van het uitgangssignaal te voorkomen. Als alternatief zou het ingangssignaal kunnen worden toegepast op de niet-inverterende ingang van U1a in plaats van op de inverterende ingang. Dit zou de invloed van de Q-waarde op de filterversterking beperken en het filter zou een niet-inverterende overdrachtsfunctie krijgen. **K**

220331-03

## Vragen of opmerkingen?

Heeft u technische vragen of opmerkingen over dit artikel? E-mail de auteur op [rs.elc.projects@gmail.com](mailto:rs.elc.projects@gmail.com) of Elektor op [editor@elektor.com](mailto:editor@elektor.com).

## Filter Q-control uitgelegd



Een RC-laagdoorlaatfilter is niet alleen een filter, maar ook een frequentie-afhankelijke faseverschuiver, beginnend bij 0°, oplopend tot -45° bij de afsnijfrequentie en daarna tot -90°. Met vier van deze RC-filters in serie wordt de faseverschuiving bij de afsnijfrequentie  $4 \times -45 = -180^\circ$ . Dit betekent dat het signaal bij die frequentie van teken verandert. Wanneer we dus negatieve terugkoppeling toepassen van de uitgang naar de ingang van het filter, is het resultaat positieve terugkoppeling bij de afsnijfrequentie, waardoor de versterking bij die frequentie piekt. Dit geeft het filter de scherpe overgang bij de afsnijfrequentie. Door de hoeveelheid negatieve terugkoppeling aan te passen, kan de versterking worden gevarieerd. Bij een bepaalde maximale terugkoppeling kan het een (sinus)oscillator worden die regelbaar is van 20 Hz tot 20 kHz.

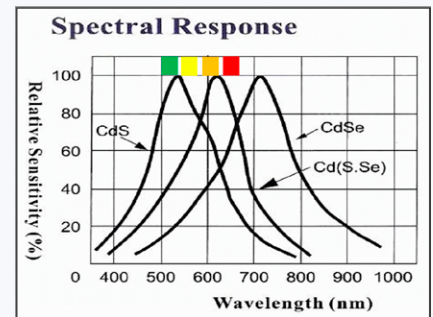
## De combinatie LED-LDR

### Bouw

De LED hangt zo'n 5 tot 7 mm boven de vier LDR's. De mechanische precisie-eisen zijn bescheiden, metingen tonen geen significant verschil in respons als de LED 1 tot 2 mm uit de as wordt geduwd. Zorg voor een goede afscherming van de schakeling tegen omgevingslicht, want dat zal ook het filter moduleren!

### Keuze van de LED-kleur

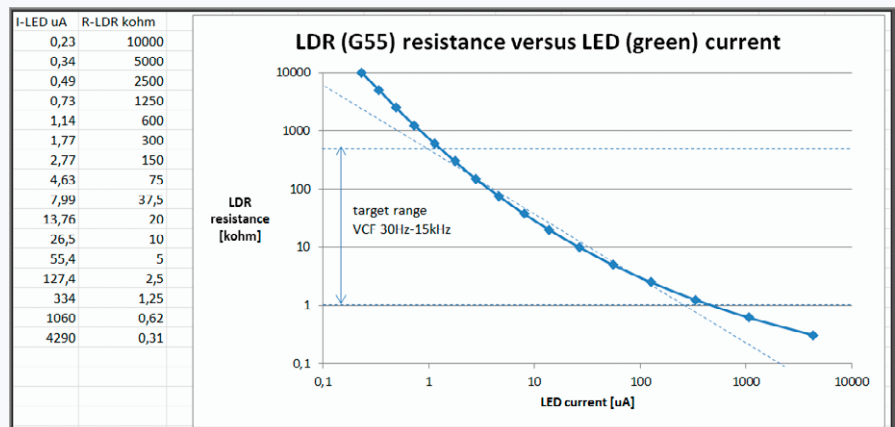
Ik heb LDR's op basis van CdS gebruikt, dan werkt groen of geel licht het beste, zoals blijkt uit dit spectrale responsdiagram.



Bron: JCLH, datasheet van LDR GL5537-1

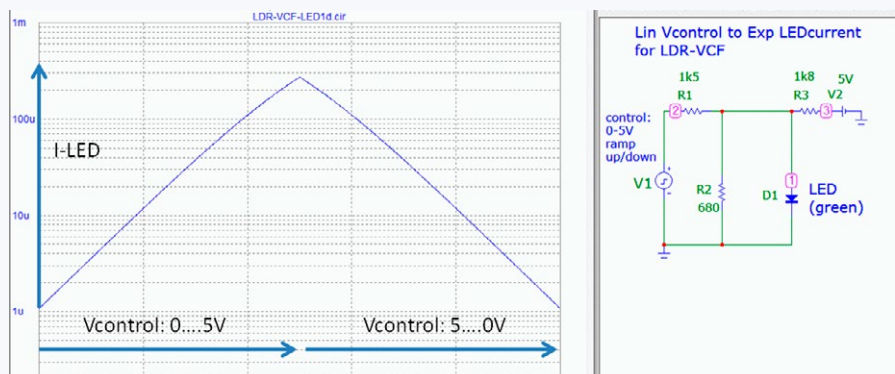
### Gevoeligheid

Uit de metingen bleek dat de weerstand van de LDR bijna een lineaire functie is van de LED-stroom in het weerstandsbereik van 500 kΩ tot 1 kΩ. In totaal kon de LDR-weerstand worden geregeld van 10 MΩ tot 300 Ω, zoals blijkt uit deze gemeten curve.



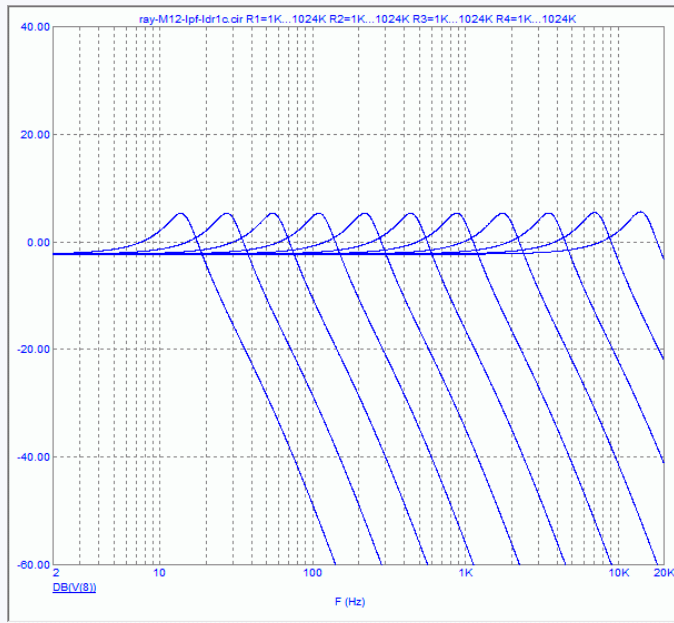
Hier werd een zeer heldere groene LED gebruikt (OVLBG4C7), 0,5 μA produceerde genoeg licht om de LDR-weerstand te verlagen.

Hieronder wordt een zeer eenvoudige maar onnauwkeurige manier getoond om een exponentiële regelkromme te benaderen zonder gebruik te maken van extra schakelingen. Het principe is als volgt. Wanneer een diode (hier de LED) met een spanning wordt aangestuurd, is de resulterende stroom een exponentiële functie van die spanning. Een spanningsbron rechtstreeks aansluiten op een LED is geen goed idee, maar hier gebruiken we voldoende lage weerstandswaarden om dit te benaderen. De simulatie hieronder laat zien dat wanneer we de stuurspanning lineair sweepen van 0 tot 5 V, we een exponentiële toename van de LED-stroom krijgen van 1 μA tot 300 μA. In de praktijk moeten de weerstandswaarden misschien een beetje aangepast worden aan de LED. Zoals gezegd is dit nogal onnauwkeurig en temperatuurafhankelijk, maar de eenvoudigste manier om exponentiële regeling voor synthesizertoepassingen te benaderen. De geluidsvoorbeelden zijn gemaakt met deze regeling.

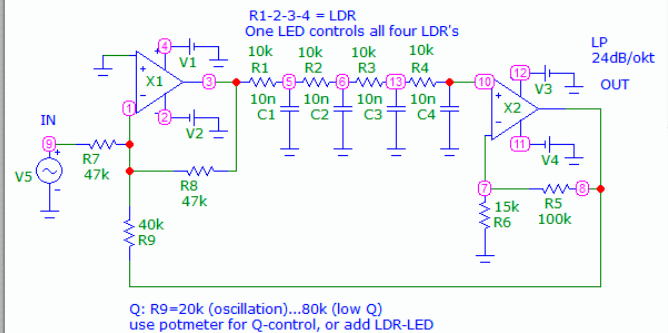




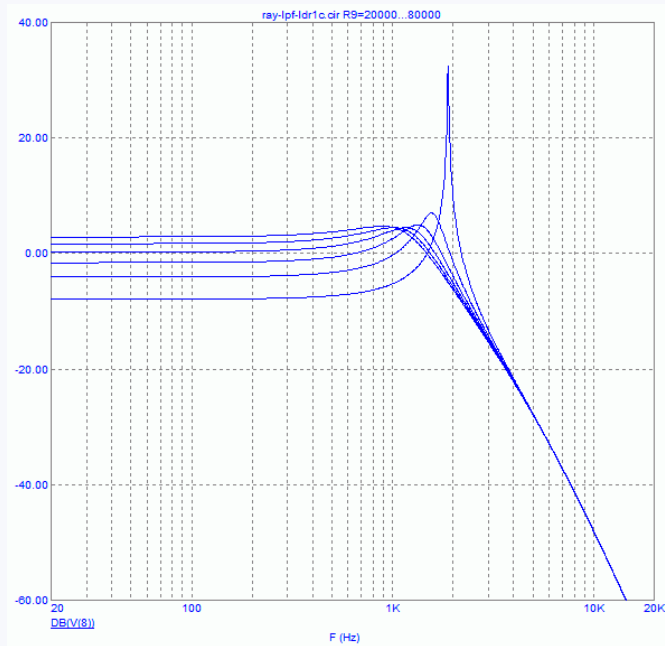
## Simulatieresultaten van de filterrespons



LDR based VC LPF 24dB/oct 20Hz-20kHz

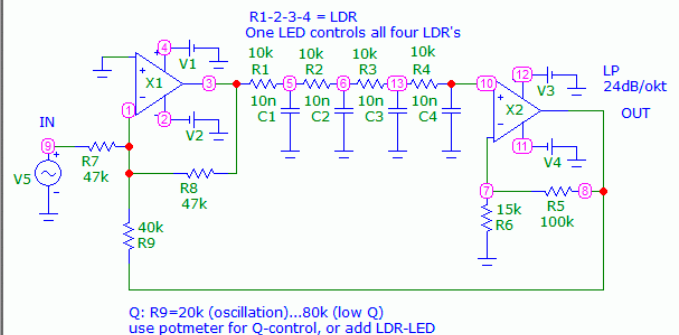


In deze simulatie wordt de afsnijfrequentie van het filter gesweept van 20 Hz tot 20 kHz terwijl de Q-regelaar op een constante waarde wordt gehouden.



LDR based VC LPF 24dB/oct 20Hz-20kHz

[www.RS-ELC.nl](http://www.RS-ELC.nl)



Hier gaat de Q-regelaar van het filter (R9) van 80 kΩ naar 20 kΩ terwijl de de afsnijfrequentie op een constante waarde wordt gehouden.



## Verwante producten

- Joy-IT ScopeMega50 USB Oscilloscoop (SKU 18277) [www.elektor.nl/18277](http://www.elektor.nl/18277)
- MIDI Input Board - Kale PCB (SKU 18382) [www.elektor.nl/18382](http://www.elektor.nl/18382)
- De LTspice XVII Simulator (SKU 19741) [www.elektor.nl/19741](http://www.elektor.nl/19741)

## WEBLINKS

- [1] This project at Elektor Labs:  
[www.elektormagazine.com/labs/voltage-controlled-24dboct-synthesizer-filter-using-ldrs](http://www.elektormagazine.com/labs/voltage-controlled-24dboct-synthesizer-filter-using-ldrs)