

## 10 Elektrostatistische luidsprekers en scheidingsfilters

De meeste full-range elektrostaten hebben voor huiskamergebruik een redelijke tot goede laagweergave. Zo heeft de QUAD ESL 63 een laagweergave die recht doorloopt tot 50 Hz. Voor huiskamergebruik is dit meestal voldoende.

De zelfbouw elektrostaten in dit boek hebben een vergelijkbare laagweergave. Toch kan de situatie ontstaan dat de bezitter van commerciële elektrostaten of een ESL- zelfbouwer verder gaande (bas)wensen heeft. Om de weergave van het laag uit te breiden is dan een elektrostatistische of elektrodynamische subwoofer nodig. Daarbij kan naar wens gebruik worden gemaakt van een subwoofer per kanaal of een centrale subwoofer (som- bas).

Voor deze sub- basweergevers worden vaak dynamische weergevers gebruikt met een conusdiameter van 25....30 cm. Een voorwaarde is voor het toepassen van een dynamische sub- bas is dat de kantelfrequentie van het filter niet hoger is dan ca. 200 Hz. Dit in verband met het bereiken van een homogeen geluidsbeeld. Dynamische weergevers met een diameter van 25 tot 30 cm zijn bij hogere frequenties meestal niet in staat om een ongekleurde weergave te produceren. Dit is dan ook de reden dat ze uitsluitend gebruikt worden om het laag beneden de 200 Hz weer te geven.

Ook elektrostaten kunnen worden gebruikt om de laagweergave van een full-range ESL uit te breiden. Men kan ook dan kiezen voor één of meerdere ESL- subwoofer- modules per kanaal of één centrale elektrostatistische som- bas.

Voor elektrostatistische of dynamische sub- bas weergevers is een passief of actief filter nodig. Ook als men een hybride systeem ontwerpt is een filter nodig.

De functie van de elektrodynamische weergever in een hybride systeem is geheel anders dan die van de zo'n weergever in een sub- bas. Bij een hybride ESL is de kantelfrequentie van het filter gewoonlijk 200...600 Hz. De weergever moet een ongekleurde weergave moeten bezitten tot twee of drie octaven boven de scheidingsfrequentie. Dus tot 600... 1800 Hz. Bovendien zal het weergave- karakter zeer goed moeten aansluiten bij het transparante karakter van de ESL. Daarom wordt voor hybride systemen vaak gebruik gemaakt van dynamische weergevers met een polipropyleen of kevlar conus met een diameter van maximaal 20 cm. Deze zijn niet goedkoop, maar bieden een uitstekende weergavekwaliteit tot 2000.. .3000 Hz.

Het is soms mogelijk om een dynamische weergever, ontworpen voor hybride toepassing, als som- bas te gebruiken. Voorwaarde daarbij is dat het ESL-element en de dynamische weergever los van elkaar te gebruiken zijn en voorts dat deze dynamische weergever een redelijke laagweergave heeft.

Bij een hybride systeem of een full-range ESL met één sub- bas per kanaal heeft een filterhelling van 6 dB per octaaf de voorkeur. Deze filters zijn bij uitstek geschikt voor elektrostaten omdat er dan de minste faseproblemen zijn. Het blijft natuurlijk mogelijk om een filter te nemen met een steilere filterhelling (12, 18 of 24 dB per octaaf).

Bij het gebruik van een centrale subwoofer kan gebruik worden gemaakt van een filter met 6 dB per octaaf, of een filter met een steilere helling (12, 18 of 24 dB per octaaf).

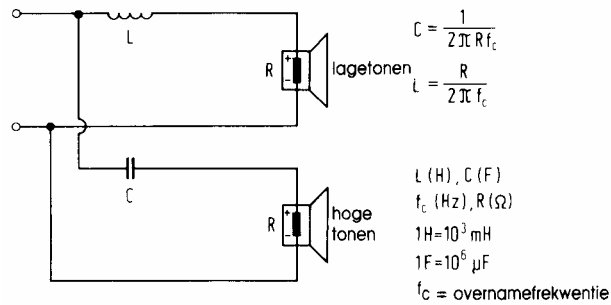
In het geval van 6 dB per octaaf voor een sombas- weergever moet een kantelfrequentie van maximaal 100 Hz worden gekozen. Het menselijk gehoor is weliswaar niet in staat om de herkomst van frequenties lager dan ca. 200 Hz vast te stellen, maar daarbij geldt als voorwaarde dat frequenties hoger dan 200 Hz in zeer geringe mate in het signaal aanwezig mogen zijn. Bij een kantelfrequentie van 200 Hz dient men dus een filter te nemen met een steilere filterhelling (18 of 24 dB / octaaf).

Het is in alle gevallen mogelijk om gebruik te maken van zowel een passief of een actief filter. De kosten van een passief 18- of 24 dB- filter, zeker indien men hoogwaardige componenten gebruikt, kunnen dermate hoog zijn dat men alleen al uit kostenoverwegingen beter kan overgaan op actief filteren. Daar komt bij dat een actief filter een aantal voordelen biedt ten opzichte van een passief filter. Eén van de voordelen van een actief filter is dat je de filtersteilheid en de kantelfrequentie eenvoudig kunt wijzigen. Een ander voordeel is dat een dynamische weergever die wordt gefilterd met behulp van een actief filter een beter impulsgedrag heeft door het vrijwel ontbreken van ohmse componenten in de toevoeringen. Verder is het mogelijk om weergevers toe te passen met een verschillend rendement, die zeer eenvoudig op elkaar kunnen worden afgestemd. Het nadeel van een actief filter is dat men over een voorversterker dient te beschikken en een tweede eindversterker. Het actieve filter wordt dan tussen de voorversterker en de eindversterkers geschakeld. Tegenwoordig zijn versterkers relatief bescheiden van prijs. Het is natuurlijk

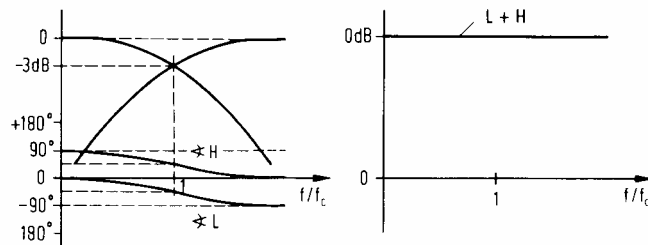
mogelijk om een gebruikte versterker aan te schaffen of om over te gaan op zelfbouw, men kan zo de kosten van de benodigde componenten laag houden. Bij passieve filters is het grootste voordeel dat men geen voorversterker en extra eindversterker(s) nodig heeft. Een ander voordeel, met name bij 6 dB per octaaf, is de eenvoud van het filter. Zowel passieve als actieve filters kunnen tot uitstekende resultaten leiden.

### 10.1 Passief tweewegfilter 6 dB per octaaf

Dit is het eenvoudigste filter dat denkbaar is; het bestaat uit een spoel en een condensator (figuur 10.1). De uitgangsspanningen bij elkaar opgeteld, zijn gelijk aan de ingangsspanning (figuur 10.2). Vergelijkt men het amplitude- en fasegedrag van dit filter met dat van een filter van een hogere orde, dus 12, 18 of 24 dB per octaaf (figuur 10.3), dan is duidelijk dat een 6 dB- filter het gunstigste fasegedrag heeft.



Figuur 10.1. Een wisselfilter van de eerste orde (6 dB per octaaf).



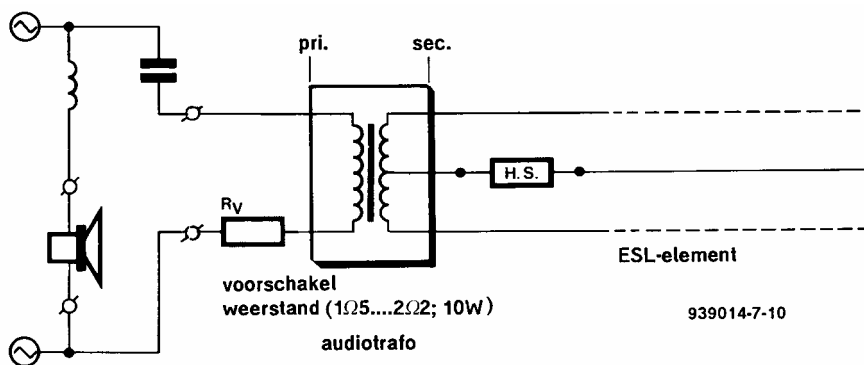
Figuur 10.2. Amplitude- en faseverloop van het filter van figuur 10.1.

Dit type filter kan zowel in hybride als in sub- bassystemen worden gebruikt. Door de waarden van de spoel en de condensator te veranderen kunnen we voor een bepaalde kantelfrequentie kiezen. De verschillende waarden van de spoel en de condensator voor het instellen van een bepaalde kantelfrequentie zijn voor 8 Ω:

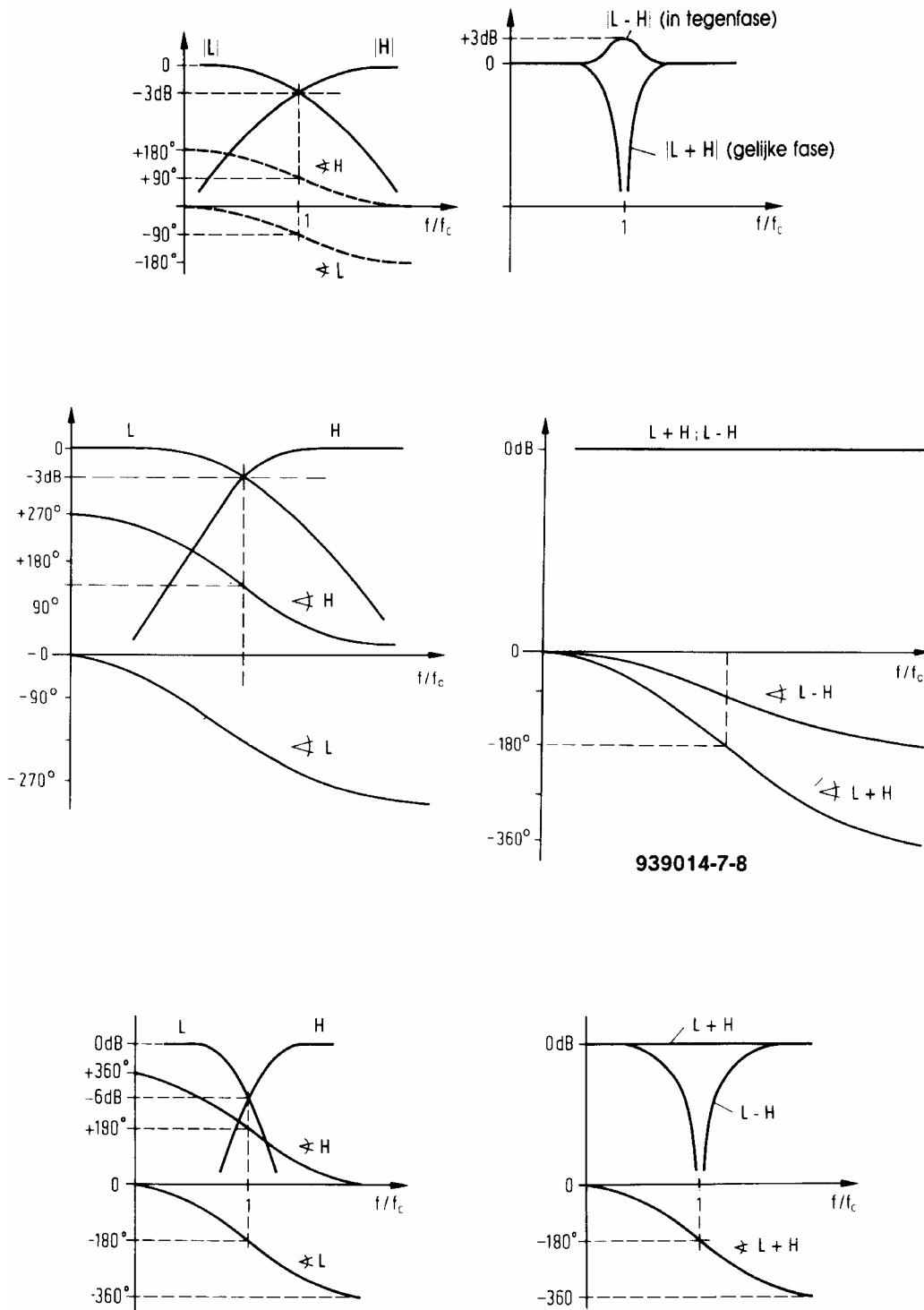
| Hz  | C(μF) | L (mH) |
|-----|-------|--------|
| 50  | 400   | 26,0   |
| 75  | 267   | 17,2   |
| 100 | 200   | 13,0   |
| 125 | 160   | 10,4   |
| 150 | 133,4 | 8,6    |
| 175 | 114,4 | 7,4    |
| 200 | 100   | 6,5    |
| 250 | 80    | 5,2    |
| 300 | 66,7  | 4,3    |
| 350 | 57,2  | 3,7    |
| 400 | 50    | 3,3    |
| 450 | 44,4  | 2,9    |
| 500 | 40    | 2,6    |
| 550 | 36,4  | 2,4    |
| 600 | 33,3  | 2,2    |

De kwaliteit van de onderdelen dient voor het bereiken van een uitstekende geluidskwaliteit hoog te zijn. Omdat er maar twee componenten nodig zijn is het mogelijk om hiervoor een hoge kwaliteit te nemen zonder dat de kosten al te hoog worden. Voor de spoelen met een betrekkelijk lage zelfinductie (tot 2,7 mH) kunnen we het beste luchtspoelen nemen met een draaddoorsnede van 1,4 mm of meer. Voor spoelen met een hogere zelfinductie dan 2,7 mH is het aan te bevelen corobar-, ferrobar- of ferrocore- spoelen te nemen. De weerstand van de spoel dient hoogstens  $1/2 \Omega$  te zijn; een hogere weerstand gaat ten koste van het rendement en het impulsgedrag van de dynamische weergever.

Voor condensatoren met een capaciteit tot  $100 \mu\text{F}$  kan men het beste een MKP- condensator gebruiken. Boven  $100 \mu\text{F}$  kan men het beste uit kostenoverwegingen een parallelcondensator toepassen die is opgebouwd uit MKP- en MKT- condensatoren, bijvoorbeeld de helft MKP en de helft MKT. Voorts is het bij toepassing van dit type filter aan te bevelen een dynamische weergever toe te passen die een rendement heeft dat overeenkomt met dat van de ESL-weergever. Dit omdat het geen eenvoudige zaak is om het rendement van de dynamische weergever te verlagen zonder dat dit ten koste gaat van de weergavekwaliteit. L-pads of weerstandsnetwerken moeten in dit verband dan ook worden afgeraden, daar deze ten koste gaan van het impulsgedrag van de dynamische weergever en de demping van de versterker. In figuur 10.5 is weergegeven hoe we de ESL aansluiten op het passieve filter.



Figuur 10.5. De aansluiting van een ESL-element op een passief filter.



939014-7-8

Figuur 10.3. Amplitude en faseverloop van Butterworth-filters met een helling van 12, 18 en 24 dB per octaaf..

## 10.2 Discrete actieve filters voor elektrostaten

Voor hybride systemen en sub- basweergevers is een aantal discrete actieve filters ontworpen, die uitblinken door eenvoud, veelzijdigheid en geluidskwaliteit. Een voorwaarde voor het toepassen van actieve filters is dat de voor- en eindversterker los van elkaar gebruikt kunnen worden. Het actieve filter wordt namelijk tussen voor- en eindversterker geschakeld.

## 10.3 Discreet filter 1 (6 dB/octaafsom- basfilter)

Dit type filter is ontworpen als een som- basfilter, dus dat de full-range ESL's het gehele frequentiespectrum blijven weergeven, waarbij dit filter samen met een aparte versterker een centrale subwoofer stuurt (figuur 10.6). De eerste twee trappen zijn buffers, waarna het linker en het rechter signaal worden samengevoegd. De kantelfrequentie wordt bepaald door  $R_x$  en  $C_x$ . Deze zijn te berekenen met de formule:

$2 \cdot \pi \cdot f = 1 : (R_x \cdot C_x)$ . Als  $R_x = 10 \text{ k}\Omega$  gekozen wordt, dan is voor een kantelfrequentie van 80 Hz  $C_x$  gelijk aan 180 nF. Met een potmeter (P1) kan het geluidsniveau van de som- bas worden aangepast aan dat van de ESL's. De kantelfrequentie bij dit filter dient niet hoger te zijn dan 100 Hz. Als men een hogere kantelfrequentie kiest, dan geeft de som- bas teveel hogere frequenties weer en kan de opstelling van de som- bas moeilijkheden opleveren. De som- bas kan het beste in het midden van de twee ESL's worden opgesteld.

## 10.4 Discreet actief filter 2 (6 dB per octaaf som- basfilter; kantelfrequentie instelbaar)

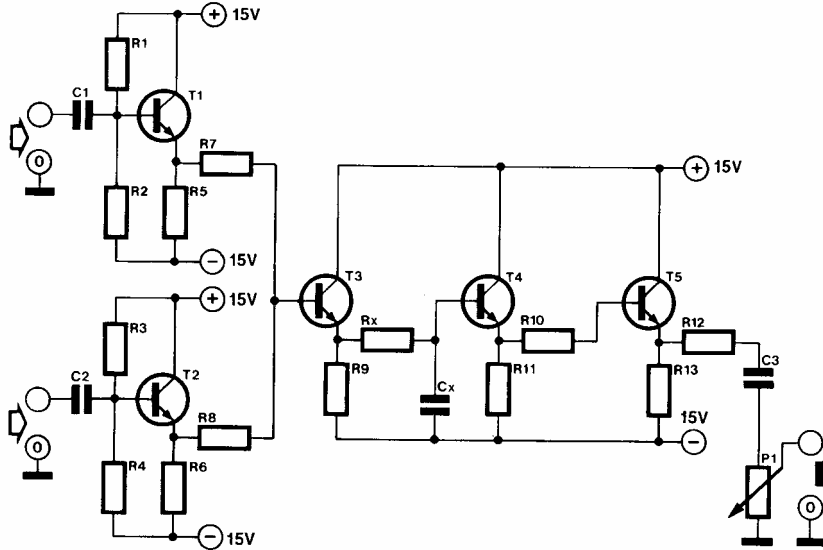
Het is bij het som- basfilter mogelijk om verschillende kantelfrequenties in te stellen (figuur 10.7). Op de print moeten dan condensatoren geplaatst worden van een van te voren bepaalde waarde, die met draadbruggen worden verbonden. De print hoeft dan niet te worden gedemonteerd om later een condensator te kunnen plaatsen met een andere waarde. Het is natuurlijk ook mogelijk om uit meerdere condensatoren te kiezen met een draaischakelaar.

## 10.5 Discreet actief filter 3

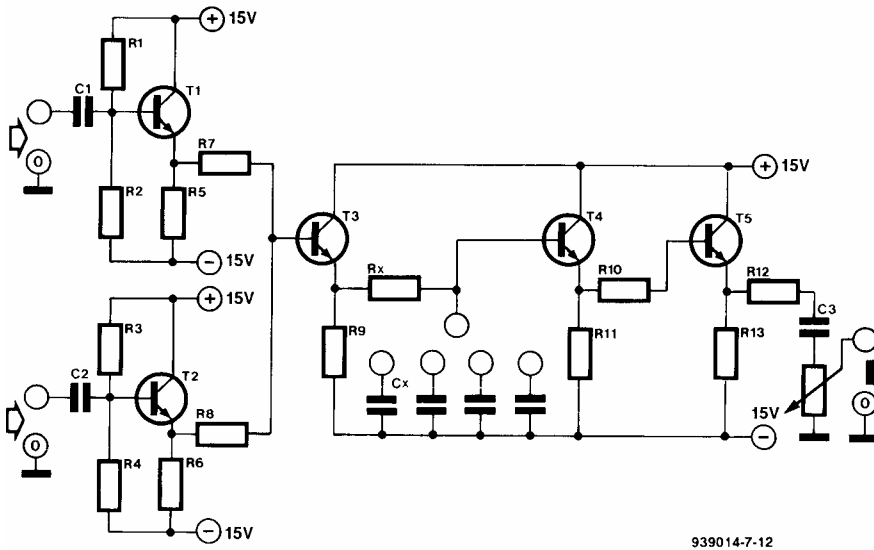
Het som- basfilter van figuur 10.6 kun je uitbreiden tot 12, 18 of 24 dB per octaaf (figuur 10.8). Er worden dan meerdere filtertrappen achter elkaar geplaatst. Men kan daarbij kiezen voor een vast ingestelde filterhelling, bijvoorbeeld 18 of 24 dB per octaaf, of voor de mogelijkheid om de verschillende filtersecties via een draaischakelaar met elkaar te verbinden. Men kan dan in het laatste geval de filterhelling op eenvoudige wijze veranderen. Door middel van het plaatsen van meerdere condensatoren kan ook de kantelfrequentie per sectie worden ingesteld. De kantelfrequentie per sectie dient daarbij op dezelfde  $C_x$ -waarde te worden ingesteld.

## 10.6 Discreet actief filter 4

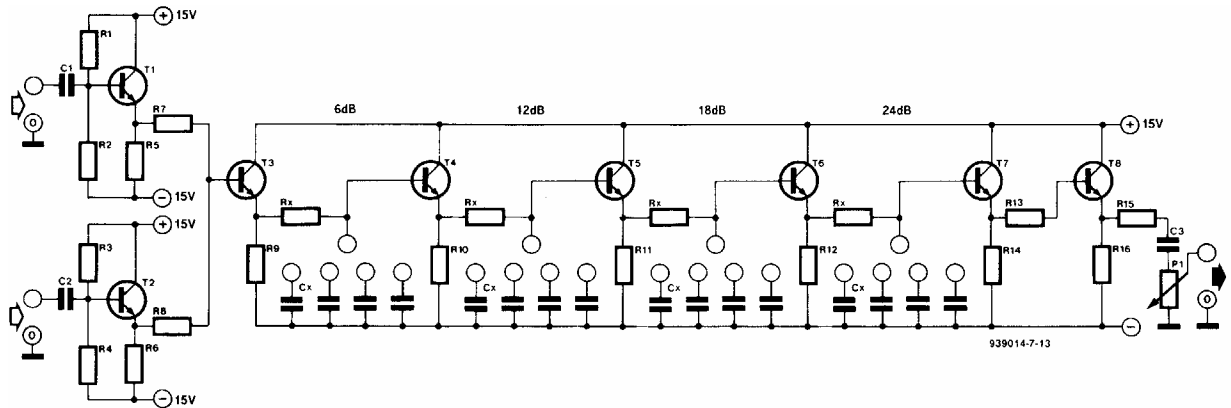
Naast een centrale subwoofer is het mogelijk om een sub-basweergever per kanaal toe te passen. Het stereosignaal wordt dan niet samengevoegd en het (mono) filter wordt dubbel uitgevoerd (figuur 10.9). Elke ESL krijgt dus zijn eigen sub-basweergever. Het is bij dit type filter aan te bevelen om de kantelfrequentie niet hoger in stellen dan 200 Hz. Dit in verband met het ontstaan van een homogeen geluidsbeeld. De sub-woofer dient voorts naast of onder de ESL te worden opgesteld.



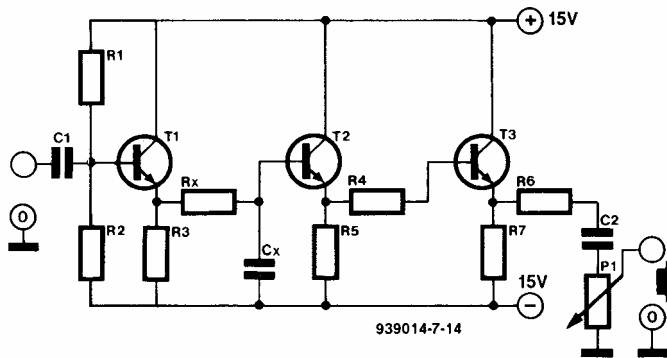
Figuur 10.6. Actief filter 1.



Figuur 10.7. Actief filter 2.



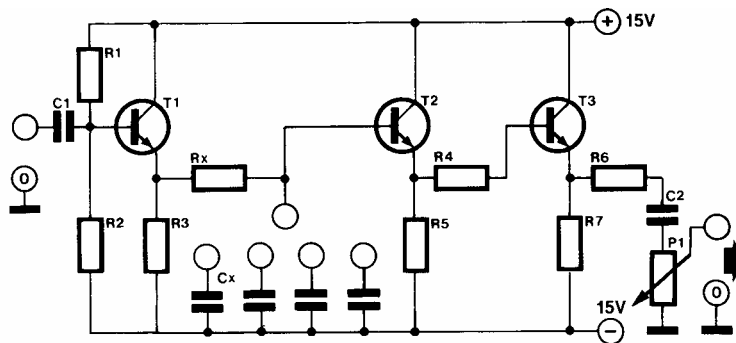
Figuur 10.8. Actief filter 3.



Figuur 10.9. Actief filter 4.

### [10.7 Discreet actief filter 5](#)

Ook bij dit (mono) sub- basfilter is het eenvoudig mogelijk om de kantelfrequentie instelbaar te maken, net als bij filter 2 (figuur 10.10).



Figuur 10.10. Actief filter 5.

### [10.8 Discreet actief filter 6](#)

Dit (mono) sub- basfilter kun je net als filter 3 uitbreiden tot een filter met instelbare filterhelling, en met instelbare kantelfrequenties (figuur 10.11).

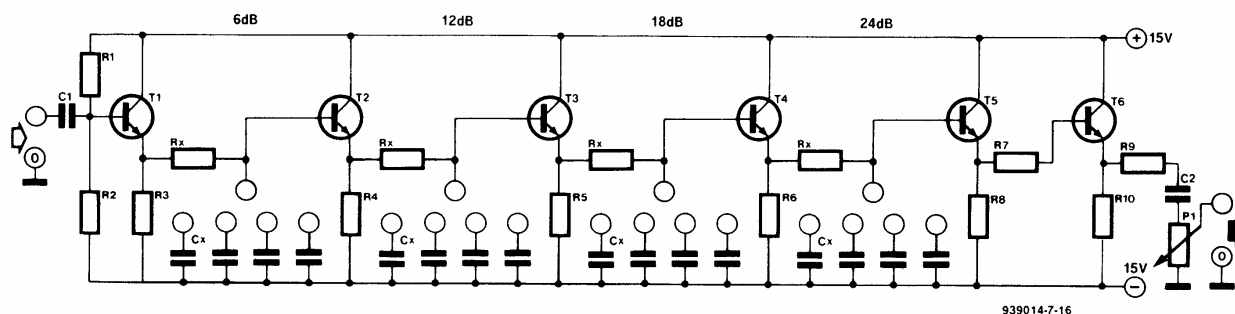
### [10.9 Discreet actief filter 7](#)

Dit filter is ontworpen voor toepassing in hybride systemen, maar kan ook worden gebruikt als (mono) tweewegfilter voor een ESL en een sub-basweergever. Zie figuur 10.12. Dit (mono) tweewegfilter dient bij stereoweergave dubbel te worden uitgevoerd.

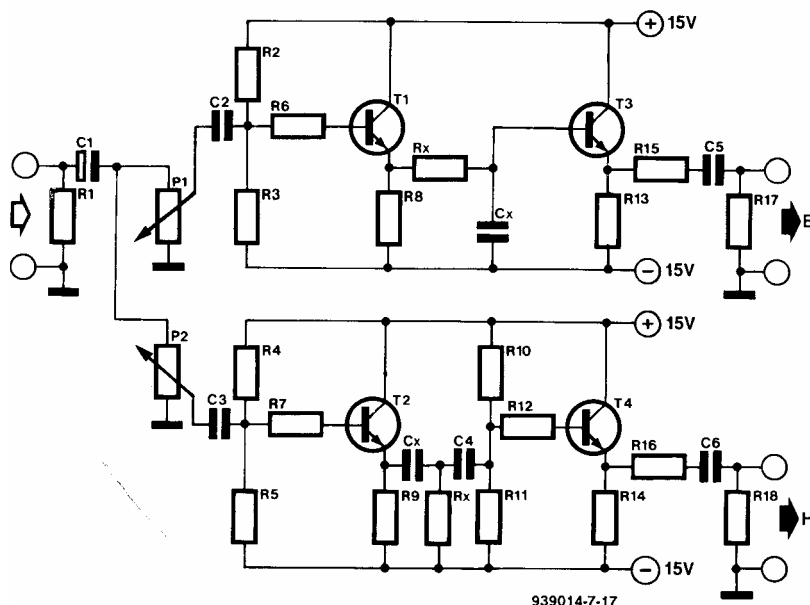
De kantelfrequentie wordt net als bij de sub- basfilters berekend met de formule:

$$2 \cdot \pi \cdot f = 1 : (R_x \cdot C_x).$$

Voor een kantelfrequentie van 400 Hz, uitgaande van  $C_x = 100 \text{ nF}$ , wordt  $R_x$  gelijk aan  $3,9 \text{ k}\Omega$ . Met twee potentiometers kan het geluidsniveau van de beide weergevers op elkaar worden afgestemd.



Figuur 10.11. Actief filter 6.



Figuur 10.12. Actief filter 7.

## [10.10 Voeding voor de filters](#)

Het schema voor het voedingsgedeelte van de verschillende discrete filters is weergegeven figuur 10.13. De +15 V en -15 V zijn met IC1 en IC2 gestabiliseerd.

Een probleem dat zich in sommige gevallen bij deze voeding kan voordoen is dat een van de IC's hoorbare ruis veroorzaakt. Voor dergelijke gevallen is een RC- filter ontworpen (figuur 10.14). Deze schakeling dient in serie tussen de voeding en het actieve filter te worden geschakeld. De ruisproblemen zijn bij gebruik van deze schakeling dan in vrijwel alle gevallen verdwenen.

## [10.11 Actief filter 8](#)

De opzet van dit filter is geheel anders dan die van de voorgaande filters (figuur 10.15). Bij dit (stereo) filter worden beide stereokanalen gefilterd met 24 dB per octaaf, bij een vaste kantelfrequentie van 200 Hz. Dit filter is met name geschikt om twee ESL's te ondersteunen met een centrale subwoofer.

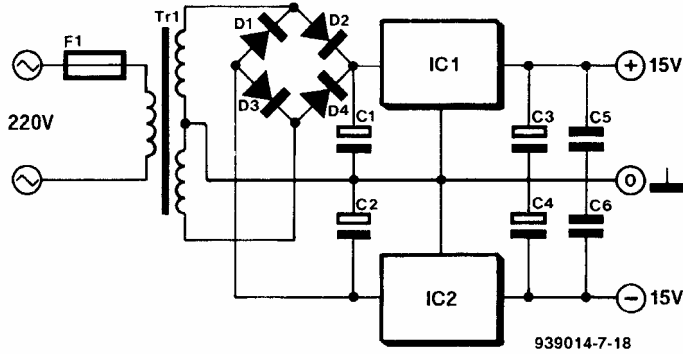
A1 en A2 bufferen respectievelijk het linker en het rechter signaal. A3/A4 en A9/A10 vormen de bijbehorende hoog- doorlaatfilters voor de ESL- satellieten. A5 telt linker en rechter kanaal bij elkaar op,



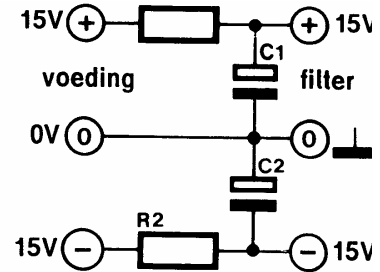
A6/A7 vormen het laag- doorlaatfilter en A8 biedt een variabele versterking. Met P1 wordt het geluidsniveau van de subwoofer aan de ESL- satellieten aangepast.

De waarden die in het schema tussen haakjes staan, zijn berekende waarden, waarvan de perfectionisten kunnen proberen om deze zo dicht mogelijk te benaderen. Voor de voeding is een symmetrisch ontwerp gekozen, waarbij veel aandacht is geschonken aan de kwaliteit van deze schakeling.

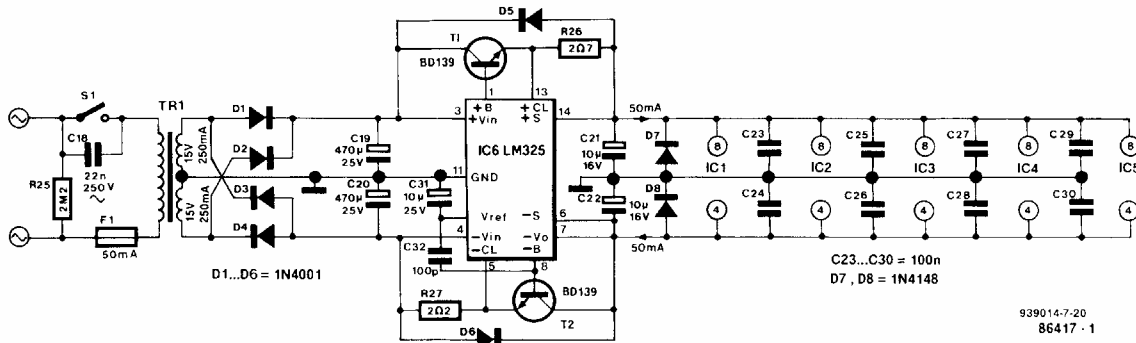
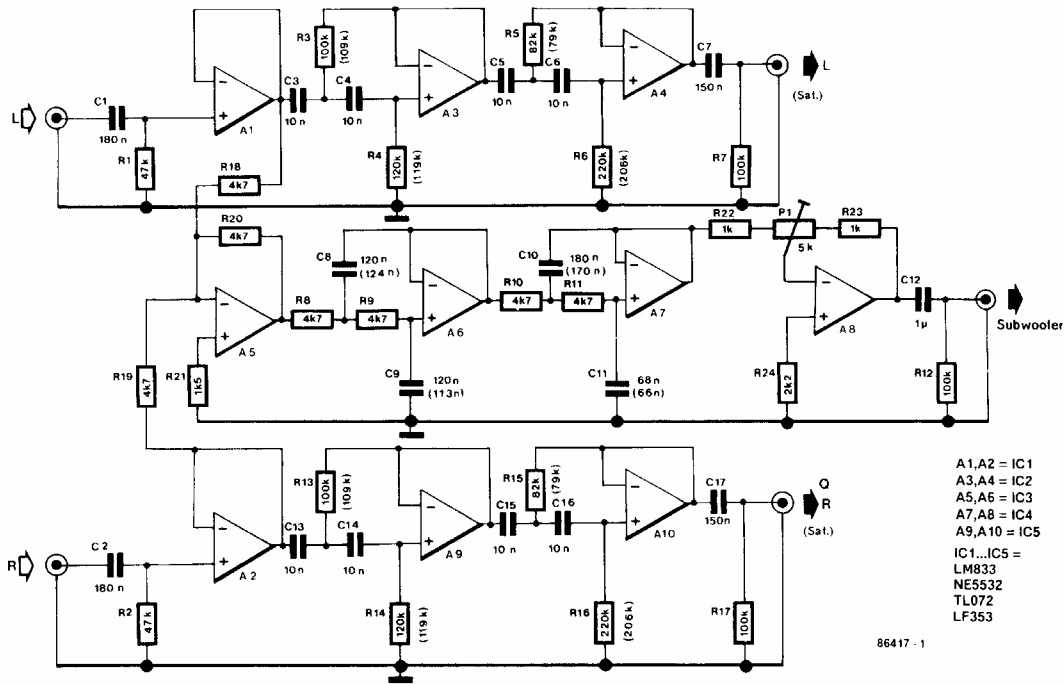
Tot slot nog de opmerking dat opamps met JFET-ingangen nogal eens stabiliteitsproblemen geven (TL074 en LF353). De versies met bipolaire ingangen (NE5532 en LM833) functioneren zonder problemen.



Figuur 10.13. Voeding voor de actieve filters 1...7.



Figuur 10.14. Een ruisfilter, als aanvulling op de voeding van figuur 10.13.



Figuur 10.15. Actief filter met filterhelling van 24 dB per octaaf.

**Onderdelenlijst voor actief filter 1 en 2**

Weerstanden (metaalfilm 0,25 W 1% of kool 0,25 W):

- R1,R3 = 180 k $\Omega$
- R2,R4 = 220 k $\Omega$
- R5,R6,R9,R11,R13 = 3,9 k $\Omega$
- R7,R8,R10 = 10 k $\Omega$
- R12 = 100  $\Omega$

Condensatoren:

C1...C3 = 1  $\mu$ F MKP

Transistoren:

T1...T5=BC414

Diversen:

P1 = 50 k $\Omega$  linear (bijvoorbeeld Alps of Bourns)

Waarden voor het som-basfilter:

Rx = 10 k $\Omega$  (vaste waarde) (metaalfilm 0,25 W 1% of kool)

Cx = MKP of styroflex

Cx (nF)Fs (Hz)

360 44

300 56

240 60

|     |     |
|-----|-----|
| 220 | 72  |
| 180 | 88  |
| 150 | 106 |
| 120 | 132 |
| 100 | 159 |

### Onderdelenlijst voor actief filter 3

Weerstanden (metaalfilm 0,25 W):

R1,R3 = 180 kΩ

R2, R4 = 220 kΩ

R5,R6,R9,R10,R11,R12,R14,R16 = 3,9 kΩ

R7,R8,R13 = 10 kΩ

R15 = 100 Ω

Condensatoren:

C1...C3=1 μF MKP

Transistoren:

T1...T8 = BC414

Diversen:

P1 = 50 kΩ lineair (bijvoorbeeld Alps of Bourns)

Waarden voor Rx en Cx

Rx = 10 kΩ (vaste instelling) (metaalfilm 0,25 W):

Cx = MKP of styroflex

| Cx (nF) | f (Hz) |
|---------|--------|
| 270     | 58     |
| 220     | 72     |
| 180     | 88     |
| 150     | 106    |
| 120     | 132    |
| 100     | 159    |
| 82      | 194    |

### Onderdelenlijst voor actief filter 4 en 5

Weerstanden (metaalfilm 0,25 W):

R1 = 180 kΩ

R2 = 220 kΩ

R3,R5,R7 = 3,9 kΩ

R4= 10 kΩ

R6 = 100 Ω

Condensatoren:

C1,C2 = 1 μF MKP

Transistoren:

T1,T2,T3 = BC414

Diversen:

P1 = 50 kΩ lineair (bijvoorbeeld Alps of Bourns)

Waarden voor Rx en Cx:

Rx = 10 kΩ (vaste instelling) (metaalfilm 0,25 W 1%)

Cx = MKP of styroflex

| Cx (nF) | Fs (Hz) |
|---------|---------|
| 220     | 72      |
| 180     | 88      |
| 150     | 106     |
| 120     | 132     |
| 100     | 159     |
| 82      | 194     |

### Onderdelenlijst voor actief filter 6

Weerstanden (metaalfilm 0,25 W 1%)

R1 = 180 k $\Omega$

R2 = 220 k $\Omega$

R3,R4,R5,R6,R8,R10 = 3,9 k $\Omega$

R7 = 10k $\Omega$

R9 = 100 $\Omega$

Condensatoren:

C1,C2 = 1  $\mu$ F MKP

Transistoren:

T1.. T6 = BC414

Diversen:

P1 = 50 k $\Omega$  lineair (bijvoorbeeld Alps of Bourns)

Waarden voor Rx en Cx:

Rx = 10 k $\Omega$  (vaste instelling) (metaalfilm 0,25 W 1%)

Cx = MKP of styroflex

| Cx (nF) | Fs (Hz) |
|---------|---------|
| 220     | 72      |
| 180     | 88      |
| 150     | 106     |
| 120     | 132     |
| 100     | 159     |
| 82      | 194     |

### Onderdelenlijst voor actief filter 7

Weerstanden (metaalfilm 0,25 W 1%)

R1 = 330k $\Omega$

R2,R4,R10 = 180 k $\Omega$

R3,R5,R11 = 220 k $\Omega$

R6,R7,R12 = 4,7 k $\Omega$

R8,R9 = 1,2 k $\Omega$

R13,R14 = 3,3 k $\Omega$

R15,R16 = 100  $\Omega$

R17,R18 = 1 M $\Omega$

Condensatoren:

C1,C2,C3,C5,C6 = 1  $\mu$  MKP

C4 = 100 nF MKP of styroflex

Transistoren:

T1...T4=BC414

Diversen:

P1,P2 = 50 k $\Omega$  lineair (bijvoorbeeld Alps of Bourns)

Waarden voor Cx en Rx:

Cx = 100 nF MKP of styroflex

Rx = metaalfilm 0,25 W 1%

| Rx              | f(Hz) |
|-----------------|-------|
| 21 k $\Omega$   | 275   |
| 15,8 k $\Omega$ | 100   |
| 13,2 k $\Omega$ | 125   |
| 10,6 k $\Omega$ | 150   |
| 8,8 k $\Omega$  | 175   |
| 7,9 k $\Omega$  | 200   |
| 6,6 k $\Omega$  | 250   |
| 5,3 k $\Omega$  | 300   |

|                |     |
|----------------|-----|
| 4,4 k $\Omega$ | 350 |
| 3,9 k $\Omega$ | 400 |
| 3,3 k $\Omega$ | 500 |
| 2,7 k $\Omega$ | 600 |

### **Onderdelenlijst voor de voeding van de discrete actieve filters**

Condensatoren:

C1,C2 = 2200  $\mu$ F 40 V

C3,C4 = 10  $\mu$ F 25V

C5,C6 = 100 nF MKT

Halfgeleiders:

D1.....D4 = 1N4004

IC1 = 7815

IC2 = 7915

Diversen:

Tr1 = trafo 2 x 15 volt 100 mA

Z1 = zekering 100 mA

RC- ruisfilter:

C1,C2 = 2200  $\mu$ F 40 V

R1,R2 = 100  $\Omega$  metaalfilm 1 W 1%