

Bild 2.3.1: Dreistufiger aktiver NF-Tiefpass (Quelle: Hans-Jürgen Kowalski)

2.3 Aktive NF-Filter

Bei den aktiven Filtern im Amateurbereich kann man zwischen Tiefpässen mit etwa 3 kHz Eckfrequenz (für SSB) und schmalen CW-Filtern mit etwa 800 Hz Mittenfrequenz sowie Notch-Filtern (Loch-Filtern) zur Störausblendung unterscheiden. In aller Regel nutzt man dazu Operationsverstärker (OPV), denn nur diese erlauben exakt reproduzierbare Lösungen. ICs mit geschalteten Kapazitäten (Switched Capacitors) liefern zwar hervorragende

Ergebnisse, sind aber für Funkamateure schwer erhältlich. Die Tiefpässe werden meist durch die Koppelkondensatoren zu Bandpässen mit etwa 300 Hz unterer Eckfrequenz. Das ist günstig, da so besonders lästige Störungen und das recht hohe Funkelrauschen der Halbleiter unterdrückt werden. Bei den CW-Filtern ist eine einstellbare Bandbreite von Vorteil mit Blick auf eventuelle Driften von Sender und/oder Empfänger. Notch-Filter müssen, um praktischen Wert zu besitzen, hingegen in der Frequenz variabel sein.

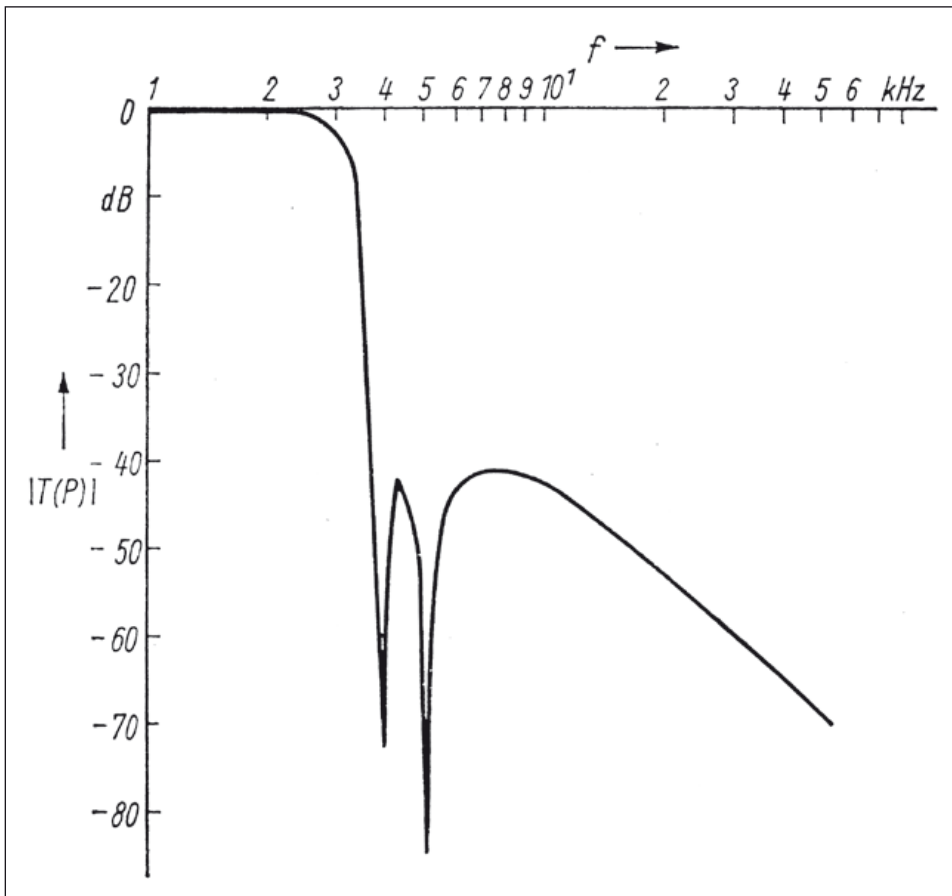


Bild 2.3.2: Frequenzgang des NF-Tiefpasses (Quelle: Hans-Jürgen Kowalski)

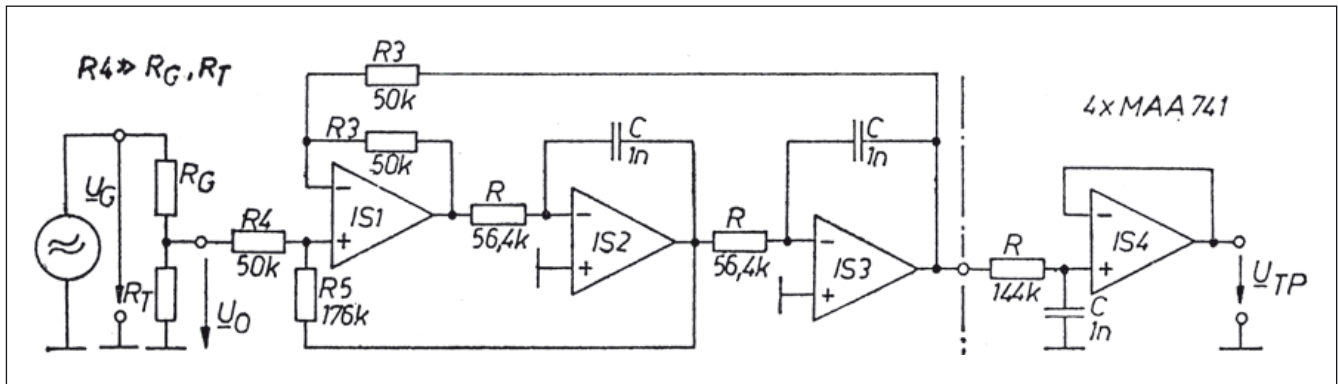


Bild 2.3.3: Tschebycheff-Tiefpass dritten Grades (Quelle: Hans-Jürgen Kowalski)

2.3.1 Tiefpässe

Bei Tiefpässen greift man gern auf die in Bild 2.3.1 links und in der Mitte zu sehende Cauer-Struktur zurück. Aber auch die etwas einfachere Beschaltung nach Sallen-Key rechts ist anzutreffen. Durch die sehr niederohmigen Ausgangswiderstände der OPVs entsteht eine fast perfekte Kaskadeschaltung, d.h., die Frequenzgänge der drei einzelnen Stufen werden zusammen voll wirksam. Aus z.B. einem Abfall von 30 dB/Dekade wird nach einer zweiten, gleichen Stufe ein Abfall von 60 dB/Dekade. Als Eckfrequenz wurde 3.180 Hz gewählt, also ein für den Amateurfunk sehr guter Wert. Bild 2.3.2 zeigt den Amplitudengang des Musters. Alle Frequenzen über 3,5 kHz werden mindestens 40 dB unterdrückt. Es sind viele Operationsverstärker-Typen (bipolar oder BiFET) geeignet; man beachte aber die symmetrische Speisung.

In Bild 2.3.3 wird ein Tschebycheff-Tiefpass dritten Grades gezeigt, gefolgt von einem durch einen Puffer entkoppelten RC-Tiefpassglied mit 1,1 kHz Grenzfrequenz. Für korrekte Funktion muss die Ansteuerung niederohmig erfolgen. Die Welligkeit im Durchlassbereich ist hier aufgrund

der einfachen Schaltung 2 dB. Die Eckfrequenz ist 3 kHz. Es lassen sich gut zwei duale, moderne OPVs einsetzen.

Einen einfachen, nicht verstärkenden Tiefpass zeigt Bild 2.3.4. Die Eckfrequenz ist 10 kHz. Diese Filter arbeiten mit $C1 = 2 \times C2$ am besten, weshalb man drei gleiche Kondensatoren nehmen und zwei davon für C1 parallel schalten kann. Drittelt man die angegebenen Kapazitäten, kommt man auf 3,3 kHz Eckfrequenz. Der Betrieb an einfacher Spannung ist möglich, wenn man die halbe Betriebsspannung über einen Widerstand von 100 kOhm an Pin 3 legt.

Einen verstärkenden Tiefpass zeigt Bild 2.3.5. Da nur ein OPV benutzt wird, ist die Filterwirkung nicht sehr ausge-

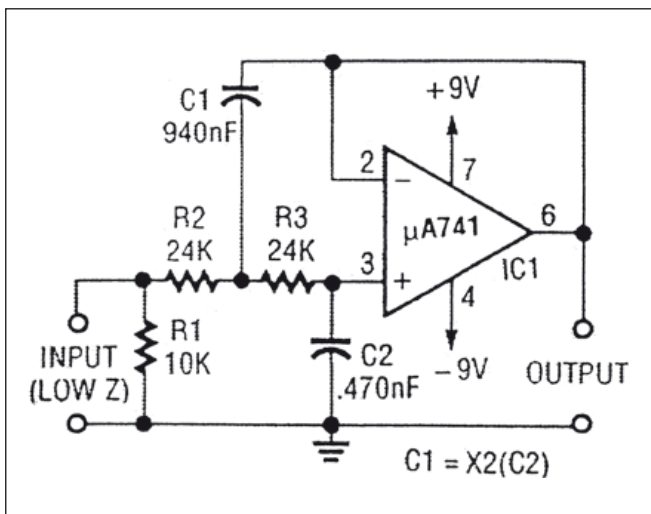


Bild 2.3.4: Einfaches aktives Butterworth-Tiefpassfilter

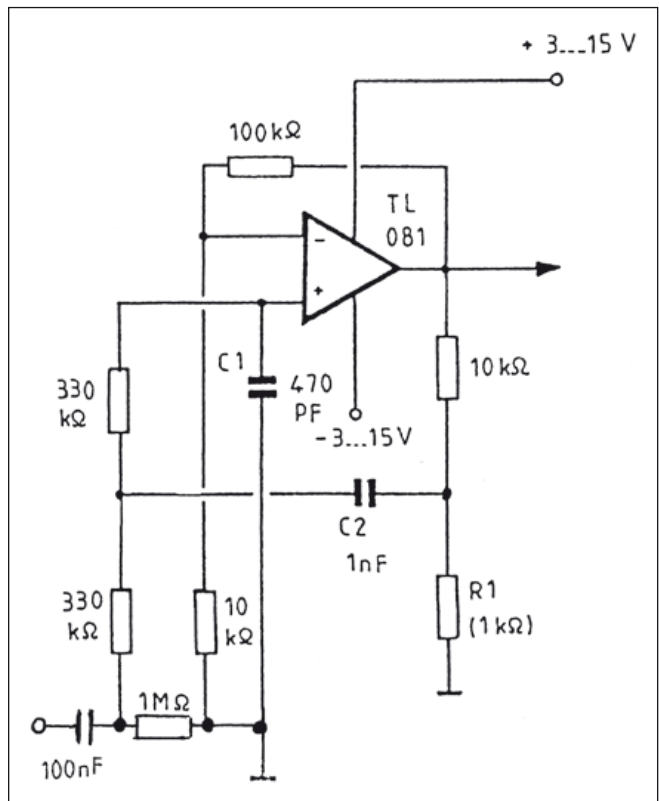


Bild 2.3.5: Mit 20 dB verstärkender aktiver Tiefpass

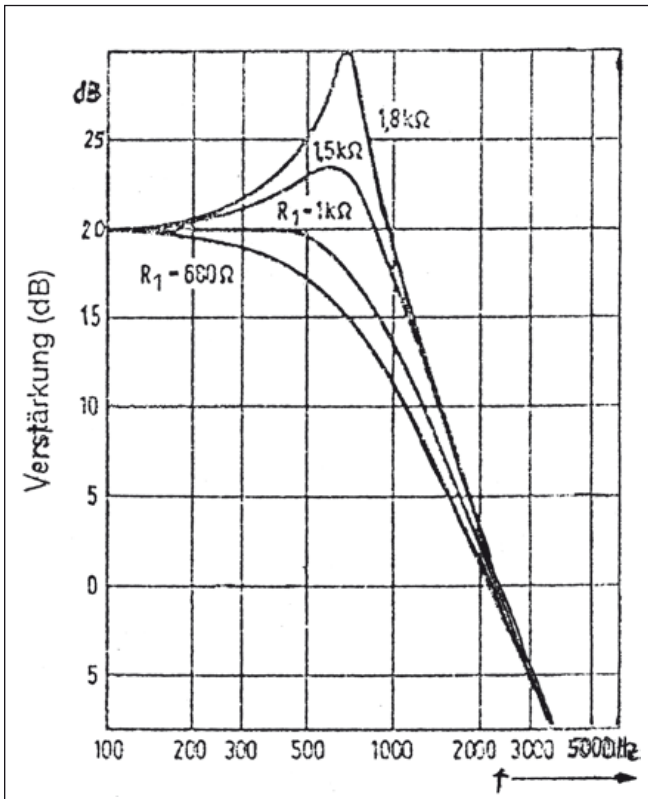


Bild 2.3.6: Frequenzgang des verstärkenden Tiefpasses

prägt (Bild 2.3.6). R1 sollte für einen optimalen Frequenzgang 1 kOhm betragen. Halbiert man C1 und C2, ergibt sich die doppelte Eckfrequenz. Legt man den Pluseingang des OPVs über 1 MOhm an halbe Betriebsspannung, kann man eine einfache Versorgung verwenden.

In Bild 2.3.7 wird ein Tiefpassfilter vierter Ordnung für

10 kHz Eckfrequenz dargestellt. Die Widerstände an den Minuseingängen der OPVs ermöglichen die Verwendung identischer Kapazitäten und erlauben eine Verstärkung, die hier 8,3 dB beträgt. Mit je 330 pF sollte man auf etwa 3 kHz Eckfrequenz kommen. Der Abfall erfolgt mit mindestens 40 dB/Oktave. Man wird einen modernen Doppel-OPV benutzen.

Damit ein solches aktives Filter exakt funktioniert, muss man es sehr niederohmig ansteuern. Ist dies in der Praxis nicht gewährleistet, weil das Signal z.B. von einer einfachen Transistorstufe oder einem aktiven Mischer kommt, sollte man einen Puffer zwischenschalten. Dies ist der OPV ganz links in Bild 2.3.8. Ansonsten sind hier drei einzelne Tiefpässe kaskadiert. Man kann mit 10-nF-Kondensatoren arbeiten und bei C4, C5 und C6 zwei parallel schalten. Für den Amateurfunk wähle man Widerstände für 2.500 Hz Eckfrequenz. Da diese Schaltung nicht verstärkt und direkt gekoppelt ist, kann sie einfach versorgt werden. Die Betriebsspannung von 12...30 V wird dazu geteilt auf den Pluseingang des Puffers gegeben.

2.3.2 CW-Filter

In Bild 2.3.9 wird die Schaltung eines CW-Filters mit variabler Bandbreite gezeigt. Es arbeitet mit einem RC-Netzwerk im Gegenkopplungszweig. Die Verschiebung der Frequenz erfolgt mit dem Poti unten, mit welchem die Symmetrie dieses Netzwerks gestört werden kann. Es gelten folgende Formeln:

$$\text{Nennfrequenz} = \frac{0,16}{C \times \sqrt{3 R_1 R_2}}$$

$$R_1 = R_{1A} + R_{1B}$$

$$R_3 = 6 (R_1 + R_2)$$

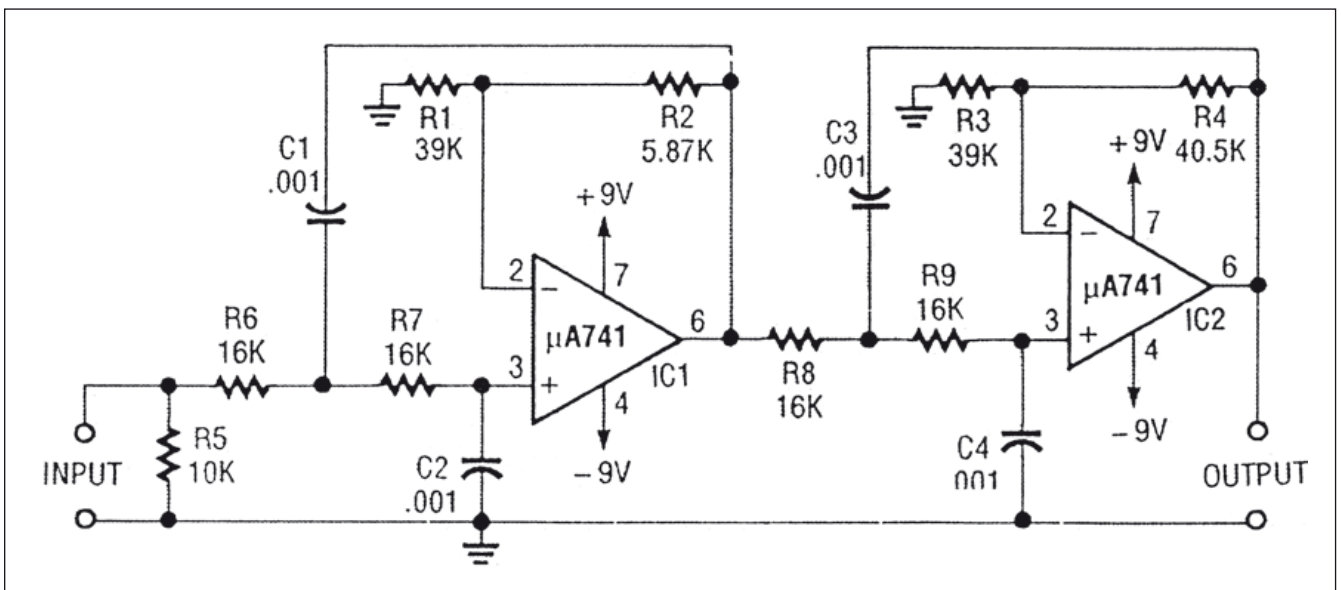


Bild 2.3.7: Kaskadiertes aktives Tiefpassfilter mit $4 \times 1 \text{ nF}$ (Quelle: Electronics Now)

Aktive NF-Filter

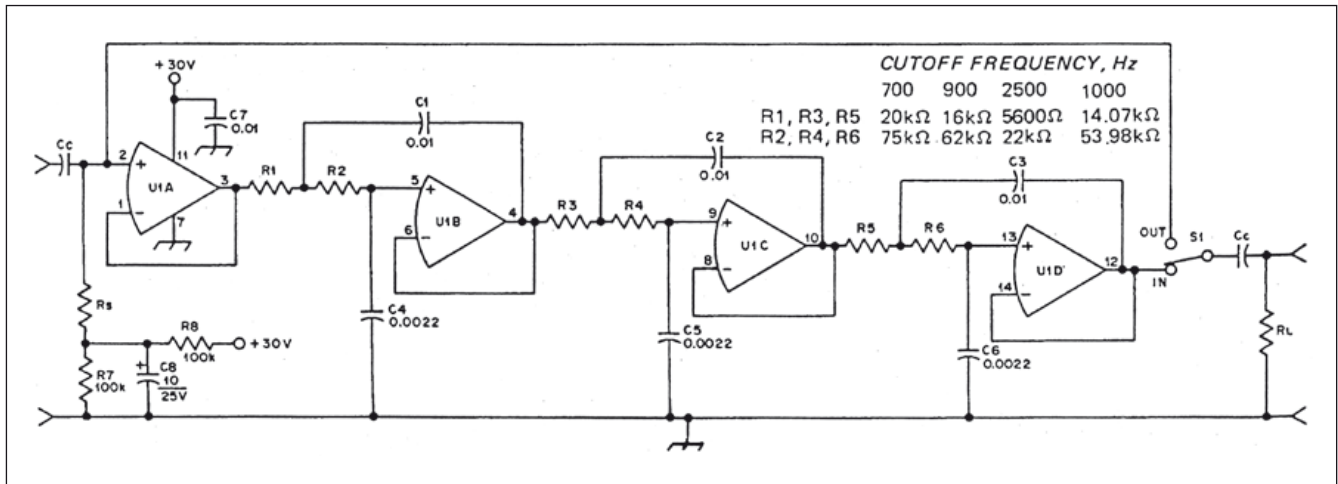


Bild 2.3.8: Kaskadiertes aktives Tiefpassfilter mit Puffer im Eingang (Quelle: EDN Magazine)

Hier ist eine Einstellung von 55 bis 550 kHz möglich. Will man zwischen etwa 400 Hz und 2,5 kHz einstellen können, wählt man für die Kapazitäten 56, 62 oder 68 nF (aber einheitlich). Die Güte (Mittenfrequenz / -3-dB-Bandbreite) ist mit etwa 250 recht hoch. Betrieb an einfacher Spannung ist möglich, wenn man den Pluseingang des OPVs mit der halben Betriebsspannung versorgt.

Das klassische Netzwerk für solche Filter ist das Doppel-T-Netzwerk. Man sieht es in Bild 2.3.10 oben. Es hast sich schon in der Technik mit bipolaren Transistoren bewährt. Die Übertragungskurve dieser Schaltung zeigt Bild 2.3.11. Man kann diese einfache Schaltung leicht für einfache Versorgung herrichten, indem man den Widerstand 10 kOhm von Masse wegnimmt und an halbe Betriebsspannung legt.

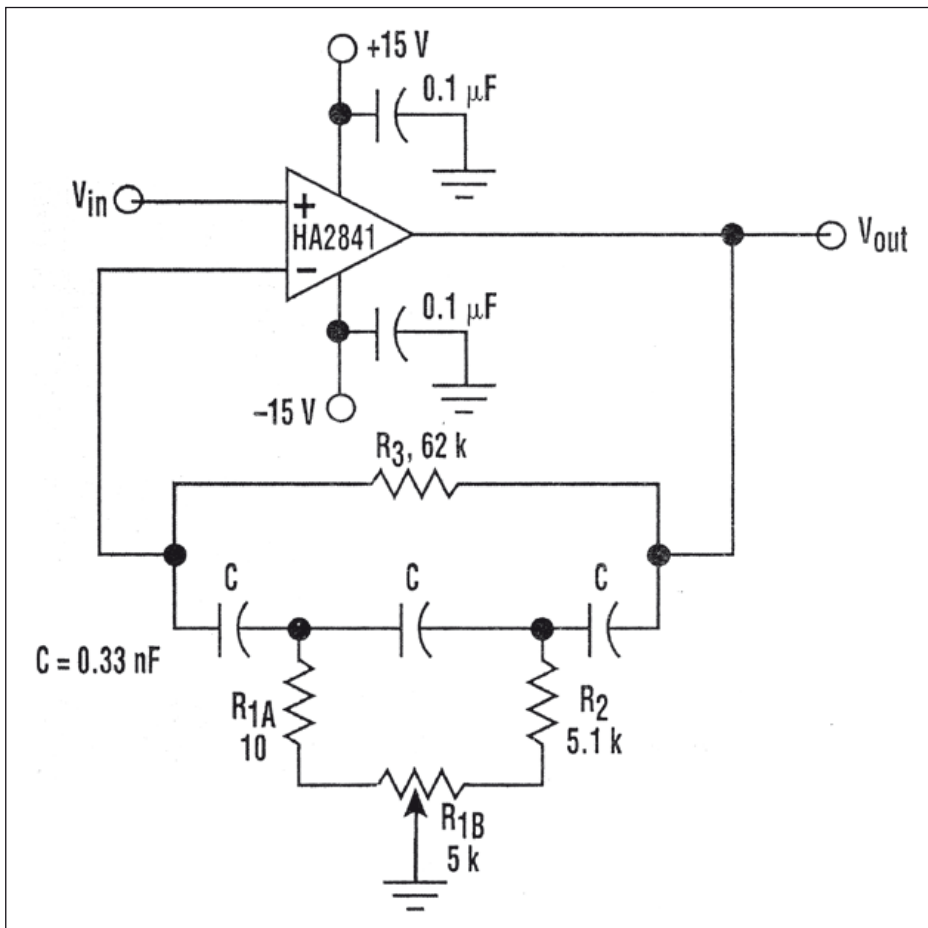


Bild 2.3.9: Einfaches CW-Filter mit variabler Bandbreite und hoher Güte (Quelle: Electronic Design, February 20, 1995)

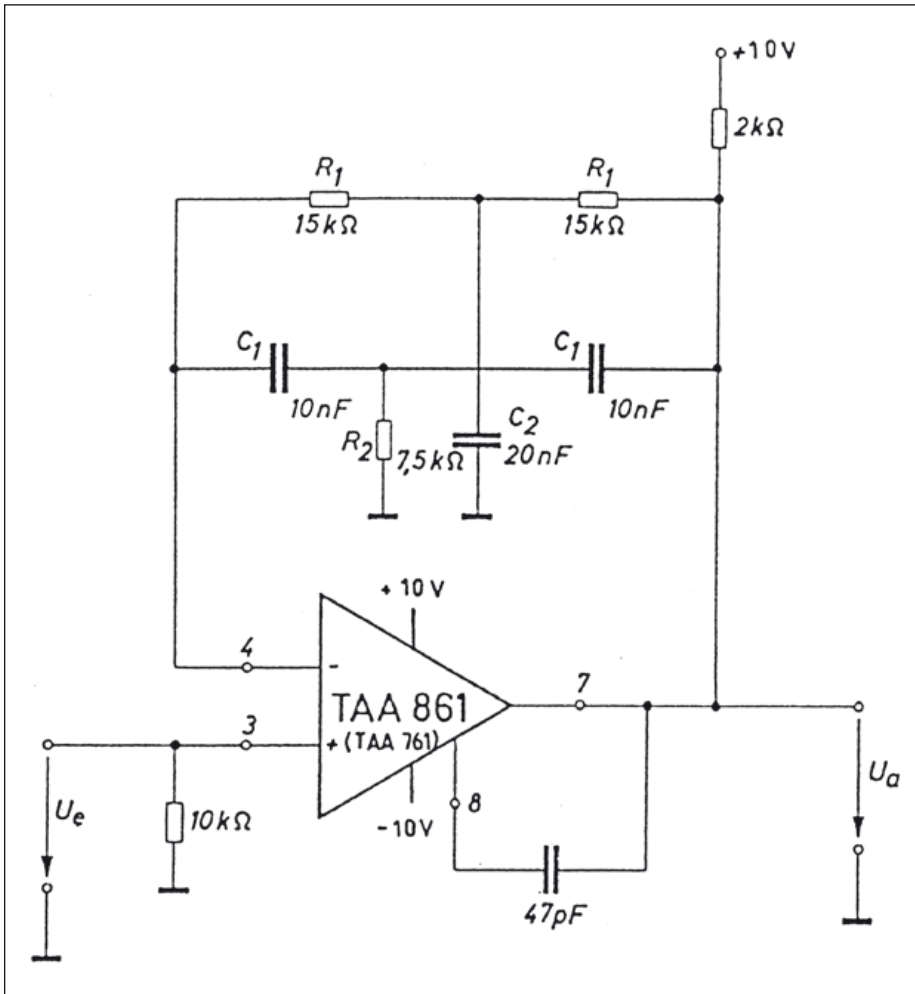
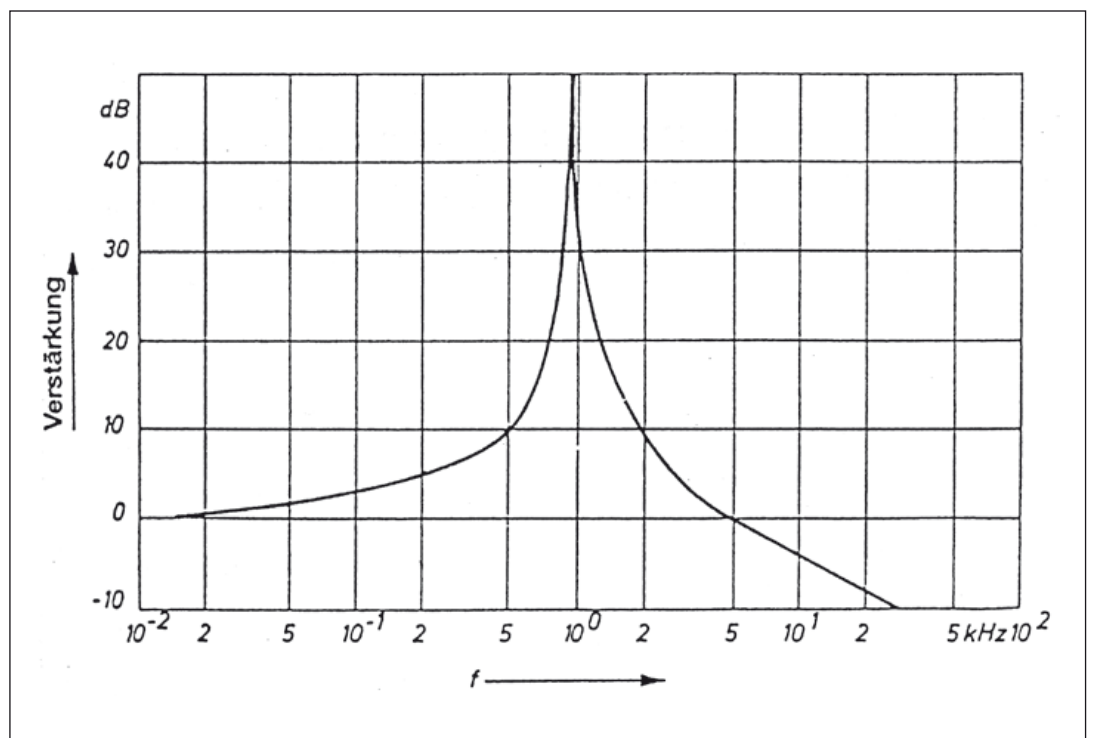


Bild 2.3.10: Einfaches CW-Filter mit doppeltem T-Filter-Netzwerk

Bild 2.3.11: Übertragungskurve des einfachen CW-Filters



Aktive NF-Filter

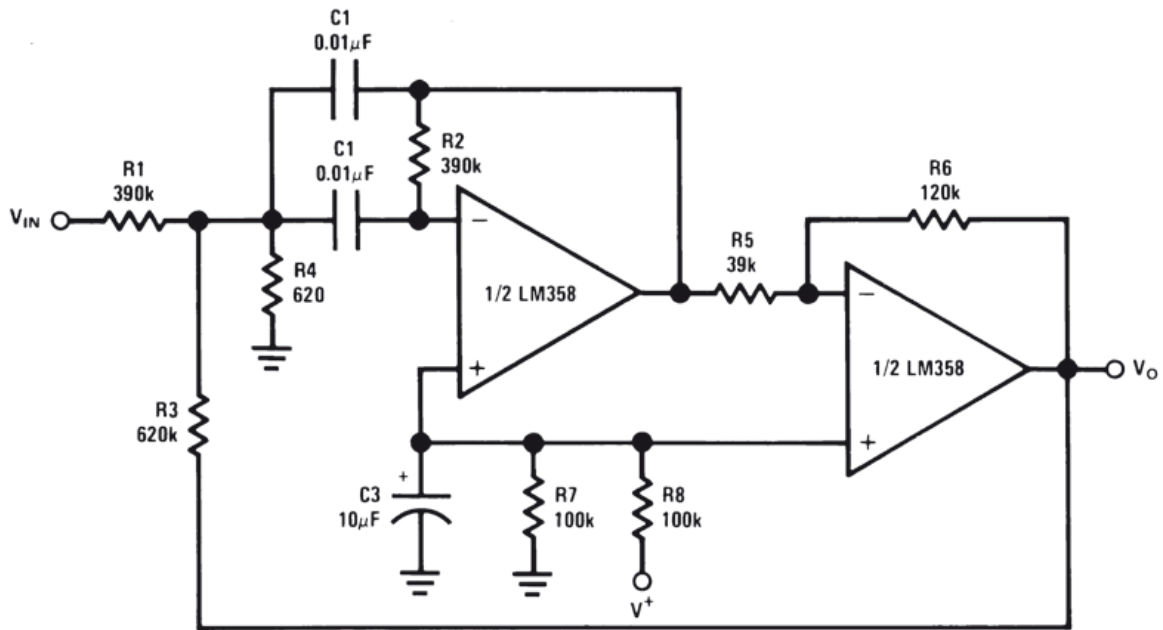


Bild 2.3.12: Aktives CW-Filter mit zwei OPVs (Hersteller-Applikation)

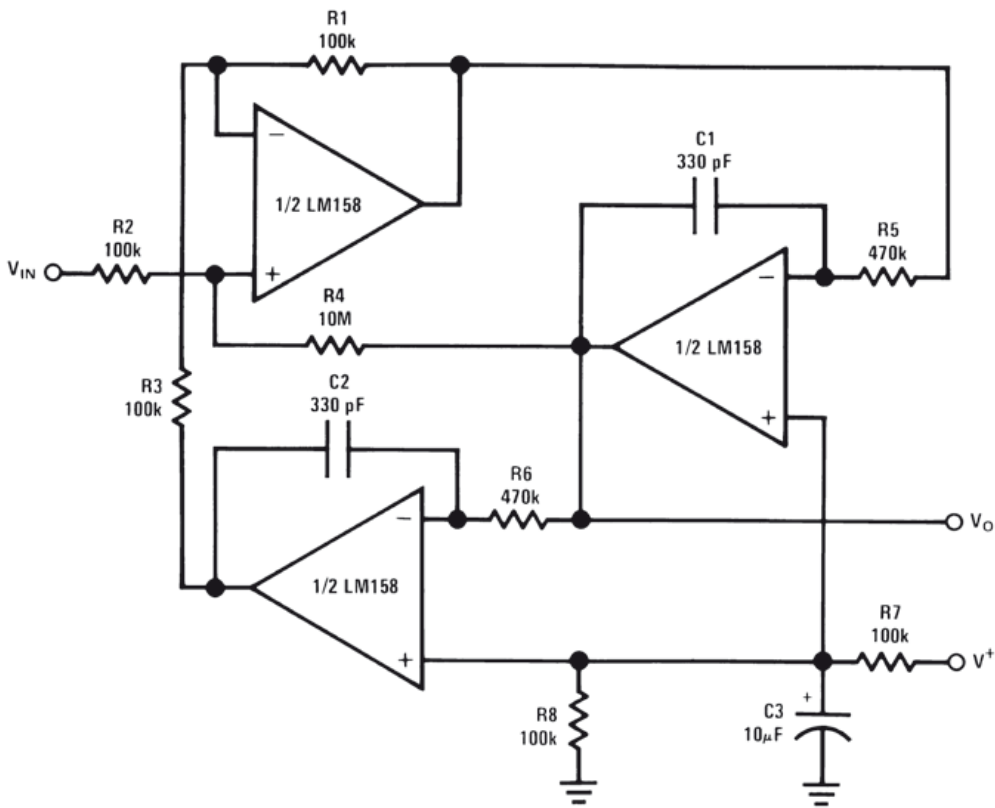


Bild 2.3.13: Aktives CW-Filter mit drei OPVs (Hersteller-Applikation)