

Operationsverstärker in Theorie und Praxis Teil 4

In diesem Teil unserer Serie wollen wir uns mit frequenzabhängigen Operationsverstärker-Schaltungen, speziell Filter- und Selektivverstärker-Schaltungen befassen.

Filterschaltungen

Dass Operationsverstärker ein frequenzabhängiges Verhalten und eine obere Grenzfrequenz aufweisen, haben wir ja, wie die frequenzabhängige Gegenkopplung, bereits in den ersten Folgen betrachtet. Bereits bei der Diskussion um das Verhalten des nicht invertierenden, gegengekoppelten Verstärkers stellte sich dessen Tiefpassverhalten bei Beschaltung mit einem RC-Glied heraus.

Solch eine Schaltung ist also bereits eine einfache Filterschaltung. Diese Schaltungen dienen dazu, den Frequenzgang gezielt zu beeinflussen. Einfache, also passive RC-Glieder haben den Nachteil, nicht nur im gewünschten Frequenzbereich eine Dämpfung hervorzurufen, sondern auch in dem Frequenzbereich, der eigentlich unbeeinflusst durchgelassen werden soll. Realisiert man ein solches Filter jedoch mit einem OP, kann man solche Dämpfungen

im Durchlassbereich ausgleichen - man spricht von einem aktiven Filter.

Tiefpass

Die in Abbildung 29 gezeigte Schaltung stellt ein einfaches, aktives Tiefpassfilter mit einem invertierenden OP dar, das jedoch noch einen relativ flachen Abfall

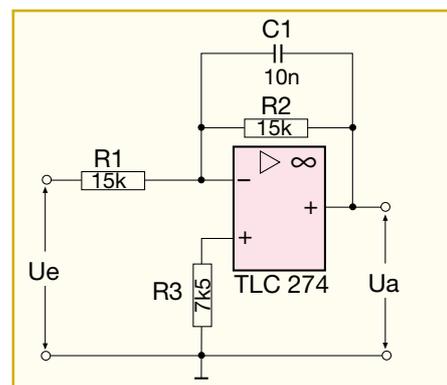


Bild 29: Einfache, aktive Tiefpass-Schaltung

der Frequenzgangkurve oberhalb der Grenzfrequenz aufweist.

Diese errechnet man wie folgt:

$$f_o = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R2 \cdot C1}$$

Der Verstärkungsabfall ab der Grenzfrequenz beträgt hier 20 dB/Dekade.

Für einen steileren Abfall des Filters greift man zu einem Filter höherer Ordnung. Hier werden durch Einbeziehung mehrerer Tiefpassglieder in den Gegen-

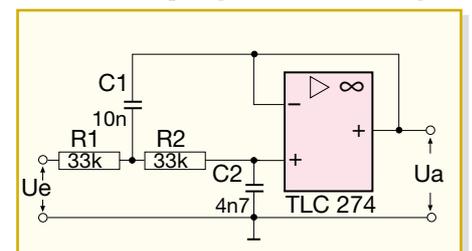


Bild 30: 700-Hz-Tiefpass 2. Ordnung

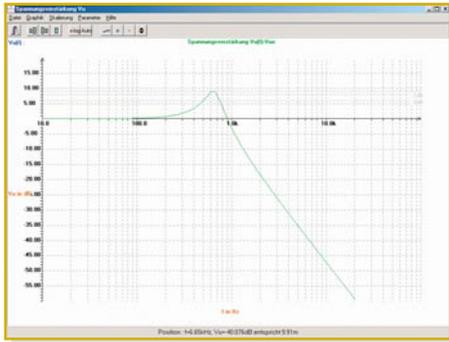
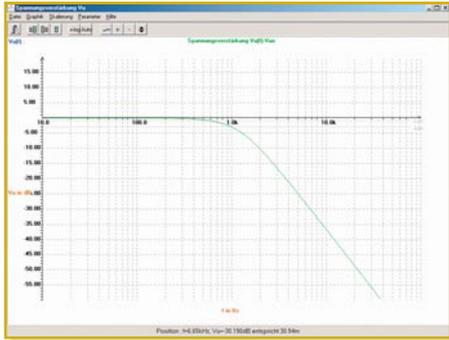


Bild 31: Der Frequenzgang macht den Unterschied: oben einfacher Tiefpass, unten Tschebyscheff-Filter 2. Ordnung

kopplungs-zweig deutlich steilere Amplitudenabfälle oberhalb der Grenzfrequenz erzielt. In Abbildung 30 ist eine solche RC-Tiefpass-Schaltung 2. Ordnung zu sehen, die hier eine Grenzfrequenz von 700 Hz aufweist. In der Praxis greift man sehr oft zu dieser Standardschaltung, da sie bereits bei geringem Bauelementeaufwand eine gute Wirksamkeit zeigt. Abbildung 31 zeigt den Vergleich zwischen zwei auf 1 kHz

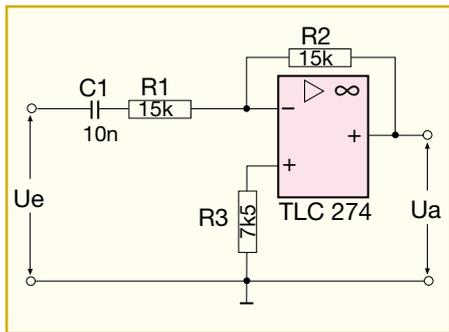


Bild 32: Einfache, aktive Hochpass-Schaltung

dimensionierten Filtern, einmal ein einfaches niedriger Güte und einmal ein so genanntes Tschebyscheff-Filter 2. Ordnung. Der Preis für den deutlich steileren Abfall bei letzterem ist allerdings ein deutlicher Amplitudenanstieg kurz vor der Grenzfrequenz.

Soll die Wirkung weiter verstärkt werden, setzt man in der Operationsverstärkertechnik oft keine komplizierteren Filter noch höherer Ordnung ein, stattdessen werden z. B. zwei dieser Filter in Reihe geschaltet.

Hochpass

Ein Hochpass hat die Aufgabe, nur Frequenzen oberhalb einer definierten Grenzfrequenz passieren zu lassen. Deshalb sind hier die Filterkurven quasi spiegelbildlich zu denen des Tiefpasses angeordnet. Auch hier gelten bezüglich Verstärkung der Schaltung und Filtersteilheit prinzipiell die gleichen Aussagen wie beim Tiefpass. Abbildung 32 zeigt eine einfache Hochpass-Schaltung. Die frequenzbestimmenden Bauteile sind hier C 1 und R 1. Die Grenzfrequenz ergibt sich wie folgt:

$$f_0 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R_1 \cdot C_1}$$

Bis zu dieser Grenzfrequenz steigt die Verstärkung mit 20 dB/Dekade an.

Auch hier kann man mit Filtern höherer Ordnung eine deutlich höhere Steilheit der Filterkurve erreichen. In Abbildung 33 ist ein Hochpassfilter 2. Ordnung zu sehen, das bereits einen Verstärkungsanstieg von ca. 40 dB/Dekade bis zur Grenzfrequenz realisiert.

Oberhalb der Grenzfrequenz hat das aktive Hochpass-Filter eine Verstärkung von 1.

Bandpass

Der Bandpass gehört zu den selektiven Schaltungen, die die Aufgabe haben, nur einen ganz bestimmten Frequenzbereich passieren zu lassen.

Ein Bandpass lässt sich sehr einfach durch das Einfügen eines Doppel-T-Filters in den Gegenkopplungs-zweig realisieren, wie Abbildung 34 in einem einfachen Beispiel zeigt.

Hier heißt die mit wiederum der gleichen Formel wie beim Hochpass ermittelte Grenzfrequenz Resonanzfrequenz. Die Formel gilt bei diesem Filter unter der Voraussetzung, dass $R_1 = 2 \cdot R_2$ und

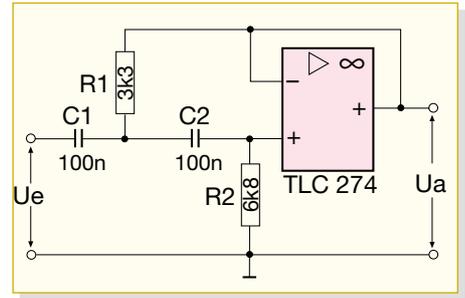


Bild 33: 330-Hz-Hochpass 2. Ordnung

$C_2 = 2 \cdot C_1$ ist. Die dargestellte Dimensionierung ergibt eine Resonanzfrequenz (f_0) von ca. 1 kHz. Schaut man sich die zugehörige Filterkurve an, kann man die Wirkungsweise der Filterkombination leicht nachvollziehen. Im gesperrten Frequenzbereich ($f < f_0$) wird das Signal gedämpft ($V < 1$), hier wirkt die Gegenkopplung über die beiden Widerstände R 1. Steigt die Frequenz, sinkt im Gegenzug die gegengekoppelte Spannung ab, bis sie bei Erreichen der Grenzfrequenz nahezu bei Null liegt. Bei Überschreiten der Grenzfrequenz kommt nun der andere Filterzweig voll zur Wirkung, die Gegenkopplung verstärkt sich und die Verstärkung nimmt wieder ab, bis bei $f > f_0$ wieder $V = 1$ erreicht wird.

Abbildung 35 zeigt ein Anwendungs-Beispiel aus der Praxis. Hier wurde ein Bandpass-Filter 2. Ordnung eingesetzt, um in einem Satelliten-Antennenmessgerät das Vorhandensein des 22-kHz-Signals eindeutig anzeigen zu können. IC 1 stellt mit seiner Peripherie das Bandpass-Filter mit einer Resonanzfrequenz von 22 kHz dar, in IC 2 erkennen wir einen Komparator. Nur, wenn ein 22-kHz-Signal vorhanden ist, gibt IC 1 eine genügend hohe Signalspannung ab, um den Komparator umschalten zu lassen. Die LED an dessen Ausgang zeigt als Indikator nur das Vorhandensein eines 22-kHz-Signals an.

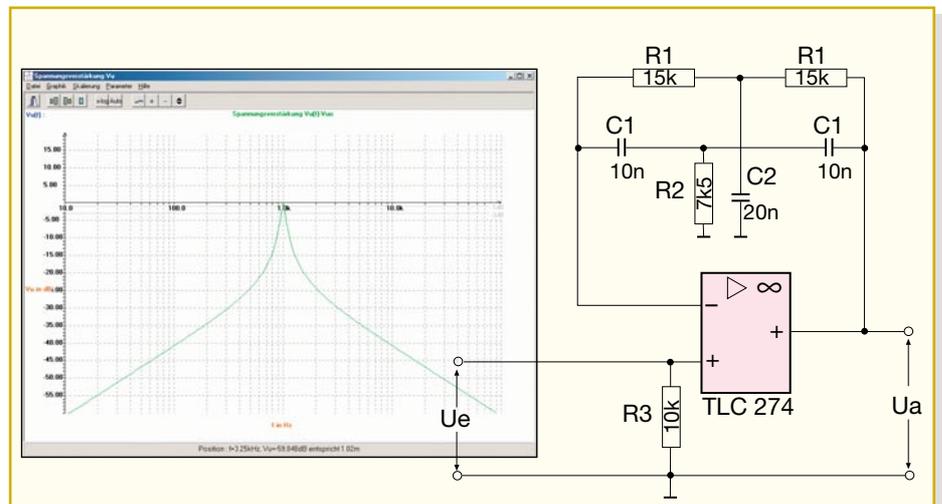


Bild 34: Bandpass-Schaltung mit 1 kHz Resonanzfrequenz (rechts). Die Frequenzgangkurve zeigt die prinzipielle Wirkung eines Bandpasses (links).

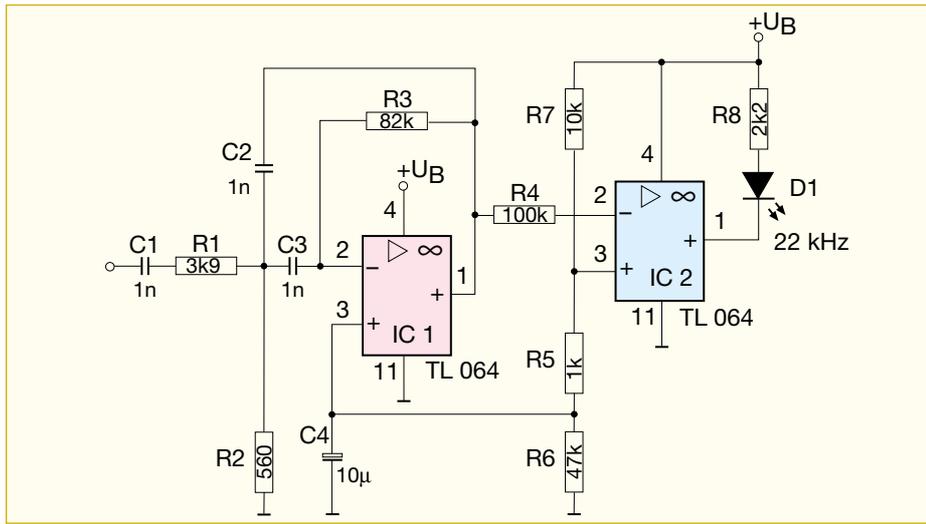


Bild 35: Bandpass-Anwendung - der 22-kHz-Indikator

die Beschreibung der Funktion dieses Netzwerkes gehen wir zunächst davon aus, dass sich alle drei Potis in Mittelstellung befinden.

Betrachtet man die mit R 5, R 8, R 11 und C 9 realisierte Basseinstellung, so befindet sich die Widerstandsbahn von R 8 jeweils zur Hälfte in Reihe zu R 5 und R 11. Der Kondensator C 9 ist für die mittleren und hohen Frequenzen relativ niederohmig und überbrückt somit das Poti für diese Frequenzanteile. Bewegt man nun den Schleifer von R 9, wird die Gegenkopplung für diese tiefen Frequenzen im jeweiligen Widerstandsverhältnis zu R 5 oder R 11 verändert und damit die Verstärkung der tiefen Frequenzanteile verringert oder erhöht.

Nach nahezu dem gleichen Prinzip arbeitet die Mitteneinstellung. Hier überbrückt C 10 das Poti allerdings nur für höhere Frequenzanteile, sodass sich das

Bandsperr

Die Bandsperr (Abbildung 36) stellt das Gegenstück zum Bandpass dar, sie hat die Aufgabe, eine (Stör-) Frequenz möglichst schmalbandig auszublenden.

Auch hier gilt wieder die gleiche Formel zur Berechnung der Resonanzfrequenz unter der Bedingung: $R_1 = 2 \cdot R_2$ und $C_2 = 2 \cdot C_1$. Mit der vorgestellten einfachen Schaltung erreicht man eine Resonanzfrequenz von 1 kHz.

Ein wenig Praxis

Zur Abrundung des Themas „Frequenzabhängige Schaltung“ wollen wir noch eine praktische Anwendungsschaltung besprechen, bei der gleich mehrere der besprochenen Prinzipien und bereits früher gezeigter Schaltungslösungen zur Anwendung kommen - eine Klangregelschaltung.

Diese ist vollständig in Abbildung 37 dargestellt. IC 1 versorgt die Schaltung mit einer konstanten Gleichspannung. Da der Operationsverstärker eine symmetrische Betriebsspannung erfordert, wird hier zum früher gezeigten „Trick“, der virtuellen Masse, gegriffen. R 2 und R 3 legen den Arbeitspunkt beider OPs auf halbes Betriebsspannungspotential und schon ist quasi eine symmetrische Betriebsspannung erzeugt.

IC 2 A arbeitet als Impedanzwandler,

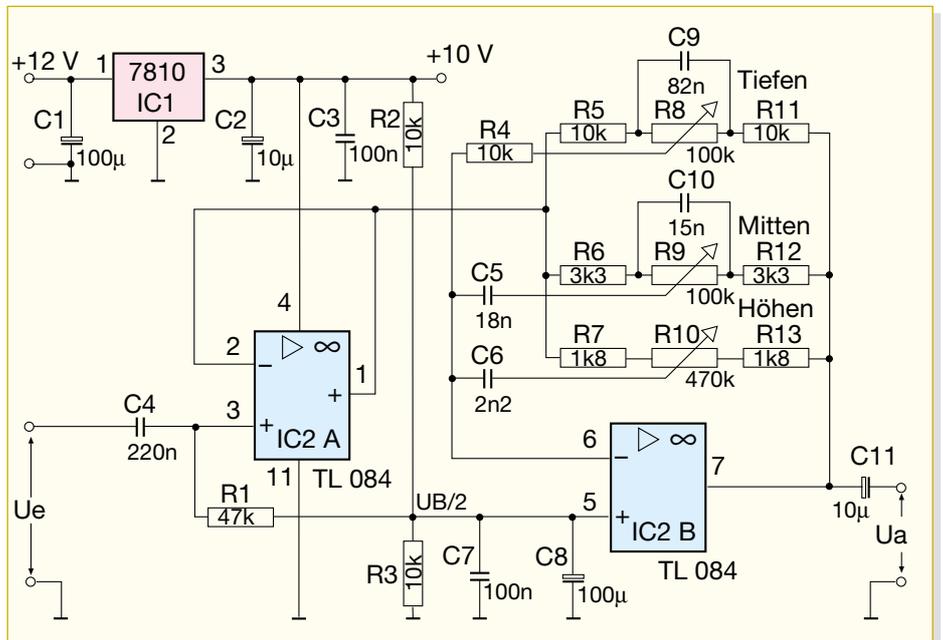


Bild 37: Praktische Filter-Anwendung in einer Klangregelschaltung

der zum einen einen hohen Eingangswiderstand gewährleistet und zum anderen das Signal niederohmig auskoppelt. Dieses gelangt in das Gegenkopplungsnetzwerk des als invertierender Verstärker arbeitenden IC 3.

Dieses erlaubt die Anhebung bzw. Absenkung sowohl der Höhen und Tiefen als auch des mittleren Frequenzbereiches. Für

Bewegungen des Schleifers von R 9 auch auf mittlere Frequenzen auswirkt. Da der in Reihe zum Schleifer liegende C 5 für tiefe Frequenzanteile hochohmig ist, bleiben hier nur noch die mittleren Frequenzen im Frequenzband zur Einstellung übrig.

Der Gegenkopplungsweig für die hohen Töne schließlich verzichtet auf einen Kondensator über dem Poti R 10, wodurch dieses die Verstärkung des gesamten Frequenzbereich bis zur Grenzfrequenz einstellbar macht. C 6 schließlich ist so dimensioniert, dass die mittleren und unteren Frequenzbereiche abgetrennt werden und nur die Verstärkung des oberen Bereichs einstellbar ist.

Damit wollen wir das Thema abschließen und uns im nächsten Teil der Serie der Schwingungserzeugung mit und der Spannungsversorgung von Operationsverstärkern zuwenden.

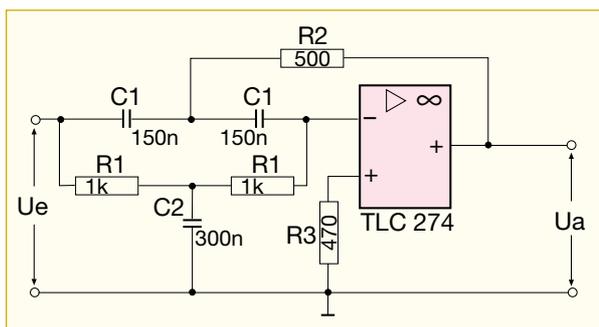


Bild 36: Die Bandsperr blendet eine bestimmte Frequenz schmalbandig aus