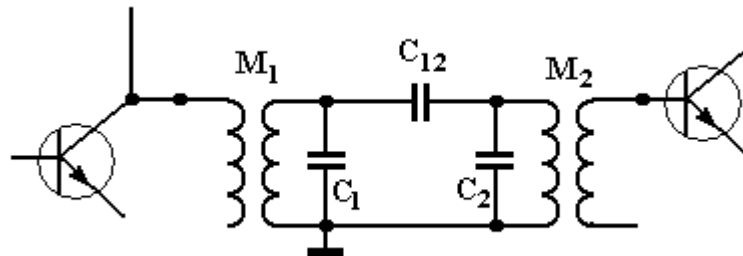


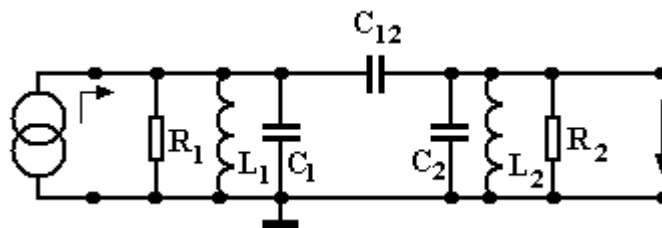
Bandfiltergekoppelte Verstärkerstufen

Um bessere Selektionseigenschaften zu erzielen, ist es möglich Verstärkerstufen über Bandfilter zu koppeln.



Prinzip der Bandfilterkopplung

Das Bandfilter kann auf unterschiedliche Weise gekoppelt werden und die Struktur kann abgewandelt werden. Die beiden Übertrager erlauben eine Anpassung der beiden Transistorstufen und eine Symmetrierung der Schaltung. Blindkomponenten der Transistoren werden in die Filter mit eingestimmt



Es gilt somit: $R_1 = R_2 = R$, $C_1 = C_2 = C$, $L_1 = L_2 = L$, $C_{12} = C_0$

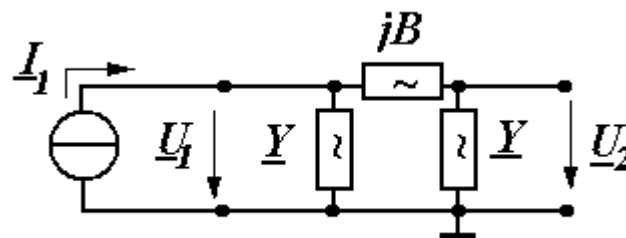
Die Parallelkreise können zu

$$\underline{Y} = G(1 + j \cdot \Omega) \text{ zusammengefaßt werden mit } G = R^{-1} \text{ und } \Omega = Q \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right).$$

Für das Koppelglied machen wir die für schmale Frequenzbereiche zulässige

Näherung:

$$jB = j\omega C_0 \approx j\omega_0 C_0$$



Damit lautet nun die Übertragungsfunktion

$$\underline{A}(j\Omega) = 2 \cdot \frac{\underline{U}_2}{\underline{I}_1 R} = \frac{2}{R} \cdot \frac{\underline{Y}^{-1}}{2 \cdot \underline{Y}^{-1} - jB^{-1}} \cdot \underline{Y}^{-1} = \frac{1}{R} \cdot \frac{2}{2\underline{Y} - jB^{-1} \cdot \underline{Y}^2}$$

und weiter $\underline{A}(j\Omega) = \frac{2}{2(1 + j\Omega) - jB^{-1}G \cdot (1 + j\Omega)^2} \cdot$

Setzen wir $K = B \cdot R = B \cdot G^{-1}$ so können wir schreiben

$$\underline{A}(j\Omega) = \frac{j \cdot 2 \cdot K}{j2K \cdot (1 + j\Omega) + (1 + j\Omega)^2} = \frac{j \cdot 2 \cdot K}{j2K - 2K\Omega + 1 + j2\Omega - \Omega^2}$$

Mit der verschobenen Frequenzvariablen $V = \Omega + K$ erhalten wir den Ausdruck

$$\underline{A}(jV) = \frac{j \cdot 2 \cdot K}{j2K - 2K(V - K) + 1 + j2(V - K) - V^2 + 2VK - K^2}, \text{ was}$$

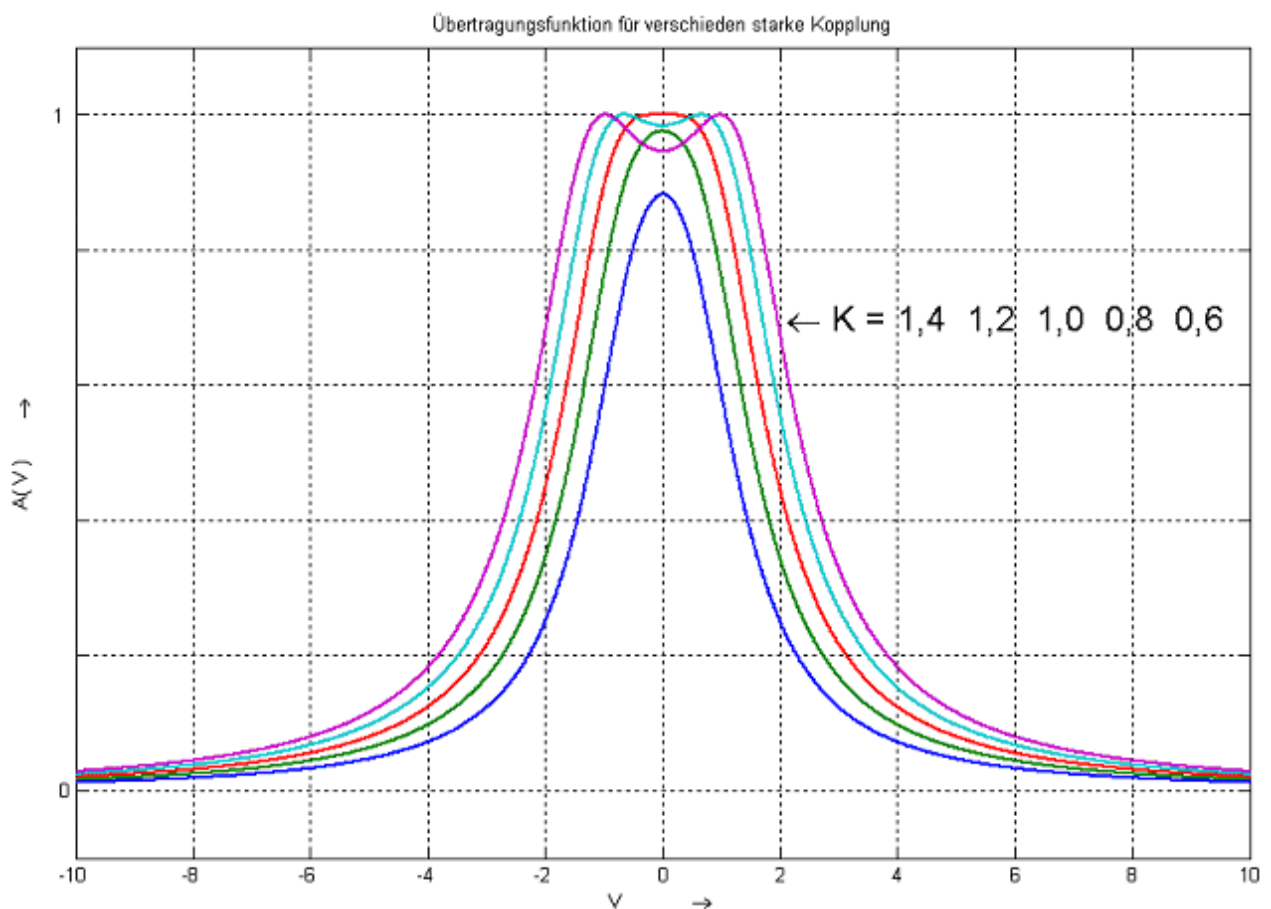
zusammengefaßt ergibt

$$\underline{A}(jV) = \frac{j2K}{1 + K^2 - V^2 + j2V} \cdot$$

Der Betrag $A(V)$ lautet jetzt:

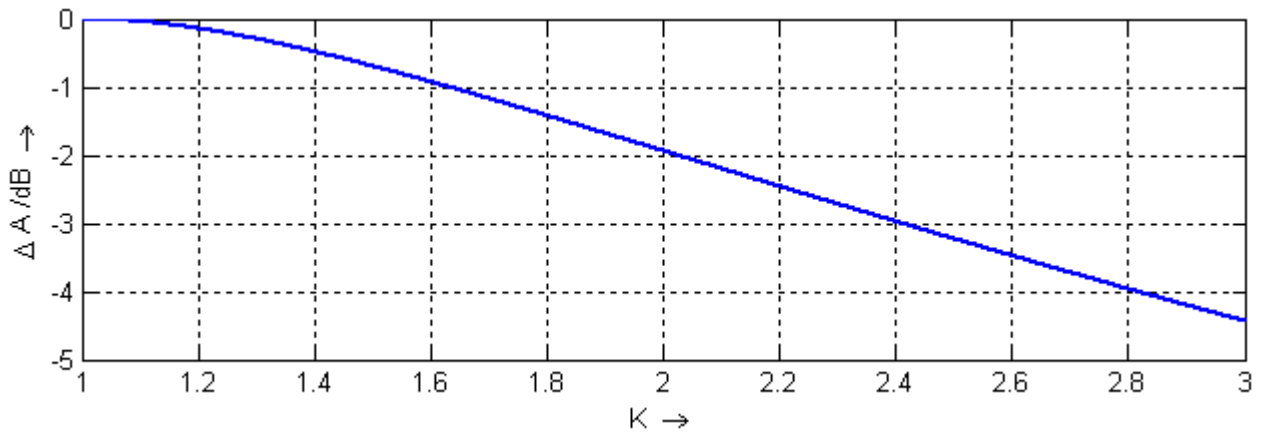
$$A(V) = \frac{2K}{\sqrt{(1 + K^2 - V^2)^2 + 4V^2}}$$

Eine Auswertung für verschiedene Kopplungen zeigt das folgende Bild



Es zeigt sich, daß die Charakteristik für $K=1$ (kritische Kopplung) ein Optimum zwischen Bandbreite und Flankensteilheit darstellt. Für stärkere Kopplungswerte tritt eine Einsattlung im Durchlaßbereich auf. Ist sie zulässig, kann die Bandbreite bei gleicher Flankensteilheit vergrößert werden. Die Einsattlung der Kurven beträgt

$$\Delta A / dB = 20 \lg \left\{ \frac{2K}{1 + K^2} \right\}$$



In Abhängigkeit von K unterscheiden wir drei Fälle:

$K < 1$: Unterkritische Kopplung (technisch ohne Interesse)

$K = 1$: Kritische Kopplung, technische wichtigster Fall, maximale Ebnung des Durchlaßbereiches

$K > 1$: Überkritische Kopplung, es tritt Einsattlung auf, Bandbreite nimmt zu

Von technischem Interesse sind die Fälle $K \geq 1$.

Bandbreite und Mittenfrequenz bei kritischer Kopplung:

Die Mittenfrequenz rutscht bei kapazitiver Kopplung zu etwas niedrigeren Frequenzen ($K=1$):

$$\Omega_m = -1 \rightarrow \omega_m = \omega_0 \cdot \left(\sqrt{1 + \frac{1}{4Q^2}} - \frac{1}{2Q} \right)$$

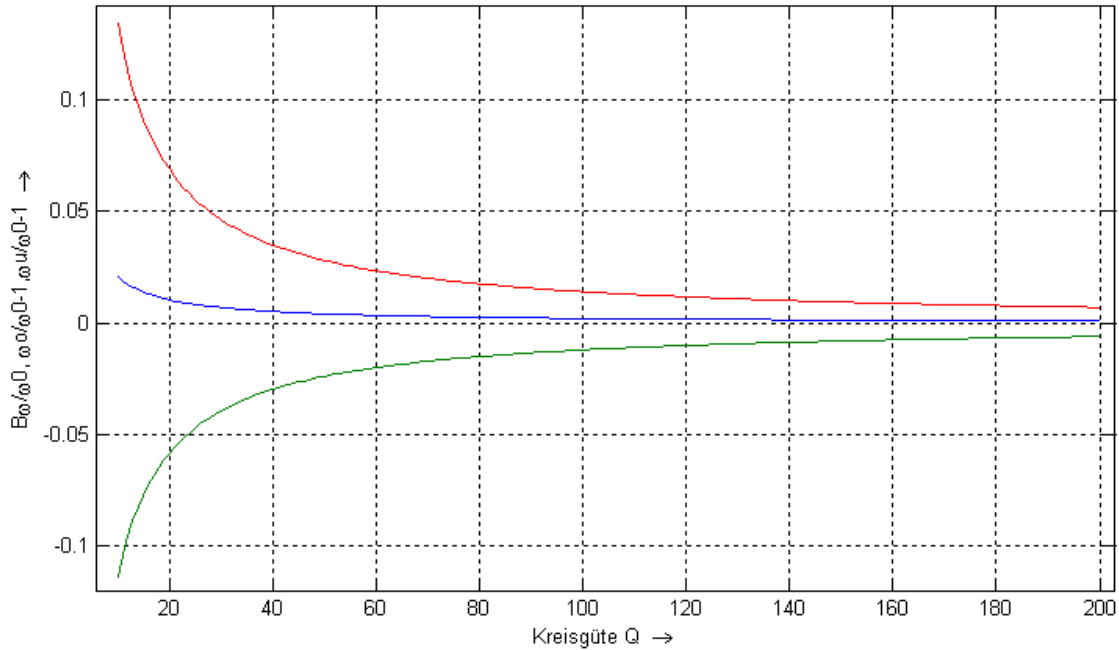
Die Übertragungsfunktion für $K = 1$ lautet:

$$A_k(V) = \frac{2}{\sqrt{(2 - V^2)^2 + 4V^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{V}{\sqrt{2}}\right)^4}}$$

Die 3dB-Grenzen werden für $V_g = \pm\sqrt{2}$ erreicht. Die Grenzen Ω_g liegen bei $\pm\sqrt{2} - 1$, damit ergeben sich die Grenzfrequenzen ω_- und ω_+ zu

$$w_- = w_0 \cdot \left(\sqrt{1 + \frac{(1 + \sqrt{2})^2}{4Q^2}} - \frac{1 + \sqrt{2}}{2Q} \right)$$

$$w_+ = w_0 \cdot \left(\sqrt{1 + \frac{(\sqrt{2} - 1)^2}{4Q^2}} + \frac{\sqrt{2} - 1}{2Q} \right)$$



Näherungen für $Q \gg 1$:

$$w_- \approx w_0 \cdot \left(1 + \frac{3 + 2 \cdot \sqrt{2}}{8 \cdot Q^2} - \frac{1 + \sqrt{2}}{2Q} \right) \approx w_0 \cdot \left(1 - \frac{1 + \sqrt{2}}{2Q} \right)$$

$$w_+ \approx w_0 \cdot \left(1 + \frac{3 - 2 \cdot \sqrt{2}}{8 \cdot Q^2} + \frac{\sqrt{2} - 1}{2Q} \right) \approx w_0 \cdot \left(1 + \frac{\sqrt{2} - 1}{2Q} \right)$$

$$w_m \approx w_0 \cdot \left(1 + \frac{3}{8 \cdot Q^2} - \frac{1}{2Q} \right) \approx w_0 \cdot \left(1 - \frac{1}{2Q} \right)$$

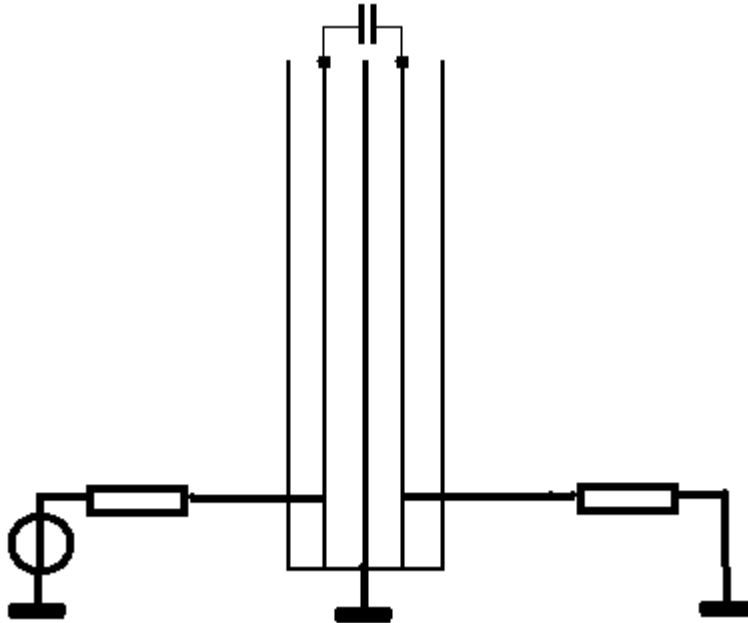
$$B_w = w_+ - w_- \approx w_0 \cdot \left(-\frac{\sqrt{2}}{2 \cdot Q^2} + \frac{\sqrt{2}}{Q} \right) \approx w_0 \cdot \frac{\sqrt{2}}{Q}$$

Daraus folgt für Betriebsgüte und Resonanzfrequenz der Resonatoren :

$$Q = \frac{1}{1 - \sqrt{1 - \frac{2 \cdot B_f}{\sqrt{2} \cdot f_0}}} \quad , \quad f_0 = \frac{f_+ + f_-}{2 - \frac{1}{Q}}$$

Anwendungsbeispiel:

Es soll ein bandfiltergekoppelter Verstärker dimensioniert werden für ein Frequenzband von $f_u = 0,495 \text{ GHz}$ bis $f_o = 0,505 \text{ GHz}$. Das Filter soll an einen 50Ω -Generator und eine 50Ω -Last angepaßt werden. Als Resonatoren werden $\lambda/4$ -Leitungen eingesetzt. Die Resonatoren sollen als 100Ω -Koaxialleitungen mit Luftisolation realisiert werden. Die Resonatoren seien ohne Eigenverluste.



1. Aus f_u und f_o ergeben sich f_0 und Q . Die Berechnung erfolgt sinnvoll durch Iteration.

$$Q = 70.70537479666190 \quad \text{und} \quad f_0 = 5.035229447241228 \times 10^8 \text{ Hz}$$

2. Dimensionierung der Resonatoren

$$l = \frac{l_0}{4} = \frac{c}{4 \cdot f_0} = 0.14895051116507 \text{ m}$$

Die Resonatoren verhalten sich wie Parallelkreise mit

$$C = \frac{1}{8 \cdot f_0 \cdot Z} = 2.482508519417854 \text{ pF}$$

$$R_p = \frac{Q}{2\pi f_0 C} = 9.002487921643084 \text{ k}\Omega$$

3. Bestimmung der Anschlußpunkte

Statt der Belastung der Resonatoren mit R_p am heißen Ende, suchen wir den Anschlußpunkt x_0 wo 50Ω die gleiche Wirkung (Betriebsgüte) hervorrufen.

$$x_0 = \frac{l_0}{2\pi} \cdot \arcsin\left(\sqrt{\frac{R_{g,a}}{R_p}}\right) = 0.00707340758855 \text{ m}$$

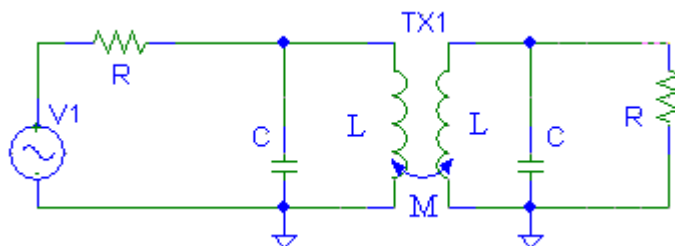
4. Bestimmung des Koppelkondensators

Aus $K = 2 \pi f_0 C_0 R_p = 1$ folgt

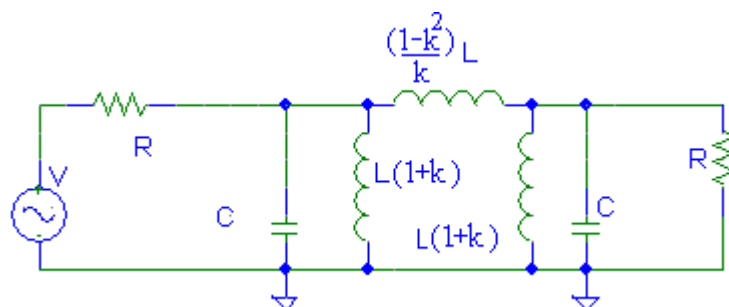
$$C_0 = \frac{1}{2 \cdot p \cdot f_0 \cdot R_p} = 0.03511060547457924 \text{ pF}$$

Natürlich sind für alle Werte nur technische Genauigkeiten sinnvoll.

Besonders häufig werde **Bandfilter mit gekoppelten Spulen** eingesetzt.



Ersetzt man den Übertrager durch eine Π -Ersatzschaltung erhält man eine Schaltung, die der mit kapazitiver Hochkopplung entspricht, nur das das Koppellement eine große Induktivität ist.



Der Koppelfaktor $k \ll 1$ sorgt für eine schwache Kopplung der Kreise. In der Ersatzschaltung wird dieser Umstand durch die große Längsinduktivität $(1-k^2) \cdot k^{-1} \cdot L$ widerspiegelt. Man kann so die Parallelkreise wieder durch

$$\underline{Y} = G(1 + j \cdot \Omega) \quad \text{mit} \quad G = R^{-1} \quad \text{und} \quad \Omega = Q \cdot \left(\frac{w}{w_0} - \frac{w_0}{w} \right) .$$

Für das Koppelglied machen wir die für schmale Frequenzbereiche zulässige

Näherung:
$$-jB = -j \frac{k}{(1-k^2) \cdot L \cdot w} \approx -j \frac{k}{(1-k^2) \cdot L \cdot w_0}$$

und weiter
$$\underline{A}(j\Omega) = \frac{2}{2(1 + j\Omega) + jB^{-1}G \cdot (1 + j\Omega)^2} .$$

Setzen wir $K = B \cdot R = B \cdot G^{-1}$ so können wir schreiben

$$\underline{A}(j\Omega) = \frac{-j \cdot 2 \cdot K}{-j2K \cdot (1 + j\Omega) + (1 + j\Omega)^2} = \frac{-j \cdot 2 \cdot K}{-j2K + 2K\Omega + 1 + j2\Omega - \Omega^2}$$

Mit der verschobenen Frequenzvariablen $V = \Omega - K$ erhalten wir den Ausdruck

$$\underline{A}(jV) = \frac{-j \cdot 2 \cdot K}{-j2K + 2K(V + K) + 1 + j2(V + K) - V^2 - 2VK - K^2}, \text{ was}$$

zusammengefaßt ergibt

$$\underline{A}(jV) = \frac{-j2K}{1 + K^2 - V^2 + j2V}.$$

Der Betrag $A(V)$ lautet wie bei der kapazitiven Kopplung:

$$A(V) = \frac{2K}{\sqrt{(1 + K^2 - V^2)^2 + 4V^2}}$$

Bei der Ableitung der anderen Größen muß man beachten, das die Frequenzverschiebung zu höheren Frequenzen erfolgt.

Für den Entwurf schmalbandiger Filter gilt vereinfacht für kritische Kopplung:

$$K = 1 \rightarrow k \cdot R = (1 - k^2) \cdot \omega_0 L$$

$$Q = \frac{\sqrt{2} \cdot f_m}{B_f} - \frac{1}{2} \quad \text{und} \quad f_0 = f_m - \frac{B_f}{2 \cdot \sqrt{2}} \quad \text{und} \quad k = \sqrt{\frac{Q^2}{4} + 1} - \frac{Q}{2}$$

$$C = \frac{Q}{\omega_0 \cdot R}, L = \frac{1}{\omega_0^2 \cdot C \cdot (1 + k)}$$

Beispiel: $f_m = 10 \text{ MHz}$, $B_f = 200 \text{ kHz}$, $R = 1 \text{ k}\Omega$

$Q = 70.2107$, $k = 0.0142$, $f_0 = 9.9293 \times 10^6 \text{ Hz}$, $C = 1.1254 \text{ nF}$, $L = 225.09 \text{ nH}$

