

HAW Hamburg		Department Informations- und Elektrotechnik		K-Labor
Studiengruppe:				Protokollführer:
Übungstag:				weitere Versuchsteilnehmer:
Professor:		Testat:		
Versuch GNP-3				SHN/30.04.2018
Aktive RC-Filter				

1 Einführung

An einer Filterschaltung in aktiver RC-Technik mit Operationsverstärkern sind die Eigenschaften im Frequenzbereich (Amplituden- und Phasengänge) und im Zeitbereich (Sprungantwort, Einschwingverhalten) zu messen.

Die Laborschaltung nach Bild 1 hat einen Eingang und 4 getrennte Ausgänge mit Tiefpaß- (U_{TP}), Hochpaß- (U_{HP}), Bandpaß- (U_{BP}) und Bandsperrencharakteristik (U_{BS}). Daher spricht man von einem Universalfilter.

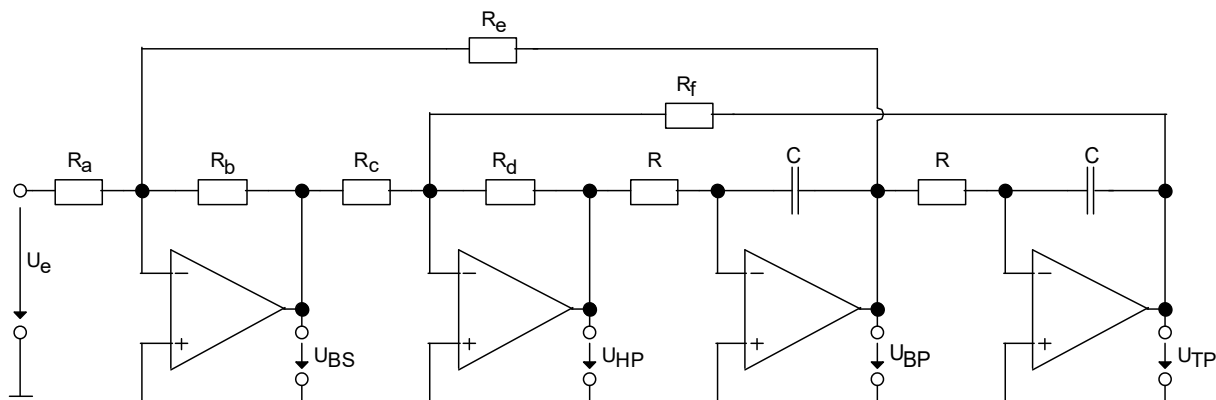


Bild 1: Universalfilterschaltung in aktiver RC-Technik mit Operationsverstärkern

In der Schaltung sind Operationsverstärker vom Typ LF 356 eingebaut. Die Zeitkonstanten der beiden Integratoren (R , C) können mit einem mehrpoligen Schalter in den Werten verändert werden. Im vorliegenden Versuch wird die Schalterstellung 5 mit $C=10\text{nF}$ verwendet.

Die Bauelemente haben folgende Werte:

	Butterworth-		Tschebyscheff-		Bessel-		Bandpass	Bandsperre
	Tiefpass	Hochpass	Tiefpass	Hochpass	Tiefpass	Hochpass		
R_a	3,32k Ω	3,32k Ω	3,32k Ω	3,32k Ω	3,32k Ω	3,32k Ω	3,32k Ω	3,32k Ω
R_b	3,32k Ω	3,32k Ω	3,32k Ω	3,32k Ω	3,32k Ω	3,32k Ω	3,32k Ω	3,32k Ω
R_c	3,32k Ω	3,32k Ω	3,32k Ω	3,32k Ω	3,32k Ω	3,32k Ω	16,5k Ω	16,5k Ω
R_d	3,32k Ω	3,32k Ω	1,69k Ω	3,32k Ω	5,36k Ω	3,32k Ω	3,32k Ω	3,32k Ω
R_e	2,32k Ω	2,32k Ω	3,09k Ω	3,09k Ω	2,43k Ω	2,43k Ω	3,32k Ω	3,32k Ω
R_f	3,32k Ω	3,32k Ω	3,32k Ω	1,69k Ω	3,32k Ω	5,36k Ω	3,32k Ω	3,32k Ω
R	10k Ω							
C	10nF							

2 Vorausberechnung der Schaltung

Folgende Eigenschaften der Filter sind in häuslicher Vorarbeit zu bestimmen und zum Praktikumstermin vorzulegen:

- 1) Grundverstärkung und Grenzfrequenzen der Hoch- und Tiefpässe
- 2) Mittenfrequenz und Bandbreite des Bandpasses
- 3) Sperrfrequenz der Bandsperre
- 4) Übertragungsfunktionen mit Matlab symbolisch berechnet
- 5) Übertragungsfunktionen (Betrag und Phase) mit Matlab numerisch berechnet
- 6) Spice Simulationsergebnisse für das Frequenzverhalten (AC-Analyse)

Die Eigenschaften 1-3) können entweder berechnet (siehe Abschnitte 6 und 7) oder aus Simulationen mit Spice (z.B. PSpice oder LTSpice) entnommen werden. Der Berechnungsgang bzw. Schaltung und Plot der Spice-Simulation sind zum Labortermin vorzulegen und in das Protokoll mit aufzunehmen, genauso wie der Matlab-Code.

3 Messung von Amplituden- und Phasengang der Filterschaltungen

1. Amplitudengänge (mit Phasengängen) von Butterworth-, Tschebyscheff- und Bessel-**Tiefpass** gemeinsam in einem Plot über **logarithmischer Frequenzachse**, Frequenzbereich 100Hz...20kHz („AktFilt Ampl & Phase.set“).
2. Phasengänge von Butterworth-, Tschebyscheff- und Bessel-Tiefpass gemeinsam in einem Plot über **linearer Frequenzachse**, Frequenzbereich 100Hz...4kHz.
3. Amplitudengänge (mit Phasengängen) von Butterworth-, Tschebyscheff- und Bessel-**Hochpass** gemeinsam in einem Plot über logarithmischer Frequenzachse, Frequenzbereich 100Hz...20kHz.
4. Amplitudengänge (mit Phasengängen) von Bandpass und Bandsperre gemeinsam in einem Plot über logarithmischer Frequenzachse, Frequenzbereich 1kHz...2,5kHz.

Die Amplituden und Phasengänge sind mit dem Audio Analyzer UPV in Form von Bode-Diagrammen aufzunehmen. Bild 2 zeigt die Prinzipschaltung des Messaufbaus, der wahlweise die Bestimmung des Amplitudengangs als Pegeldifferenz und des Phasengangs als Phasendifferenz erlaubt.

Der Sendepiegel ist so einzustellen, daß das Meßobjekt nicht übersteuert wird. Zur Kontrolle benutzt man ein Oszilloskop am Ausgang des Meßobjekts.

Die Einstellung des Audio Analyzer kann zunächst mit den im UPV vorhandenen Setupdateien „AktFilt Ampl & Phase.set“, „AktFilt Ampl.set“ und „AktFilt Phase.set“ vorgenommen werden. Die voreingestellten Werte sind bei Bedarf zu verändern.

Geladen werden die Setup-Dateien über Eingabe von Menü/File/LoadSetup oder direkt über die Taste „Load“ im Feld „Setup“ der Frontplatte.

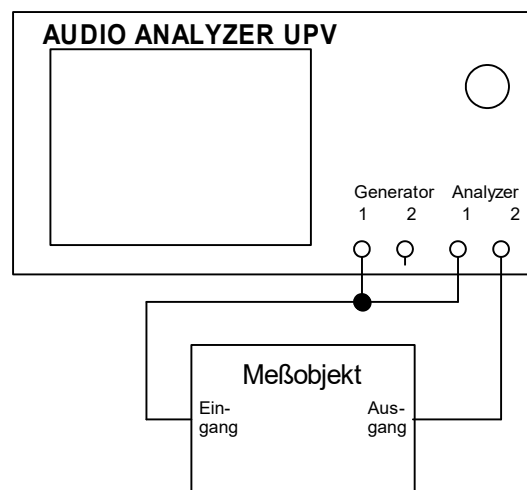


Bild 2: Messung von Pegeldifferenz L_2-L_1 bzw. Phasendifferenz $\phi_2-\phi_1$

Auf den folgenden Seiten sind die Einstellungen der beiden Setup-Dateien näher beschrieben.

Setupdatei „AktFilt Ampl & Phase.set“:

Die Datei erzeugt 3 Screens. Im ersten Screen wird die Einstellung des Generators (Generator Config, Generator Function) und des Analyzers (Analyzer Config, Analyzer Function) vorgenommen.

Der Generator arbeitet im Analog-Modus und erzeugt ein analoges Sinussignal, dessen Frequenz zwischen 100Hz und 20kHz verändert wird. Der Frequenzbereich wird in logarithmischer Stufung mit 100 Schritten durchlaufen. Die Ausgangsspannung beträgt 1V.

Der Analysator erfasst Analogspannungen auf beiden Kanälen. Die Eingänge sind massebezogen geschaltet und haben 200k Ω Eingangsimpedanz. Die Messzeit nach jedem Frequenzschritt wird automatisch bestimmt.

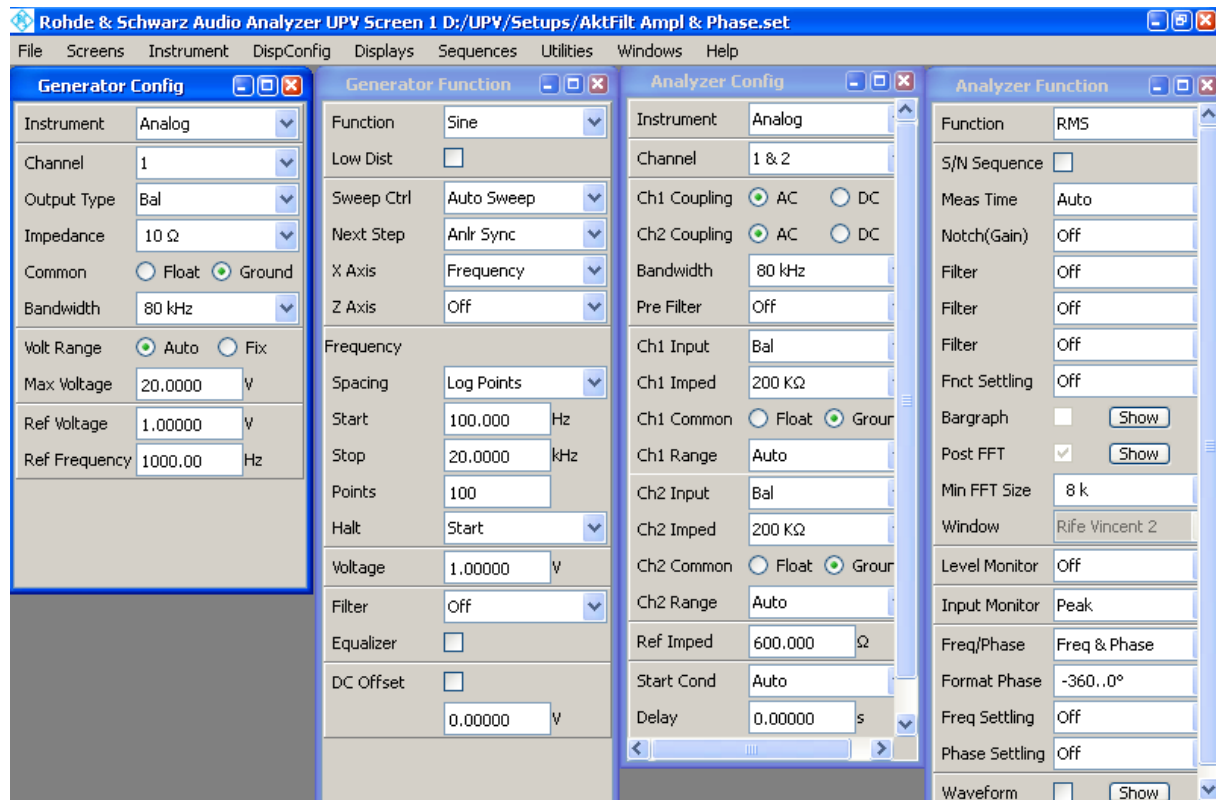
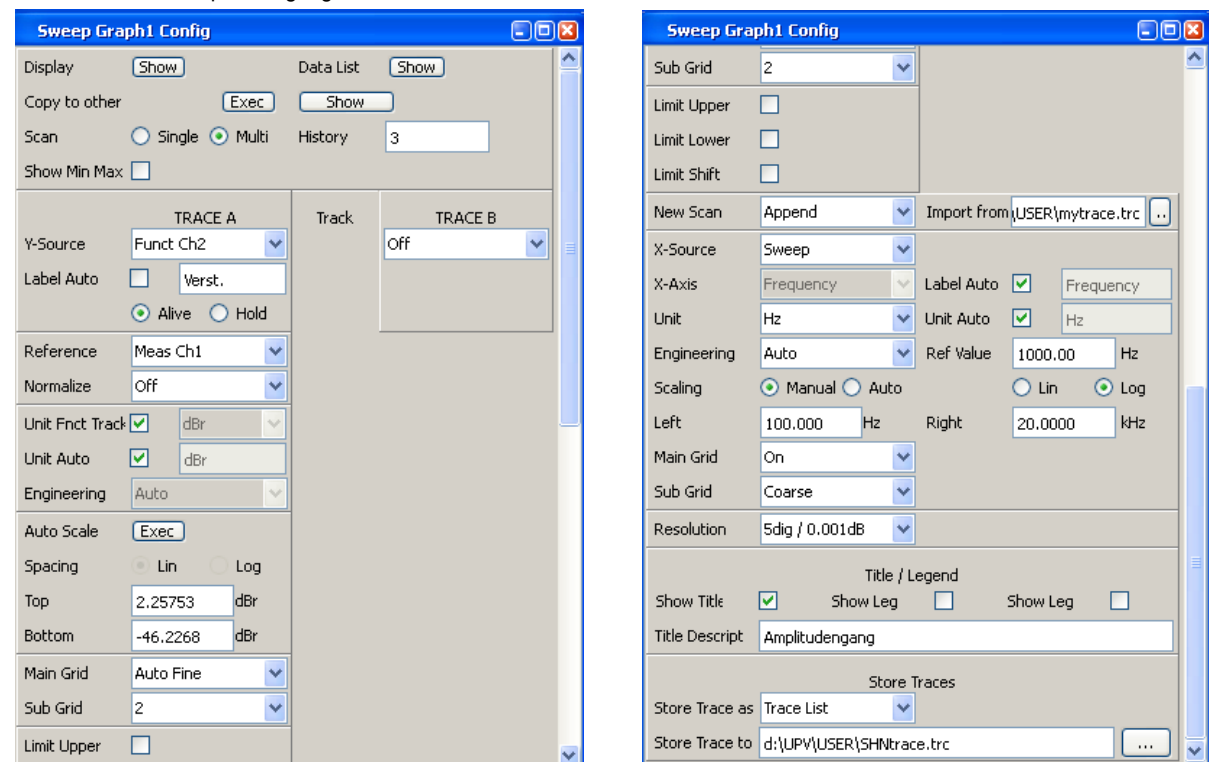


Bild 3: Screen 1, Amplitudengang

Bild 4: Screen 2, Amplitudengang



Im zweiten Screen (hier in zwei Teilen dargestellt) werden Einstellungen zur grafischen Darstellung der Messwerte vorgenommen. Es soll die Verstärkung des Filters als Pegeldifferenz von Ausgangs- und Eingangspegel dargestellt werden. Die Datenquelle für die y-Achse ist Kanal 2, als Bezug wird der Pegel an Kanal 1 verwendet. Bei Unit muss dBr (Dezibel relativ) eingestellt sein. Die Werte für Top und Bottom stellt der Analysator nach Anklicken von Autoscale/Exec ein. Die Werte für die x-Achse liefert die Sweep-Funktion des Generators. Es wird eine logarithmische Skalierung verwendet. Im Feld Title Descript wird die Überschrift (Filtertyp etc.) eingegeben.

In der Grafik werden zusammen mit der aktuellen Messung die letzten 3 Verläufe dargestellt (History=3). Dadurch kann man die Amplitudengänge von mehreren, unterschiedlichen Tiefpasscharakteristiken gemeinsam abbilden.

Im 3. Screen (hier nicht dargestellt) findet man die grafische Darstellung der Messwerte. Mit der rechten Maustaste gelang man aus ihm direkt zur Konfiguration der Grafik, z.B. für die Funktion Autoscale.

Setupdatei AktFilt Phase.set:

Die Datei erzeugt wieder 3 Screens. Der einzige Unterschied zu den Einstellungen der Amplitudengänge sind hier Startfrequenz, Stopfrequenz und evt. Spacing bei Generator Function und Freq/Phase bei Analyzer Function. Das Format für die Phase wird auf $-180^\circ \dots +180^\circ$ eingestellt.

Im zweiten Screen (hier in zwei Teilen dargestellt) finden sich wieder die Einstellungen zur grafischen Darstellung der Messwerte. Die Datenquelle für die y-Achse sind jetzt Phasenwinkel, wobei der Bezug die Messwerte von Kanal 1 sind. Die Werte für Top und Bottom stellen sich selbst nach Anklicken von Autoscale/Exec ein.

Es werden wieder zusammen mit der aktuellen Messung die letzten 3 Verläufe dargestellt (History=3). Dadurch lassen sich die Phasengänge von mehreren, unterschiedlichen Tiefpasscharakteristiken gemeinsam abbilden.

Die Werte für die x-Achse liefert die Sweep-Funktion des Generators. Es wird hier aber eine lineare Teilung (Spacing) verwendet, um besser darstellen zu können, bei welchem der 3 Tiefpässe sich die Phase möglichst linear mit der Frequenz ändert.

Im Feld Title Descript wird wieder die Überschrift (Filtertyp etc.) eingegeben

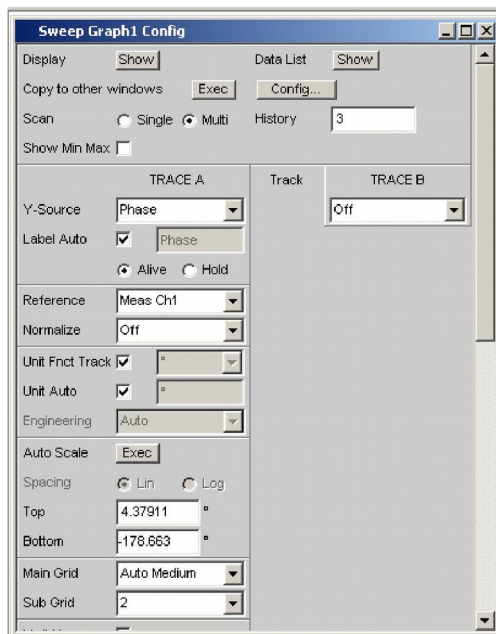


Bild 5: Screen 1, Phasengang

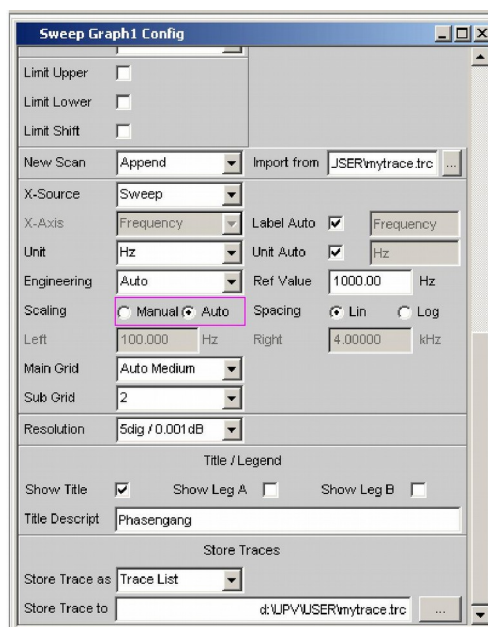


Bild 6: Screen 2, Phasengang

In den Plots der Amplitudengänge sind die Grenzfrequenzen und bei 3.4 zusätzlich die Mittenfrequenzen zu markieren und ihre Zahlenwerte einzutragen.

In den Plots der Phasengänge der drei Tiefpässe (Messung 3.2) sind die Frequenzen für eine Phasenverschiebung von -60° und -120° zu markieren und einzutragen. Auswertung siehe Abschnitt 5.

Koeffizienten der Hoch- und Tiefpässe 2. Ordnung (Formeln siehe Anhang)

Filtercharakteristik	Butterworth	Tschebyscheff	Bessel
Koeffizient a_1	1,414	1,065	1,362
Koeffizient b_1	1	1,931	0,618

4 Sprungantworten der Tiefpässe

Das Zeitverhalten der 3 Tiefpässe soll an Hand der Sprungantworten untersucht werden. Zur Messung der Sprungantwort wird das Filter mit einem periodischen Rechtecksignal geeigneter Amplitude und Frequenz aus einem Funktionsgenerator angesteuert und das Ausgangssignal auf dem Oszilloskop abgebildet.

Skizzieren Sie die Messschaltung mit Angabe der verwendeten Geräte und plotten Sie Ein- und Ausgangssignale für die drei Tiefpässe.

Bestimmen Sie aus den Sprungantworten der drei Tiefpässe Anstiegszeit, Überschwingen (bezogen auf Endwert) und Einschwingzeit (bezogen auf 5% Abweichung vom Endwert) und stellen Sie alle Werte in einer Tabelle gemeinsam dar!

5 Hinweise zum Protokoll, Auswertung

Das Protokoll soll folgende Ergebnisse enthalten:

Zu 2: Formeln bzw. Spice-Plots und Ergebnisse der Vorausberechnung für Grundverstärkung und Grenzfrequenzen der Hoch- und Tiefpässe, Mittenfrequenz und Bandbreite des Bandpasses, Sperrfrequenz der Bandsperre.

Zu 3: Amplitudengänge von Butterworth-, Tschebyscheff- und Bessel-Tiefpass und Markierung der Grenzfrequenzen
 Phasengänge von Butterworth-, Tschebyscheff- und Bessel-Tiefpass und Markierung der Frequenzen für eine Phasenverschiebung von -60° und -120°
 Amplitudengänge von Butterworth-, Tschebyscheff- und Bessel-Hochpass und Markierung der Grenzfrequenzen
 Amplitudengänge von Bandpass und Bandsperre und Markierung der Grenzfrequenzen

Auswertung: Alle Messwerte der Grenzfrequenzen sind in einer Tabelle mit den Vorgabewerten einzutragen und zu vergleichen;

Aus den Frequenzen bei 60° und 120° Phasenverschiebung sind die Koeffizienten a_1 , b_1 der 3 Tiefpässe zu berechnen und mit den Vorgabewerten zu vergleichen

Zu 4: Plots der Sprungantworten der drei Tiefpässe, Bestimmung von Anstiegszeit, Überschwingen und Einschwingzeit; Darstellung und Vergleich in einer Tabelle

6 Allgemeine Gleichungen zu Filtern 2. Ordnung

1. Tiefpaß 2. Ordnung

Übertragungsfunktion: $\underline{H}_{TP}(\Omega) = \frac{v_0}{1 + a_1 \cdot j\Omega + b_1 \cdot (j\Omega)^2}$ $\Omega = \frac{\omega}{\omega_g} = \frac{f}{f_g}$; f_g =Grenzfrequenz

Amplitudengang: $|\underline{H}_{TP}(\Omega)| = \frac{|v_0|}{\sqrt{(1 - b_1 \cdot \Omega^2)^2 + a_1^2 \cdot \Omega^2}}$

Phasengang: $\arg \underline{H}_{TP}(\Omega) = \arg(v_0) - \arctan\left(\frac{a_1 \cdot \Omega}{1 - b_1 \cdot \Omega^2}\right)$

Sprungantwort: $h(t) = v_0 \left\{ 1 - \frac{e^{-\vartheta \cdot t/T_0}}{\sqrt{1 - \vartheta^2}} \cos\left(\sqrt{1 - \vartheta^2} \frac{t}{T_0} - \arcsin \vartheta\right) \right\}$

$\vartheta = \frac{a_1}{2\sqrt{b_1}}$, $T_0 = \frac{\sqrt{b_1}}{\omega_g}$

2. Hochpaß 2. Ordnung

Übertragungsfunktion: $\underline{H}_{HP}(\Omega) = v_\infty \cdot \frac{(1/b_1) \cdot (j\Omega)^2}{1 + (a_1/b_1) \cdot (j\Omega) + (1/b_1) \cdot (j\Omega)^2}$ $\Omega = \frac{\omega}{\omega_g} = \frac{f}{f_g}$;

f_g =Grenzfrequenz

Amplitudengang: $|\underline{H}_{HP}(\Omega)| = \frac{|v_\infty| \cdot (1/b_1) \cdot \Omega^2}{\sqrt{(1 - (1/b_1) \cdot \Omega^2)^2 + (a_1/b_1)^2 \cdot \Omega^2}}$

Phasengang: $\arg \underline{H}_{HP}(\Omega) = \pi - \arctan\left(\frac{a_1 \cdot \Omega}{(b_1 - 1) \cdot \Omega^2}\right)$

3. Bandpass 2. Ordnung:

Übertragungsfunktion: $\underline{H}_{BP}(\Omega) = \frac{v_{\max} \cdot A \cdot j\Omega}{1 + A \cdot j\Omega + (j\Omega)^2}$ $\Omega = \frac{\omega}{\omega_0} = \frac{f}{f_0}$; f_0 =Mittenfrequenz

Amplitudengang: $|\underline{H}_{BP}(\Omega)| = \frac{|v_{\max}| \cdot A \cdot |\Omega|}{\sqrt{(1 - \Omega^2)^2 + A^2 \Omega^2}}$ Bandbreite: $b = A \cdot f_0 = f_+ - f_-$; $f_0 = \sqrt{f_+ \cdot f_-}$

Phasengang: $\arg \underline{G}(\Omega) = \frac{\pi}{2} - \arctan\left(\frac{A \cdot \Omega}{1 - \Omega^2}\right)$ f_+, f_- =obere, untere Grenzfrequenz (-3dB)

4. Bandsperre 2. Ordnung:

Übertragungsfunktion: $\underline{H}_{BS}(\Omega) = v_0 \cdot \frac{1 + (j\Omega)^2}{1 + A \cdot j\Omega + (j\Omega)^2}$ $\Omega = \frac{\omega}{\omega_0} = \frac{f}{f_0}$; f_0 =Mittenfrequenz

Amplitudengang: $|\underline{H}_{BS}(\Omega)| = \frac{|v_0| \cdot |1 - \Omega^2|}{\sqrt{(1 - \Omega^2)^2 + A^2 \Omega^2}}$ Bandbreite: $b = f_+ - f_-$;

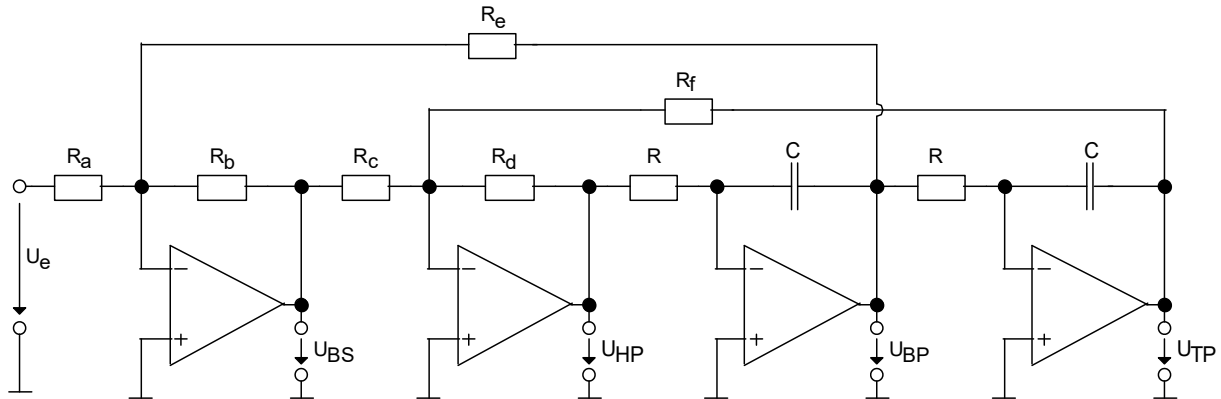
$f_0 = \sqrt{f_+ \cdot f_-}$

f_+ , f_- =obere, untere Grenzfrequenz

$$\text{Phasengang: } \arg \underline{H}_{BS}(j\Omega) = \begin{cases} -\arctan\left(\frac{A \cdot \Omega}{1 - \Omega^2}\right) & \text{für } |\Omega| < 1 \\ \pi - \arctan\left(\frac{A \cdot \Omega}{1 - \Omega^2}\right) & \text{für } |\Omega| > 1 \end{cases}$$

Beachten Sie auch die gegebenen Übertragungsfunktionen aus der Vorlesung, insbesondere die symbolische Lösung mit Matlab. Dabei ist $s = \sigma + j\omega$ mit $\sigma = 0$. Normiert $S = j\Omega$.

7 Gleichungen zum Universal-Filter



1. Tiefpass:
$$\frac{U_{TP}}{U_e} = \frac{R_b R_f}{R_a R_c} \cdot \frac{1}{1 + \frac{R_b R_f}{R_c R_e} \cdot (j\omega\tau) + \frac{R_f}{R_d} \cdot (j\omega\tau)^2} \quad \text{mit } \tau = R \cdot C$$

Wählt man $R_b = R_c = R_f = R_0$, erhält man
$$\frac{U_{TP}}{U_e} = \frac{R_0}{R_a} \cdot \frac{1}{1 + \frac{R_0}{R_e} \cdot (j\omega\tau) + \frac{R_0}{R_d} \cdot (j\omega\tau)^2}$$

Die Parameter v_0 , a_1 und b_1 können unabhängig voneinander eingestellt werden.

2. Hochpass:
$$\frac{U_{HP}}{U_e} = \frac{R_b R_d}{R_a R_c} \cdot \frac{\frac{R_f}{R_d} \cdot (j\omega\tau)^2}{1 + \frac{R_b R_f}{R_c R_e} \cdot (j\omega\tau) + \frac{R_f}{R_d} \cdot (j\omega\tau)^2} \quad \text{mit } \tau = R \cdot C$$

Wählt man $R_b = R_c = R_d = R_0$, erhält man
$$\frac{U_{HP}}{U_e} = \frac{R_0}{R_a} \cdot \frac{\frac{R_f}{R_0} \cdot (j\omega\tau)^2}{1 + \frac{R_f}{R_e} \cdot \frac{R_0}{R_0} \cdot (j\omega\tau) + \frac{R_f}{R_0} \cdot (j\omega\tau)^2}$$

Die Parameter v_∞ , a_1 und b_1 können unabhängig voneinander eingestellt werden.

3. Bandpass:
$$\frac{U_{BP}}{U_e} = -\frac{R_e}{R_a} \cdot \frac{\frac{R_b R_f}{R_c R_e} \cdot (j\omega\tau)}{1 + \frac{R_b R_f}{R_c R_e} \cdot (j\omega\tau) + \frac{R_f}{R_d} \cdot (j\omega\tau)^2} \quad \text{mit } \tau = R \cdot C$$

Wählt man $R_b = R_d = R_e = R_f = R_0$, erhält man
$$\frac{U_{BP}}{U_e} = -\frac{R_0}{R_a} \cdot \frac{\frac{R_0}{R_c} \cdot (j\omega\tau)}{1 + \frac{R_0}{R_c} \cdot (j\omega\tau) + (j\omega\tau)^2}$$

Die Parameter v_0 und A können unabhängig voneinander eingestellt werden.

4. Bandsperre:
$$\frac{U_{BS}}{U_e} = -\frac{R_b}{R_a} \cdot \frac{1 + \frac{R_f}{R_d} \cdot (j\omega\tau)^2}{1 + \frac{R_b R_f}{R_c R_e} \cdot (j\omega\tau) + \frac{R_f}{R_d} \cdot (j\omega\tau)^2} \quad \text{mit } \tau = R \cdot C$$

Wählt man $R_b=R_d=R_e=R_f=R_0$, erhält man
$$\frac{U_{BS}}{U_e} = -\frac{R_0}{R_a} \cdot \frac{1 + (j\omega\tau)^2}{1 + \frac{R_0}{R_c} \cdot (j\omega\tau) + (j\omega\tau)^2}$$

Die Parameter v_0 und A können unabhängig voneinander eingestellt werden.

Abbildung 1: Die Widerstände $R_a \dots R_f$ können variabel eingesetzt werden. Bestimmen Sie die Werte für drei verschiedene Filtertypen schon vor dem Versuchstermin!