

Dynamische Eigenschaften und weiteres

1. Aufgabe - Slewrate:

Ein OPV mit einer Slew-rate von $2 \text{ V}/\mu\text{s}$, der in einer nicht invertierenden Grundschaltung betrieben eine Verstärkung von 8 liefert, erhält als Eingangsspannung eine Rechteckspannung mit $1,5 \text{ V}_{PP}$ und $f = 200 \text{ kHz}$. Wie sieht die Ausgangsspannung aus?

2. Aufgabe – Eigenschaften idealer und realer OPVs

Zählen Sie Ihnen bekannte Unterschiede zwischen dem idealen OPV und einem realen OPV auf und erläutern Sie diese, ggf. auch mit Werten bzw. Wertebereichen.

3. Aufgabe – Bode Diagramm OPV

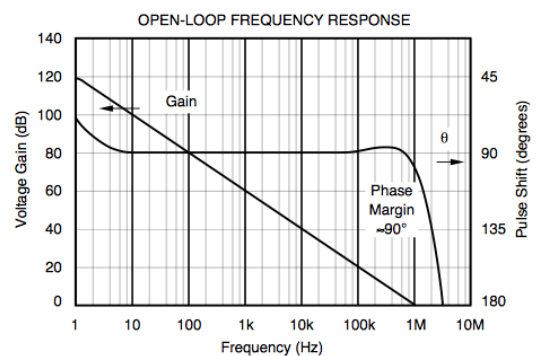
Gegeben ist das abgebildete Bode-Diagramm eines Operationsverstärkers des Typs OPA129.

Wie groß ist das Verstärkungs-Bandbreite-Produkt (Siehe weitergehende Informationen zu 2. Aufgabe)

Welche obere Grenzfrequenz lässt sich für einen Verstärker maximal erreichen, wenn der Verstärkungsfaktor 100 beträgt.

Skizzieren Sie die Schaltung und geben Sie die Widerstandswerte an wenn Ihnen beliebige

Widerstände zwischen 500Ω und $500 \text{ k}\Omega$ zur Verfügung stehen.



Zusatzfrage:

Sie wollen mit OPA129 (siehe abgebildete dynamische Eigenschaften) eine sinusförmige Wechselspannung von $U_{in,eff} = 5 \text{ mV}$ auf $U_{aus,eff} = 2,5 \text{ V}$ verstärken. Sie wählen die nicht-invertierende Grundschaltung.

Zeichnen und dimensionieren Sie die Schaltung, Wählen Sie jetzt mit den Randbedingungen $1 \text{ k}\Omega < R_1, R_2 < 100 \text{ k}\Omega$.

Welche Grenzfrequenz f_g ist mit dieser Dimensionierung näherungsweise erreichbar?

Wie groß ist die Phasendrehung bei f_g

Sie reduzieren die Verstärkung auf den Faktor 10. Welche Grenzfrequenz f_{G2} hat die Schaltung nun?

4. Aufgabe - Doppelintegrierer

Zeichnen Sie und dimensionieren Sie eine Schaltung mit einem idealen OPV, die aus zwei Eingangsgrößen folgende Ausgangsgröße berechnet:

$$u_a(t) = -10 \text{ s}^{-1} \cdot \int_0^t (u_1(\tau) + 4 \cdot u_2(\tau)) d\tau$$

Wie heißt die aufzubauende Grundschaltung? Welche Modifikation ist nötig?

Geben Sie die Formel für die Ausgangsspannung u_a unter Verwendung der Parameter R, C der nötigen passiven Bauteile an.

Welche Werte sind zu wählen, wenn gelten soll $1 \text{ k}\Omega \leq R \leq 1 \text{ M}\Omega$?

Zusatzfrage: Denken Sie auch über die Verkettung von Integriern und Differenzierern nach.

5. Aufgabe – Verkettete Integrierer

Schalten Sie zwei Umkehrintegrierer hintereinander. Zum Zeitpunkt $t_0 = 0$ s seien alle Kondensatoren entladen. Die Zeitkonstante τ_1 des Ersten sei so gewählt, dass bei 1 V konstanter Eingangsspannung U_{IN} nach $t_1 = 1$ s an seinem Ausgang $U_{OUT1} = -0,5$ V erscheinen. Die Zeitkonstante τ_2 des Zweiten sei $4 \times$ so schnell. Sie haben Kondensatoren mit $C = 10 \mu\text{F}$ zur Verfügung und sollen nur wenige identische Widerstände nutzen. Zeichnen Sie die Schaltung und berechnen Sie den Widerstandswert R.

Stellen Sie eine allgemeine Formel für einen rechteckförmigen positiven Einzelimpuls mit Spannung U_{Puls} und Dauer t_1 für die Ausgangsspannung U_{OUT1} im Zeitintervall von t_0 bis t_1 an. Wie lautet die Formel für $t \geq t_1$?

Stellen für die beiden Zeiträume Sie eine allgemeine Formel für die dann am Ausgang U_{OUT2} erscheinende Spannung auf.

Zeichnen Sie in ein Diagramm (Skala z.B. 4cm pro V bzw. s) U_{IN} , U_{OUT1} , U_{OUT2} in Abhängigkeit von t für $U_{PULS} = 2$ V und $t = 1$ s von $t = 0$ s bis $t = 2$ s. Berechnen Sie dazu die maximal und minimal auftretenden Werte, ggf. Zwischenwerte und beachten Sie die Vorzeichen!

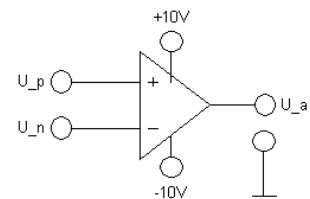
Zusatzfrage: Welches Signal liegt am Eingang U_{IN} und am Ausgang U_{OUT2} an wenn am Ausgang U_{OUT1} des ersten Umkehrintegrierer folgendes Dreieck-Signal anliegt:

$$U_{OUT1}(t=0s)=0V, U_{OUT1}(t=0,5s)=1V, U_{OUT1}(t=1)=0V$$

Dazwischen linear, davor und danach konstant.

6. Aufgabe – OPV Übertragungskennlinie

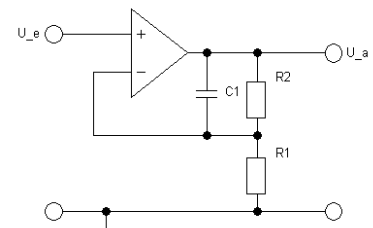
Gegeben sei ein OPV mit folgenden Daten: Leerlaufverstärkung $v_0=10^5=100\text{dB}$; Ausgangsspannungshub $-10\text{V} \leq U_a \leq +10\text{V}$. Skizzieren sie die Übertragungskennlinie $U_a = f(U_e)$ für $-100\text{mV} \leq U_e \leq +100\text{mV}$ und für $-100\mu\text{V} \leq U_e \leq +100\mu\text{V}$



7. Aufgabe – Filterschaltung

Skizziere das Bode-Diagramm (Betrag- und Phasenkurve) für die Übertragungsfunktion $H(j\omega) = \underline{u}_a(j\omega) / \underline{u}_e(j\omega)$. Der OPV ist ideal.

Berechnen Sie die H ganz allgemein.



8. Aufgabe – Slew Rate

Betrachten Sie die maximale Änderung der Ausgangsspannung U_{OUT} eines OPV anhand der Slewrate:

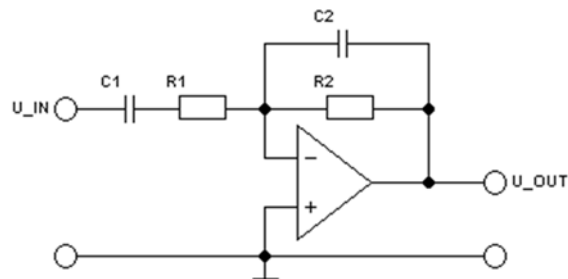
$$SR = |dU_a/dt|_{\max}$$

Es soll am Ausgang ein periodisches Signal mit Frequenz f und Amplitude U_0 ohne höhere Harmonische ohne Verzerrungen erscheinen. Berechnen Sie allgemein seine maximale Steigung. Welchen Zusammenhang können Sie dann zwischen den Größen herstellen?

Zusatzfrage: Ein Verstärker soll 5V Maximalspannung bringen. Die Slewrate ist $0,5\text{V}/\mu\text{s}$. Welche Frequenz wird noch sauber übertragen?

9. Aufgabe – Bandpass

Untersuchen Sie die Funktion folgender Schaltung. Lassen Sie dabei gedanklich jeweils einen Kondensator weg. Beschreiben Sie wie sie dies tun und warum. Welche Schaltungen haben Sie dann vor sich?



Berechnen Sie entsprechende Frequenzen und skizzieren Bode Diagramm für die gesamte Schaltung unter der Annahme folgender Werte: $R = R_1 = R_2 = 15,8\text{k}\Omega$ und $C_1 = 200\text{nF}$, $C_2 = 1\text{nF}$. Nehmen Sie dabei den OPV als ansonsten ideal an. Wie würden Sie die Schaltung beschreiben?

Zusatzfrage: Leiten Sie die Übertragungsfunktion her. (Lösung siehe z.B. Vorlesung)

Lösungen zu SUM Übungsblatt 2 OPV-2 – Dynamische Eigenschaften und weiteres

1. Aufgabe - Slewrate:

z.B. 2 Perioden = $2 \cdot 5 \mu\text{s}$ eines ideal verstärktes Rechtecks mit $8 \cdot 1,5 V_{PP} = 12 V_{PP}$ zeichnen, dann von Minimum mit Steigung der Slew-rate lineare Linie zeichnen. Es ergibt sich Dreieck mit $5 V_{PP}$

2. Aufgabe – Eigenschaften idealer und realer OPVs

	Idealer OPV	Realer OPV
Differenzverstärkung A_D	∞	$10^4 \dots 10^7$
(Bemerkung: auch Leerlaufverstärkung V_0 bei $f=0$)		
Gleichtaktverstärkung A_G	0	$A_D/10^4 \dots A_D/10^7$
(Bemerkung: Das Verhältnis von A_D zu A_G nennt man Gleichtaktunterdrückung, englisch Common Mode Rejection Ratio. Die CMMR wird auch manchmal in dB angegeben.)		
$CMMR = A_D / A_G $		
Eingangsströme I_e	$I_P=I_N=0$	$I_P \approx I_N \approx A \dots \text{pA} \dots \text{nA} \dots \mu\text{A}$
Eingangswiderstand	$R_e = \infty$	$r_D = dU_D/dI_e \approx M\Omega \dots T\Omega$ $r_G = dU_D/dI_e \approx G\Omega \dots T\Omega$
Ausgangswiderstand	$R_e = 0$	$r_a = dU_a/dI_a \approx 100 \Omega$ Bei Gegenkopplung $m\Omega \dots \Omega$
Offset U_0 (am Eingang)	0	$\mu\text{V} \dots \text{mV}$
Bandbreite	0 ... ∞	$f_T = 500\text{kHz} \dots \mathbf{2\text{MHz}} \dots 200\text{MHz}$

Weitergehende Informationen zur Bandbreite:

Auf Grund interner Kapazitäten im OPV wird bei der Transitfrequenz f_T die Verstärkung 1. In einer Verstärkerschaltung nimmt

die frequenzabhängige Verstärkung je nach eingestelltem Verstärkungsfaktor ab der Grenzfrequenz f_G mit 20dB pro Dekade (der Frequenz) ab.

Alle Verstärkungskurven für verschiedene Verstärkungen eines OPV Typs laufen in den Wert der Transitfrequenz. Daher bleibt das Produkt aus Grenzfrequenz und Verstärkungsfaktor konstant und gleich der Transitfrequenz, man nennt die das

Verstärkungs-Bandbreite-Produkt

$$f_G \cdot A_D(f_G) = f_T$$

3. Aufgabe – Bode Diagramm OPV

Aus Diagramm lässt sich Transitfrequenz $f_T = 1 \text{ MHz}$ ablesen. Gefordert ist $A_D(f_G) = 100$.

Aus Verstärkungs-Bandbreite-Produkt erhält man:

$$f_G = f_T / A_D(f_G) = 1 \text{ MHz} / 100 = 10 \text{ kHz}$$

Hinweis: Vollständiges Datenblatt OPA129 siehe Stud-Pub-Verzeichnis oder Internet bei TI (Texas Instruments):

$$v = 1 + R_2/R_1$$

$$\Rightarrow R_2 = R_1 \cdot (v - 1)$$

Alternativen z.B. $R_2 = 500 \text{ k}\Omega \Rightarrow R_1 = 5,05(05) \text{ k}\Omega$, oder $R_1 = 1 \text{ k}\Omega \Rightarrow R_2 = 99 \text{ k}\Omega$

Verstärkung jetzt: $v = 2,5 \text{ V} / 5 \text{ mV} = 500$

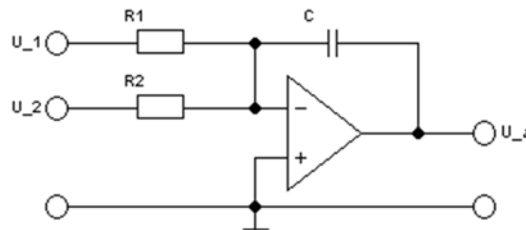
Damit folgt $f_G = f_T / v = 1 \text{ MHz} / 500 = 2 \text{ kHz}$

Phasendrehung bei Grenzfrequenz ist -45° . Die Formel hierfür ist $h = -\arctan(f / f_G)$
 Hinweis: Bode-Diagramme aus Vorlesung ansehen/vergleichen.

Kleinere Verstärkung: $f_{G2} = f_T / v = 1 \text{ MHz} / 10 = 100 \text{ kHz}$

4. Aufgabe - Doppelintegrierer

Schaltplan des invertierenden Integrators mit zwei Eingängen:



Die Spannungen $u_1(t)$ und $u_2(t)$ erzeugen Ströme $i_1(t)$ und $i_2(t)$, die den Kondensator laden, so dass eine negative Ausgangsspannung $u_a(t)$ am Kondensator entsteht:

Mit $R_1=R$ und $R_2=R/4$:

$$\begin{aligned} u_a(t) &= -u_C \\ &= -\frac{1}{C} \cdot \int_0^t (i_1(\tau) + i_2(\tau)) d\tau \\ &= -\frac{1}{C} \cdot \int_0^t \left(\frac{u_1(\tau)}{R} + \frac{4 \cdot u_2(\tau)}{R} \right) d\tau \\ &= -\frac{1}{RC} \cdot \int_0^t (u_1(\tau) + 4 \cdot u_2(\tau)) d\tau \end{aligned}$$

Nun noch $1/(RC) = 10/s \Rightarrow C = 1s / (10R)$

Mit z.B. $R=100 \text{ k}\Omega \Rightarrow C = 1 \mu\text{F}$

Verkettung (einfache Beispiele)

- zwei Integratoren: ein Rechteckimpuls \Rightarrow Lineare Rampe mit anschließendem Plateau \Rightarrow Parabel mit anschließender linearer Rampe. Achtung \Rightarrow irgendwann ist die Betriebsspannung erreicht.
- Differenzierer mit nachfolgendem Integrierer \Rightarrow Konstante des Eingangssignals entfällt, jedoch potentielle Probleme wenn, minimaler Offset des ersten Differenzierers, da dann dieses Signal aufintegriert wird. Einfacher: Hochpassfilter, vergleiche AC gegenüber DC Eingang bei Oszilloskop.

5. Aufgabe – Verkettete Integrierer:

Zeitkonstante $\tau = R \cdot C$ bei

$$U_{OUT} = -\frac{1}{RC} \cdot \int_0^t U_{IN}(\tau) d\tau$$

so, dass für Rechteckimpuls mit $t_1 = 1 \text{ s}$ Betrag des bei $U_{IN} = 1 \text{ V (const.)}$ $U_{OUT} = -0,5 \text{ V}$.

$$U_{OUT} = -1/\tau \cdot (t_1 \cdot U_{IN}) \quad (\text{aus Integralauswertung}) \Leftrightarrow \tau = -U_{IN} / U_{OUT} \cdot t_1$$

$$\Rightarrow \tau_1 = -1\text{V} / -0,5 \text{ V} \cdot 1\text{s} = 2 \text{ s}$$

$$\Rightarrow \tau_2 = \tau_1 / 4 = 0,5 \text{ s}$$

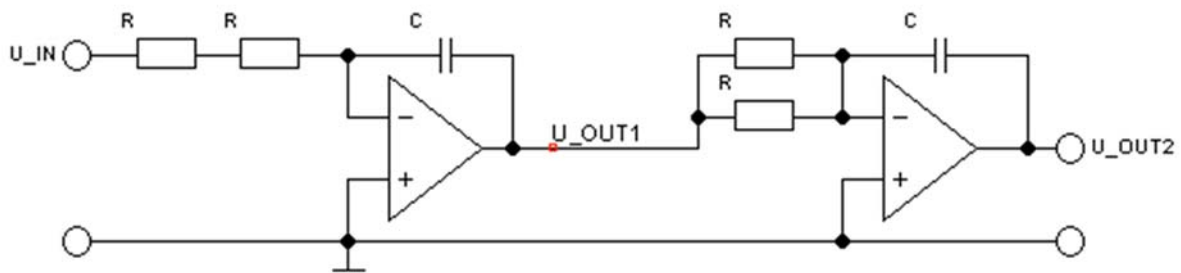
Berechnung der Bauteile:

$$C = 10 \mu\text{F} \Rightarrow R_1 = \tau_1 / C = 2 \text{ s} / 10 \mu\text{F} = 200 \text{ k}\Omega$$

$$\Rightarrow R_2 = \tau_2 / C = 0,5 \text{ s} / 10 \mu\text{F} = 50 \text{ k}\Omega$$

Identische Widerstände: nutze vier Widerstände a $R = 100 \text{ k}\Omega$ in Reihen- bzw. Parallelschaltung.

Zeichnung Schaltbild:



Formeln:

$$U_{OUT1} = 0 \text{ V für } t \leq t_0 = 0 \text{ s.}$$

U_{OUT1} (aus Integralauswertung) für $t=t_0$ bis $t = t_1$

$$U_{OUT1}(t) = -1/\tau_1 \cdot (t \cdot U_{PULS})$$

U_{OUT1} für $t \geq t_1$:

$$U_{OUT1}(t) = -1/\tau_1 \cdot (t_1 \cdot U_{PULS}) \quad (= \text{konstant!})$$

$$U_{OUT2} = 0 \text{ V für } t \leq t_0 = 0 \text{ s.}$$

U_{OUT2} für $t=t_0$ bis $t=t_1$

$$U_{OUT2}(t) = -\frac{1}{\tau_2} \cdot \int_0^t U_{OUT1}(\tau) d\tau = -\frac{1}{\tau_2} \cdot \int_0^t \left(-\frac{1}{\tau_1} U_{PULS}\right) \cdot \tau d\tau = \frac{U_{PULS}}{\tau_1 \tau_2} \cdot \frac{t^2}{2}$$

U_{OUT2} für $t \geq t_1$:

$$\begin{aligned} U_{OUT2}(t) &= -\frac{1}{\tau_2} \cdot \int_{t_1}^t U_{OUT1}(\tau) d\tau + U_{OUT2}(t_1) \\ &= -\frac{1}{\tau_2} \cdot \int_{t_1}^t \left(-\frac{1}{\tau_1} t_1 \cdot U_{PULS}\right) d\tau + U_{OUT2}(t_1) \\ &= \frac{U_{PULS}}{\tau_1 \tau_2} \left[t_1 \cdot (t - t_1) + \frac{t_1^2}{2} \right] \end{aligned}$$

Werte-Berechnung für $t = 1 \text{ s}$

$$U_{OUT1}(1 \text{ s}) = -1 / 2 \text{ s} \cdot 1 \text{ s} \cdot 2 \text{ V} = -1 \text{ V}$$

$$U_{OUT1}(2 \text{ s}) = -1 \text{ V (da konstant ab 1 s)}$$

Bei U_{OUT2} auch (1 oder) 3 Zwischenwerte bis 1 s

$$U_{OUT2}(0,25 \text{ s}) = 2 \text{ V} / (2 \text{ s} \cdot 0,5 \text{ s}) \cdot (0,25 \text{ s})^2 / 2 = 0,0625 \text{ V}$$

$$U_{OUT2}(0,5 \text{ s}) = 0,25 \text{ V}$$

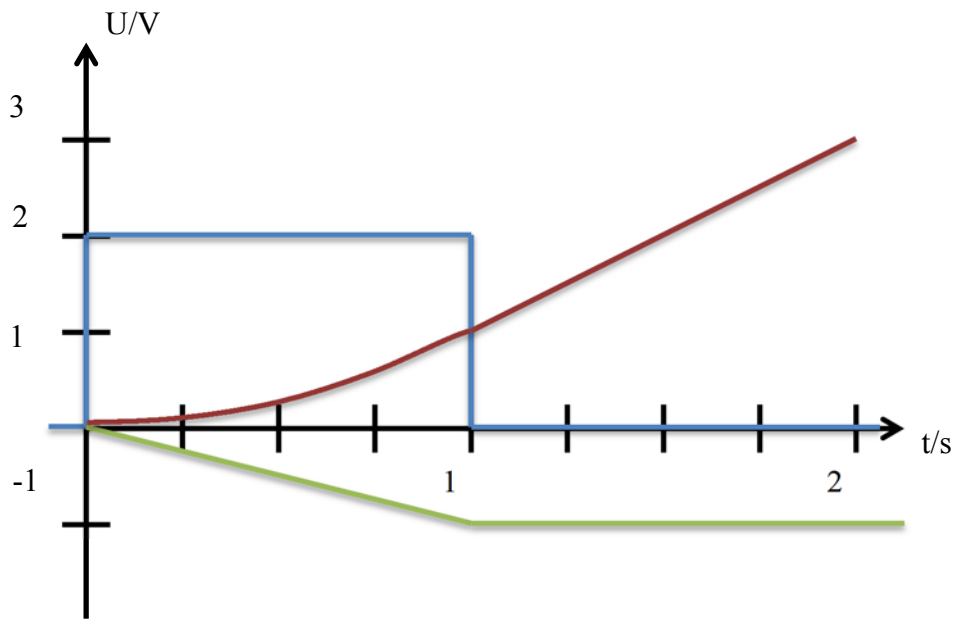
$$U_{OUT2}(0,75 \text{ s}) = 0,5625 \text{ V}$$

$$U_{OUT2}(1 \text{ s}) = 1 \text{ V}$$

Ab $t = 1 \text{ s}$ lineare Steigung bis $t = 2 \text{ s}$:

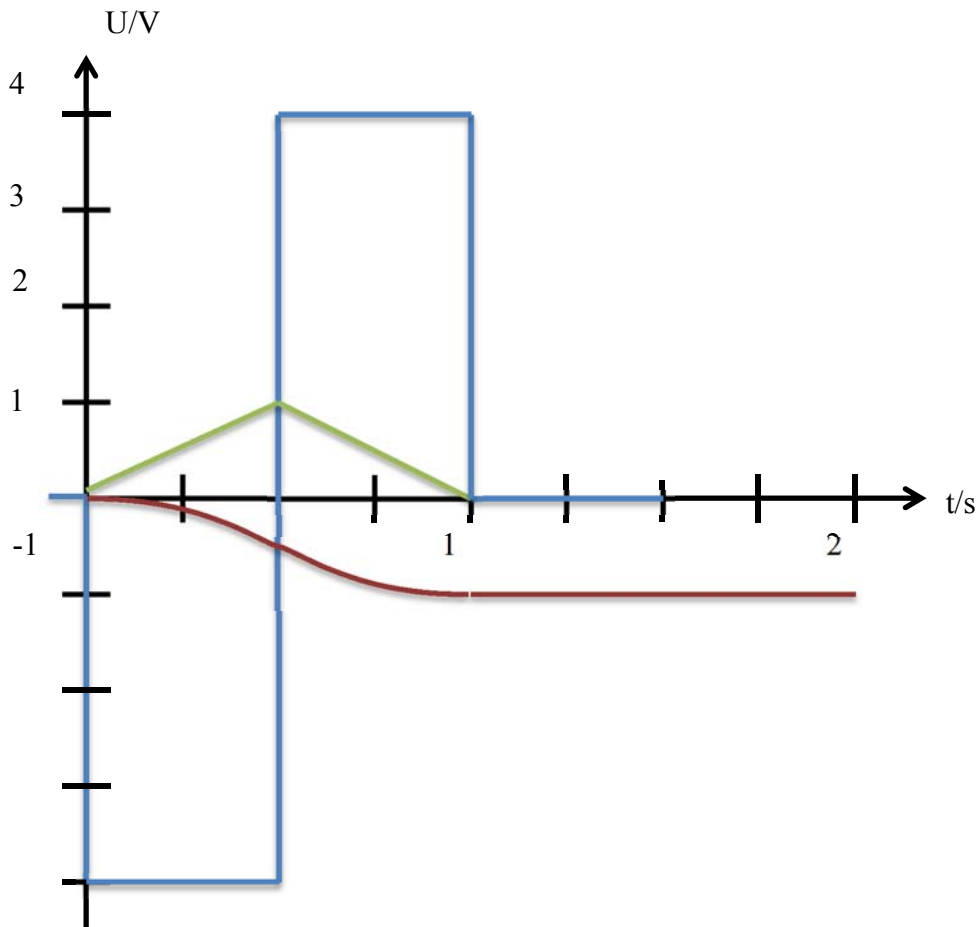
$$U_{OUT2}(2 \text{ s}) = 2 \text{ V} / (2 \text{ s} \cdot 0,5 \text{ s}) \cdot [1 \text{ s} \cdot (2 \text{ s} - 1 \text{ s})] + 1 \text{ V} = 3 \text{ V}$$

Damit erhält man:

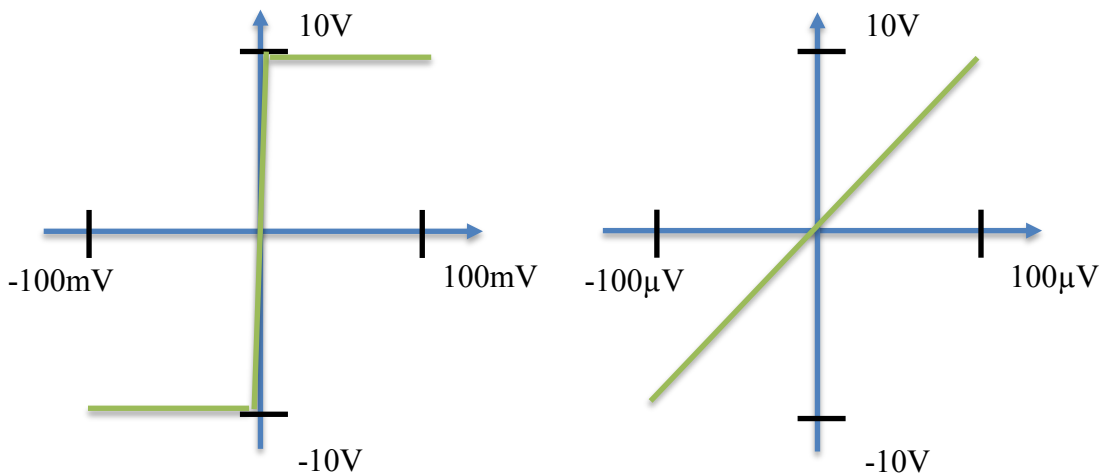


U_{IN} (Blau), U_{OUT1} (Grün), U_{OUT2} (Rot)

Zusatzfrage mit Dreieck bei U_{OUT1} : Die Kurven (blau/rot) erhält man entweder durch Werte mit o.g. Formeln berechnen oder aus Äquivalenzbetrachtungen für Fläche-unter-Kurve bzw. Steigungen bei Differenzieren oder Integrieren.



6. Aufgabe – OPV Übertragungskennlinie



7. Aufgabe – Filterschaltung

$$Z_C = 1/(j\omega C) \Rightarrow Z_{C||R_1} = R_1 \cdot Z_C / (R_1 + Z_C) = \dots = R_1 / (1 + j\omega R_1 C)$$

$$H(j\omega) = \underline{u}_a(j\omega) / \underline{u}_e(j\omega) = 1 + Z_{C||R_1} / R_2 = 1 + R_1 / (1 + j\omega R_1 C) \cdot (1/R_2) = 1 + R_1 / (R_2 + j\omega R_1 R_2 C)$$

„Kurvendiskussion“

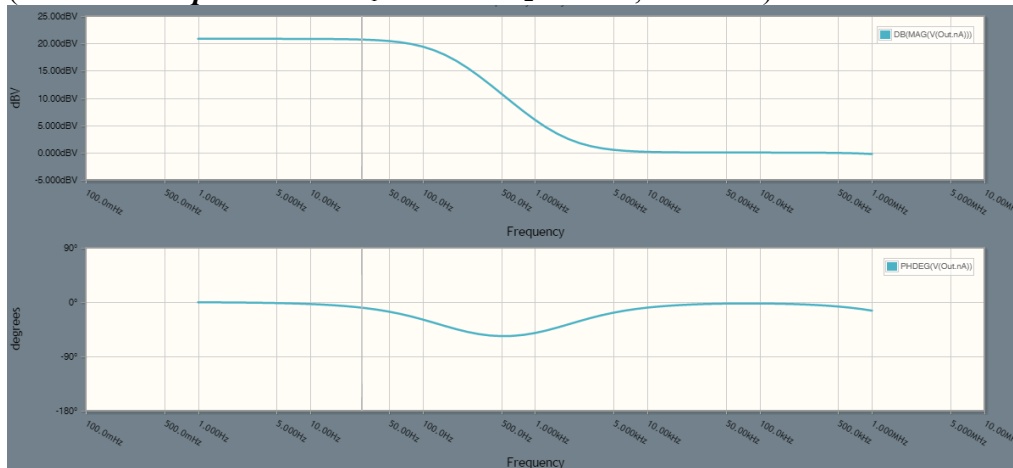
$$H_0 \text{ für } j\omega = 0 \text{ (DC)} = 1 + R_1 / R_2$$

$$H_\infty \text{ für } j\omega \rightarrow \infty \approx 1 = 0\text{dB}$$

Die Skizze für die Verstärkung ist damit klar.

Die Skizze für die Phase ist schwieriger, für beide Grenzwerte ist die Phase 0, Auswertung von H ergibt, dass der Imaginärteil negatives Vorzeichen hat, daher geht die Phase in der Übergangszone nach „unten“ zu negativen Werten.

(Hier mit Beispielwerten: $R_1 = 100 \text{ k}\Omega$ $R_2 = 10 \text{ k}\Omega$; $C = 10 \text{ nF}$)



8. Aufgabe – Slew Rate:

$$U_{OUT}(t) = U_0 \cdot \sin(\omega t) = U_0 \cdot \sin(2\pi \cdot f \cdot t)$$

$$U'(t) = U(t)/dt = U_0 \cdot 2\pi \cdot f \cdot \cos(2\pi \cdot f \cdot t)$$

$$U'_{MAX} = U_0 \cdot 2\pi \cdot f$$

Damit Sinus ohne Formveränderung übertragen wird muss

$$\Rightarrow f \leq SR / (2\pi \cdot U_0)$$

$$f = 0,5 \text{ V}/\mu\text{s} / (2\pi \cdot 5\text{V}) = 15,9 \text{ kHz}$$

Bemerkung mit $U_0 = v_f \cdot U_I$ für ein Sinusförmiges-Eingangssignal $U_{IN}(t) = U_I \cdot \sin(2\pi \cdot f \cdot t)$

$$f = SR / (2\pi \cdot v_f \cdot U_I)$$

9. Aufgabe – Bandpass :

1. Weglassen von C_1 , d.h. ersetzen durch direkte Verbindung, sonst kein Stromfluss \Rightarrow Schaltung wird zu Tiefpass-Filter
2. Weglassen von C_2 , d.h. komplett herauslassen, sonst wird Widerstand R_2 immer kurzgeschlossen, und die Verstärkung wird Null \Rightarrow Schaltung wird Hochpass-Filter.

Berechnung der Grenzfrequenzen

$$f_{G,TP} = 1 / (2\pi \cdot R \cdot C_2) = 1 / (2\pi \cdot 15,8k\Omega \cdot 1nF) \approx 10kHz$$

$$f_{G,HP} = 1 / (2\pi \cdot R \cdot C_1) = 1 / (2\pi \cdot 15,8k\Omega \cdot 200nF) \approx 50Hz$$

Bei der Grenzfrequenz fällt die Verstärkung um 3dB ab und die Phase dreht sich um 45° .

Die Phasendrehung für die Gesamtschaltung für Frequenzen f im mittleren Durchlassbereich $f_{G,HP} < f < f_{G,LP}$ ist 180° wegen der invertierenden Grundsaltung.

Es handelt sich um einen sogenannten Bandpassfilter mit der Verstärkung 1.

Im Bereich der Filterwirkung eilt die Phase beim Hochpass voraus, beim Tiefpass läuft sie nach, jeweils bis zu 90° . Damit lässt sich das Bode-Diagramm skizzieren.

Die nachfolgenden Bilder sind aus circuitlab.com Simulation. Die weitere Phasendrehung bei ca. 2 kHz ergeben sich aus der inneren Bandbegrenzung des OPV und waren hier nicht gefragt. In der Skizze sollte anstatt des Phasensprungs die Phase (entsprechend „Modulo 360° “) weiter kontinuierlich nach unten bis -270° gezeichnet werden (siehe gestrichelte Linie).

Bei den Grenzfrequenzen lässt sich der 3dB Abfall (orange) und recht/links davon die 20dB/Dekade Steigung des Abfalls einzeichnen:

