Elektrotechnik Übungsblatt

Aaron Duxler (01427540)

20. August 2021

1 Komplexe Zahlen

$$
\begin{aligned}
&z_1 = 1 - 1j \\
&r = \sqrt{1^2 + (-1)^2} \\
&r = \sqrt{2} \\
&\varphi = \arctan\left(\frac{-1}{1}\right) = -\frac{\pi}{4} \\
&z_1 = \sqrt{2} \cdot \left(\cos\left(-\frac{\pi}{4}\right) + j \cdot \sin\left(-\frac{\pi}{4}\right)\right) = \sqrt{2} \cdot e^{j \cdot -\frac{\pi}{4}}
\end{aligned}
$$

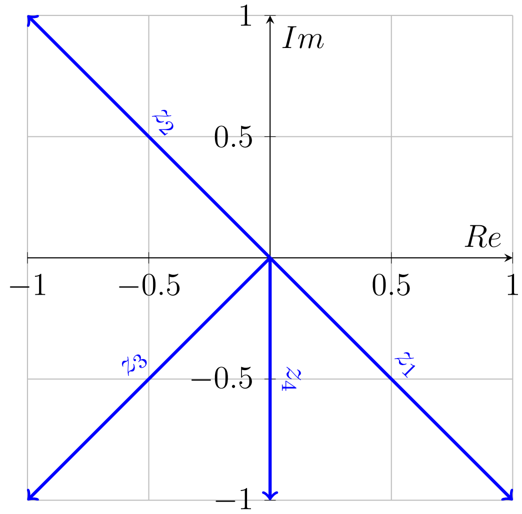
$$
\begin{aligned}
&z_2 = -1 + 1j \\
&r = \sqrt{2} \\
&\varphi = \arctan\left(\frac{1}{-1}\right) = -\frac{\pi}{4} + \pi = \frac{3\pi}{4} \\
&z_2 = \sqrt{2} \cdot \left(\cos\left(\frac{3\pi}{4}\right) + j \cdot \sin\left(\frac{3\pi}{4}\right)\right) = \sqrt{2} \cdot e^{j \cdot \frac{3\pi}{4}}
\end{aligned}
$$

$$
\begin{aligned}
&z_3 = -1 - 1j \\
&r = \sqrt{2} \\
&\varphi = \arctan\left(\frac{-1}{-1}\right) = \frac{\pi}{4} + \pi = \frac{5\pi}{4} \\
&z_3 = \sqrt{2} \cdot \left(\cos\left(\frac{5\pi}{4}\right) + j \cdot \sin\left(\frac{5\pi}{4}\right)\right) = \sqrt{2} \cdot e^{j \cdot \frac{5\pi}{4}}
\end{aligned}
$$

$$z_4 = \frac{1}{j} = \frac{1}{j} \cdot \frac{j}{j} = \frac{j}{-1} = -j$$
$$r = \sqrt{0 + (-1)^2} = \sqrt{1} = 1$$
$$\varphi = \frac{3\pi}{2}$$
$$z_4 = \cos\left(\frac{3\pi}{2}\right) + j \cdot \sin\left(\frac{3\pi}{2}\right) = e^{j \cdot \frac{3\pi}{2}}$$

$$z_1 \cdot z_2 = \sqrt{2} \cdot \sqrt{2} \cdot e^{j \cdot \left(-\frac{\pi}{4} + \frac{3\pi}{4}\right)} = 2 \cdot e^{j \cdot -\frac{\pi}{2}}$$
$$\frac{z_1}{z_2} = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{2}} \cdot e^{j \cdot \left(-\frac{\pi}{4} - \frac{3\pi}{4}\right)} = e^{j \cdot -\pi}$$
$$z_1 \cdot z_3 = \sqrt{2} \cdot \sqrt{2} \cdot e^{j\left(\cdot \frac{5\pi}{4} - \frac{\pi}{4}\right)} = 2 \cdot e^{j \cdot \pi}$$
$$\frac{z_1}{z_3} = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{2}} \cdot e^{j \cdot \left(-\frac{\pi}{4} - \frac{5\pi}{4}\right)} = e^{j \cdot -\frac{3\pi}{2}}$$
$$z_1 \cdot z_4 = \sqrt{2} \cdot 1 \cdot e^{j \cdot \left(\frac{3\pi}{2} - \frac{\pi}{4}\right)} = \sqrt{2} \cdot e^{j \cdot \frac{5\pi}{4}}$$
$$\frac{z_1}{z_4} = \frac{\sqrt{2}}{1} \cdot e^{j \cdot \left(-\frac{\pi}{4} - \frac{3\pi}{2}\right)} = \sqrt{2} \cdot e^{j \cdot -\frac{7\pi}{4}} = \sqrt{2} \cdot e^{j \cdot \frac{\pi}{4}}$$

$$\frac{z_3}{z_4} = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{2}} \cdot e^{j \cdot \left(\frac{5\pi}{4} - \frac{3\pi}{2}\right)} = e^{j \cdot -\frac{\pi}{4}}$$



2 LTI - System

Ein lineares System muss homogen und additiv sein.
Homogenität:
Eine Ursache führt zu einer Wirkung und eine k*fache Ursache führt auch zu einer k*fachen Wirkung.
Additivität:
Wenn Ursache1 zu Wirkung1 und Ursache2 zu Wirkung2 führt, dann muss Ursache1+Ursache2 auch zu Wirkung1+Wirkung2 führen.

Wenn man nun mit dem Funktionsgenerator einzelne Signale anlegt, muss der Faktor um den sich die Spannung am Ausgang ändert immer der selbe sein.
Anschließend kann man zwei oder mehr Signal gleichzeitig anlegen und überprüfen ob auch die Additivität gilt.

3 „Oszilloskop“ - Bild

$$A \cdot \cos(\omega t + \varphi)$$
$$3\ Perioden = 100\mu s$$
$$1\ Periode = \frac{100\mu s}{3} = 33.\dot{3}\mu s$$
$$Frequenz = \frac{1}{33.\dot{3}\mu s} = 30kHz$$
$$U(t) = 2.5 \cdot \cos(30 \cdot t - \arccos(\frac{2}{5})$$
$$U(t) \approx 2.5 \cdot \cos(30 \cdot t - 1.16)$$

4 Einschaltvorgang

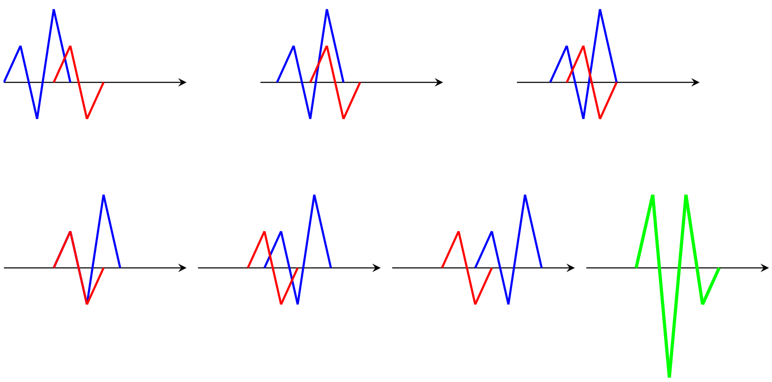
- Spannungsabfall an R2 ist 0. Der Kondensator verhält sich kurz nach dem Schließen wie ein Kurzschluss. Der gesamte Strom fließt über C1.
- An R2 beträgt der Spannungsabfall 5V. Der Kondesator verhält sich nach längerer Zeit wie ein unendlich großer Widerstand.

5 diskrete Faltung

$$g_f[n] = g_1[n] * g_2[n] = \sum_{k=-\infty}^{\infty} g_1[n-k]g_2[k]$$

k	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	
	0	0	0	0	1	-1	2	0	0	g[-k]
n	0	0	0	0	1	-1	0	0	0	h[k]
-1	0	1	-1	2	0	0	0	0	0	0
0	0	0	1	-1	2	0	0	0	0	2
1	0	0	0	1	-1	2	0	0	0	-3
2	0	0	0	0	1	-1	2	0	0	2
3	0	0	0	0	0	1	-1	2	0	-1
4	0	0	0	0	0	0	1	-1	2	0

$$g_f = [0 \quad 2 \quad -3 \quad 2 \quad -1 \quad 0]$$



6 komplexes Signal

$$f(t) = 4 \cdot e^{-2000sec^{-1} \cdot t} \cdot \cos\left(6283.2\frac{rad}{sec} \cdot t + 30°\right)$$

$A = 4$

$\varphi = 30°$

$\omega = 6283.2\frac{rad}{sec}$

$\sigma = 2000sec^{-1}$

$$\underline{s}(t) = Ae^{j(\omega_0 t+\varphi)} = A \cdot \cos(\omega_0 t + \varphi) + jA\sin(\omega_0 t + \varphi)$$

$$e^{jx} = \cos(x) + \sin(x)$$

$$\underline{s} = \sigma + j\omega$$

$$Ae^{j(\omega_0 t+\varphi)} = Ae^{j\varphi}e^{j\omega_0 t} = Ae^{j\varphi}e^{(\sigma+j\omega)t} = \underline{X}e^{\underline{s}t} =$$

$$\underbrace{Ae^{j\varphi}}_{\text{komplexe Amplitude}} \overbrace{e^{\sigma t}}^{\text{zeitliche Amplitudenänderung}} \underbrace{e^{j\omega t}}_{\text{komplexe Schwingung}}$$

$$\underline{s}(t) = \underline{X}e^{\underline{s}t} = 4 \cdot e^{j \cdot 30^\circ} \cdot e^{-2000 sec^{-1}} \cdot e^{j 6283.2 \frac{rad}{sec} \cdot t}$$

Abbildung 1: Lage des Signals in der $\underline{s}$-Ebene

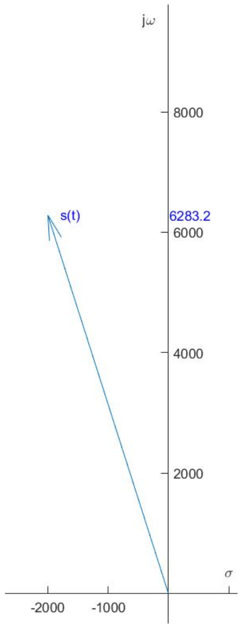
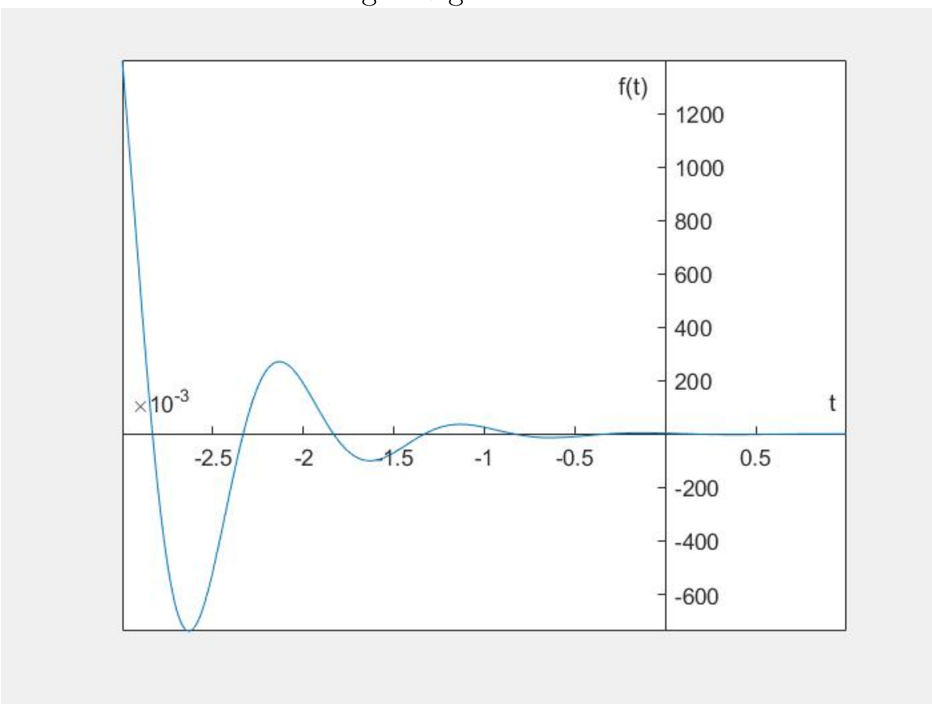


Abbildung 2: Signalverlauf im Zeitbereich



7 Widerstandsschaltung

$$R_{2L} = R_2 + R_L = 2k\Omega$$
$$R_{23L} = \frac{R_{2L} \cdot R_L}{R_{2L} + R_L} = \frac{2 \cdot 1}{2+1} = \frac{2}{3}k\Omega$$
$$R_{Ges} = 1 + \frac{2}{3} = \frac{5}{3}k\Omega$$

$$\frac{U_3}{U_{ges}} = \frac{R_{23L}}{R_{ges}} = \frac{\frac{2}{3}}{\frac{5}{3}} = \frac{2}{5}$$
$$U_3 = 1 \cdot \frac{2}{5} = \frac{2}{5}V$$
$$\frac{U_L}{U_3} = \frac{R_L}{R_2 + R_L}$$
$$\frac{U_L}{\frac{2}{5}} = \frac{1}{1+1}$$
$$U_L = \frac{1}{2} \cdot \frac{2}{5} = \frac{1}{5}V$$

Innenwiderstand:

$$R_{13} = \frac{R_1 \cdot R_3}{R_1 + R_3} = \frac{1 \cdot 1}{1+1} = \frac{1}{2}$$
$$R_I = R_{13} + R_2 = \frac{1}{2} + 1 = \frac{3}{2}k\Omega$$

Leerlaufspannung:

$$\frac{U_{LL}}{U_{ges}} = \frac{R_3}{R_1 + R_3}$$
$$\frac{U_{LL}}{1} = \frac{1}{2}$$
$$U_{LL} = \frac{1}{2}V$$

Kurzschlussstrom:

$$I_K = \frac{U_{LL}}{R_I} = \frac{\frac{1}{2}V}{\frac{3}{2}k\Omega} = 333.\dot{3}\mu A$$

8 Leistung in einem Widerstandsnetzwerk

8.1 Leistung an R2:

$$P = U \cdot I$$
$$I = \frac{U}{R}$$
$$P = U \cdot \frac{U}{R}$$
$$P = \frac{U_2^2}{R_2}$$

$$\frac{U_2}{U_{ges}} = \frac{R_2}{R_{ges}}$$
$$P_2 = \frac{\left(\frac{R_2}{R_1+R_2} \cdot U_{ges}\right)^2}{R_2} = \frac{R_2 \cdot U_{ges}^2}{(R_1 + R_2)^2}$$

8.2 Maximum an R2:

$$\frac{\partial}{\partial R_2}\left(\frac{R_2 \cdot U_{ges}^2}{(R_1+R_2)^2}\right) = 0$$

Quotientenregel anwenden

$$f(x) = \frac{u(x)}{v(x)}$$
$$f'(x) = \frac{u'(x)\cdot v(x) - u(x)\cdot v'(x)}{(v(x))^2}$$

$$\frac{U_{ges}^2 \cdot (R_2+R_1)^2 - R_2 \cdot U_{ges}^2 \cdot \frac{\partial}{\partial R_2}(R_1+R_2)^2}{\left((R_1+R_2)^2\right)^2}$$

Produktregel anwenden

$$f(x) = u(x)\cdot v(x)$$
$$f'(x) = u'(x)\cdot v(x) + u(x)\cdot v'(x)$$

$$\frac{U_{ges}^2 \cdot (R_1+R_2)^2 - R_2 \cdot U_{ges}^2 \cdot 2 \cdot (R_1+R_2)}{(R_1+R_2)^4} = \frac{U_{ges}^2(R_1-R_2)}{(R_1+R_2)^3}$$

Einsetzen

$$\frac{U_{ges}^2(100-R_2)}{(100+R_2)^3} = 0$$
$$R_2 = 100\Omega$$

9 Wasserkocher

$$
\begin{aligned}
&P = 1500W \\
&U = 230V \\
&U \cdot I = P \\
&230 \cdot I = 1500 \\
&I = \frac{1500}{230} = \frac{150}{23}A \\
&I \approx 6.52A
\end{aligned}
$$

$$
\begin{aligned}
&U = R \cdot I \\
&R = \frac{U}{I} \cdot I = 1500 \\
&R = \frac{230}{\frac{150}{23}} = \frac{529}{15} \\
&R = 35.2\dot{6}\Omega
\end{aligned}
$$

10 Knotenregel

$$2A + 3A + i_a = 0 \tag{1}$$
$$i_a = 5A \tag{2}$$

$$1A - 3A - i_1 = 0 \tag{3}$$
$$i_1 = -2A \tag{4}$$
$$i_1 - 2A - i_b = 0 \tag{5}$$
$$i_b = -4A \tag{6}$$

$$4A - 3A - i_2 = 0 \tag{7}$$
$$i_2 = 1A \tag{8}$$
$$i_2 - (-1A) - i_c = 0 \tag{9}$$
$$i_c = 2A \tag{10}$$

11 Maschenregel

$$0 = 3V + 5V - U_1 - 2V$$
$$0 = 6V - U_1$$
$$U_1 = 6V$$

$$0 = 6V + 10V - 6V - U_2$$
$$0 = 10V - U_2$$
$$U_2 = 10V$$

$$-2V - 6V + U_3 = 0$$
$$-2V - 6V = -U_3$$
$$U_3 = 8V$$

12 Widerstand in einem Fernsehgerät

$$U = R \cdot I$$
$$P = U \cdot I$$

$$U = 1k\Omega \cdot I$$
$$0.25W = (1k\Omega \cdot I) \cdot I$$
$$1 \cdot 10^3 \cdot I^2 = 0.25$$
$$I^2 = 0.25 \cdot 10^{-3}$$
$$I = 15.8mA$$

$$U = R \cdot I$$
$$U = 1 \cdot 10^3 \cdot 15.8 \cdot 10^{-3}$$
$$U = 15.8V$$

13 Ersatzwiderstände

a) $$\frac{\frac{3\cdot 2}{3+2}\cdot 6}{\frac{3\cdot 2}{3+2}+6}+2=3\Omega$$

b) $$\frac{200\cdot 50}{200+50}+\frac{100\cdot 25}{100+25}=60\Omega$$

c)

$$R_{36}=\frac{3\cdot 6}{3+6}=2\Omega \qquad R_{368}=2+8=10\Omega$$
$$R_{ges}=\frac{10\cdot 10}{10+10}=5\Omega$$

d)

$$R_{12}=1+2=3k\Omega$$
$$R_{126}=\frac{3\cdot 6}{3+6}=2k\Omega$$
$$R_{ges}=\frac{2\cdot 6}{2+6}=\frac{3}{2}k\Omega$$

14 RLC-Filter

a) Tiefpassfilter 3.Ordnung -60dB/dec
b) Übertragungsfunktion berechnen:

$$\underline{H(s)} = \frac{V2}{V1}$$

$$Z_{C_2L} = L + C_2$$

$$Z_{ges} = \frac{Z_{C_2L} \cdot Z_{C_1} + Z_R \cdot (Z_{C_1L} + Z_{C_1})}{Z_{C_2L} + Z_{C_1}}$$

$$U_{C_1} = U_e \cdot \frac{\frac{(Z_L+Z_{C_2})\cdot Z_{C_1}}{Z_L+Z_{C_2}+Z_{C_1}}}{Z_{ges}}$$

$$U_{C_1} = U_e \cdot \frac{\frac{(Z_L+Z_{C_2})\cdot Z_{C_1}}{\cancel{Z_L+Z_{C_2}+Z_{C_1}}}}{\frac{(Z_L+Z_{C_2})\cdot Z_{C_1}+Z_R\cdot((Z_L+Z_{C_2})+Z_{C_1})}{\cancel{Z_{C_2}+Z_L+Z_{C_1}}}}$$

$$\frac{U_{C_2}}{U_{C_1}} = \frac{Z_{C_2}}{Z_L + Z_{C_2}}$$

$$U_{C_2} = \frac{Z_{C_2}}{Z_L + Z_{C_2}} \cdot U_{C_1}$$

$$U_{C_2} = \frac{Z_{C_2}}{Z_L + Z_{C_2}} \cdot U_e \cdot \frac{(Z_L + Z_{C_2}) \cdot Z_{C_1}}{(Z_L + Z_{C_2}) \cdot Z_{C_1} + Z_R \cdot ((Z_L + Z_{C_2}) + Z_{C_1})}$$

$$\frac{U_a}{U_e} = \frac{\frac{1}{sC_2}}{sL + \frac{1}{sC_2}} \cdot \frac{(sL + \frac{1}{sC_2}) \cdot \frac{1}{sC_1}}{(sL + \frac{1}{sC_2}) \cdot \frac{1}{sC_1} + R \cdot (sL + \frac{1}{sC_2} + \frac{1}{sC_1})}$$

$$\frac{U_a}{U_e} = \frac{\frac{1}{sC_2}}{\frac{sLsC_2}{sC_2} + \frac{1}{sC_2}} \cdot \frac{(sL + \frac{1}{sC_2}) \cdot \frac{1}{sC_1}}{(sL + \frac{1}{sC_2}) \cdot \frac{1}{sC_1} + R \cdot (sL + \frac{1}{sC_2} + \frac{1}{sC_1})}$$

$$\frac{U_a}{U_e} = \frac{\frac{1}{sC_2}}{\frac{sLsC_2}{sC_2} + \frac{1}{sC_2}} \cdot \frac{\frac{sLsC_2+1}{sC_2} \cdot \frac{1}{sC_1}}{\frac{sLsC_2+1}{sC_2} \cdot \frac{1}{sC_1} + R \cdot (sL + \frac{1}{sC_2} + \frac{1}{sC_1})}$$

$$\frac{U_a}{U_e} = \frac{1}{\cancel{sLsC_2 + 1}} \cdot \frac{\cancel{(sLsC_2 + 1)} \cdot \frac{1}{sC_1}}{(sLsC_2 + 1) \cdot \frac{1}{sC_1} + sC_2R \cdot (sL + \frac{1}{sC_2} + \frac{1}{sC_1})}$$

$$\frac{U_a}{U_e} = \frac{1}{sLsC_2 + 1 + sC_1sC_2R \cdot (sL + \frac{1}{sC_2} + \frac{1}{sC_1})}$$

$$\frac{U_a}{U_e} = \frac{1}{s^2LC_2 + 1 + s^3RC_1C_2L + sC_1R + sC_2R}$$

c) Betrag Frequenzgang:

$$H(j\omega) = \frac{1}{(j\omega)^2 LC_2 + 1 + (j\omega)^3 RC_1C_2L + (j\omega)C_1R + (j\omega)C_2R}$$
$$H(j\omega) = \frac{1}{j(\omega C_1R + \omega C_2R - \omega^3 RLC_1C_2) - \omega^2 C_2L + 1}$$
$$|H(j\omega)| = \frac{1}{\sqrt{(1-\omega^2C_2L)^2 + (\omega C_1R + \omega C_2R - \omega^3 RLC_1C_2)^2}}$$

15 Integrator mit Operationsverstärker

$$A = \frac{U_a}{U_e} = -\frac{R_F}{R_1}$$

$$\underline{H}(\underline{s}) = \frac{\underline{U}_a(\underline{s})}{\underline{U}_e(\underline{s})} = -\frac{\frac{\frac{1}{sC}\cdot R_2}{\frac{1}{sC}+R_2}}{R_1} = -\frac{\frac{1}{sC}\cdot R_2}{(\frac{1}{sC}+R_2)\cdot R_1} = -\frac{R_2}{R_1 + sCR_1R_2}$$
$$H(j\omega) = -\frac{R_2}{R_1 + j\omega CR_1R_2}$$

16 Passives Filter

Es handelt sich um einen Hochpass 2.Ordnung

$$s_1 : -U_e + R_1 + sL_1 = 0$$
$$s_2 : -sL_1 + R_2 + sL_2 = 0$$

$$-U_e + R_1 \cdot i_1 + \overbrace{sL_1 \cdot i_1 - sL_1 i_2}^{+L_1} = 0$$
$$R_2 \cdot i_2 + sL_2 \cdot i_2 - \underbrace{sL_1 \cdot i_2 + sL_1 \cdot i_1}_{L_1} = 0$$
$$\begin{pmatrix} R_1 + sL_1 & -sL_1 \\ sL_1 & R_2 + sL_2 - sL_1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} i_1 \\ i_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} U \\ 0 \end{pmatrix}$$
$$i = Z_M^{-1} \cdot u$$

$$A^{-1} = \frac{1}{det(A)} \begin{pmatrix} d & -b \\ -c & a \end{pmatrix}$$
$$Z_M^{-1} = \begin{pmatrix} \frac{-sL_1+sL_2+sR_2}{sL_1(sL_2+R_2-R_1)+R_1(sL_2+R_2)} & \frac{sL_1}{sL_1(sL_2+R_2-R_1)+R_1(sL_2+R_2)} \\ -\frac{sL_1}{sL_1(sL_2+R_2-R_1)+R_1(sL_2+R_2)} & \frac{sL_1+R_1}{sL_1(sL_2+R_2-R_1)+R_1(sL_2+R_2)} \end{pmatrix}$$
$$i_2 = \frac{sL_1}{sL_1(sL_2 + R_2 - R_1) + R_1(sL_2 + R_2)} \cdot u$$
$$\underbrace{i_2 \cdot sL_2}_{U_a} = \frac{sL_1 sL_2}{sL_1(sL_2 + R_2 - R_1) + R_1(sL_2 + R_2)} \cdot u$$
$$H(s) = \frac{U_a}{U_e} = \frac{sL_1 sL_2}{sL_1(sL_2 + R_2 - R_1) + R_1(sL_2 + R_2)}$$

17 Sallen-Key-Tiefpassfilter

$$K_1 : I_1 - I_2 - I_3 \qquad K_2 : I_2 - I_4$$

$$I_1 = \frac{U_e - U_1}{R_1} \qquad I_2 = \frac{U_1 - U_2}{R_2}$$

$$I_3 = \frac{U_1 - U_2}{\frac{1}{sC_2}} \qquad I_4 = \frac{U_2}{\frac{1}{sC_1}}$$

$$K_1 : \underbrace{\frac{U_e - U_1}{R_1}}_{I_1} - \underbrace{\frac{U_1 - U_2}{R_2}}_{I_2} - \underbrace{(U_1 - U_2) \cdot sC_2}_{I_3} = 0$$

$$K_2 : \underbrace{\frac{U_1 - U_2}{R_2}}_{I_2} - \underbrace{U_2 \cdot sC_1}_{I_4} = 0$$

$$K_1 : u_1 \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} - sC_2 \right) + u_2 \left(\frac{1}{R_2} + sC_2 \right) + \frac{1}{R_1} \cdot U_e = 0$$

$$K_2 : u_1 \cdot \frac{1}{R_2} + u_2 \left(-\frac{1}{R_2} - sC_1 \right) = 0$$

$$\begin{pmatrix} -\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} - sC_1 & \frac{1}{R_2} + sC_1 \\ \frac{1}{R_2} & \frac{1}{R_2} - sC_1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} U_1 \\ U_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\frac{U_e}{R_1} \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} U_1 \\ U_2 \end{pmatrix} = Y_K^{-1} \begin{pmatrix} -\frac{U_e}{R_1} \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$A^{-1} = \frac{1}{det(A)} \begin{pmatrix} d & -b \\ -c & a \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} U_1 \\ U_2 \end{pmatrix} = \frac{1}{sC_1(sC_2R_2 + R_2 + R_1) + 1} \cdot \begin{pmatrix} -sC_1R_2R_1 - R_1 & -sC_2R_2R_1 - R_1 \\ -R_1 & -sC_2R_2R_1 - R_2 - R_1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} -\frac{U_e}{R_1} \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$U_2 = \left(-R_1 \cdot -\frac{U_e}{R_1}\right) \cdot \frac{1}{sC_1(sC_2R_2 + R_2 + R_1) + 1}$$

$$U_2 = \frac{U_e}{sC_1(sC_2R_2 + R_2 + R_1) + 1}$$

$$\frac{U_e}{U_2} = sC_1(sC_2R_2 + R_2 + R_1) + 1$$

$$\frac{U_a}{U_e} = \frac{1}{sC_1(sC_2R_2 + R_2 + R_1) + 1}$$

18 Matlab

Von Matlab erstellte Übertragungsfunktionen:

$$H(s)_{Bessel} = \frac{1}{s^5 + 3.811s^4 + 6.777s^3 + 6.886s^2 + 3.936s + 1}$$

$$H(s)_{Cauer} = \frac{0.04078s^4 + 0.1574s^2 + 0.1387}{s^5 + 0.5675s^4 + 1.633s^3 + 0.6766s^2 + 0.624s + 0.1387}$$

Abbildung 3: Amplitudengang

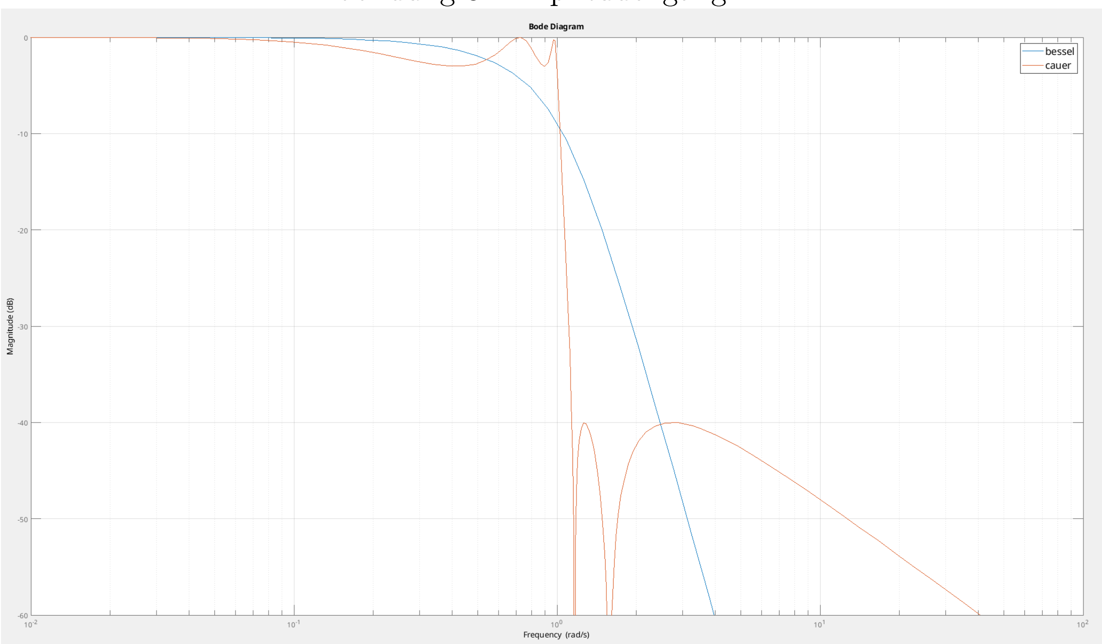


Abbildung 4: Pol-Nullstellendiagramm Cauer

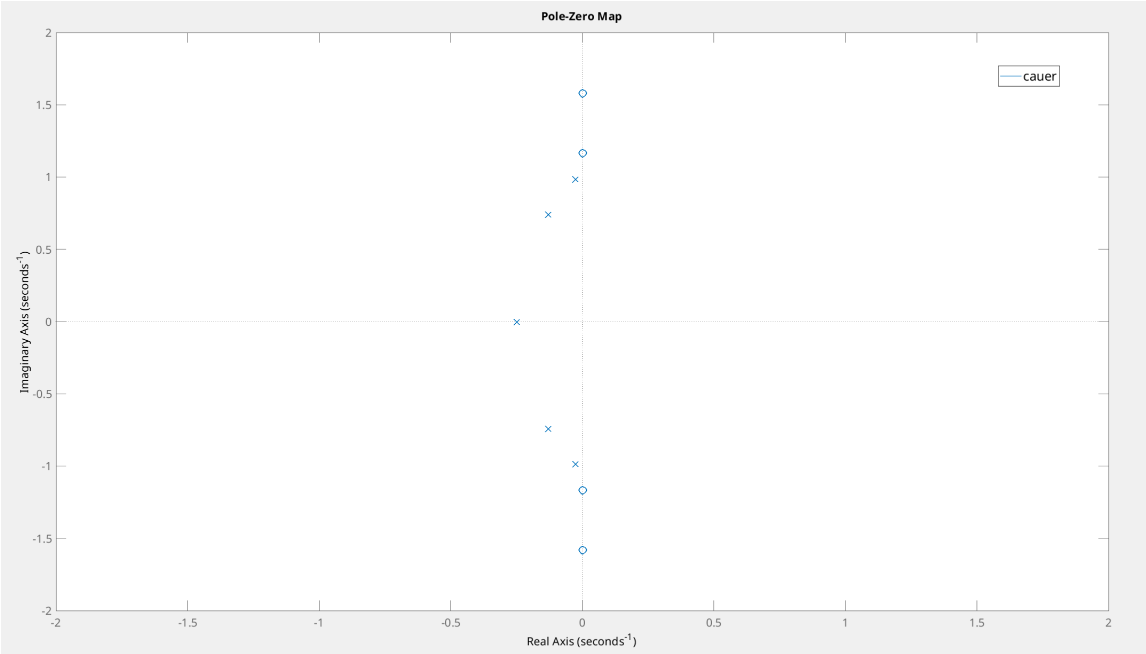
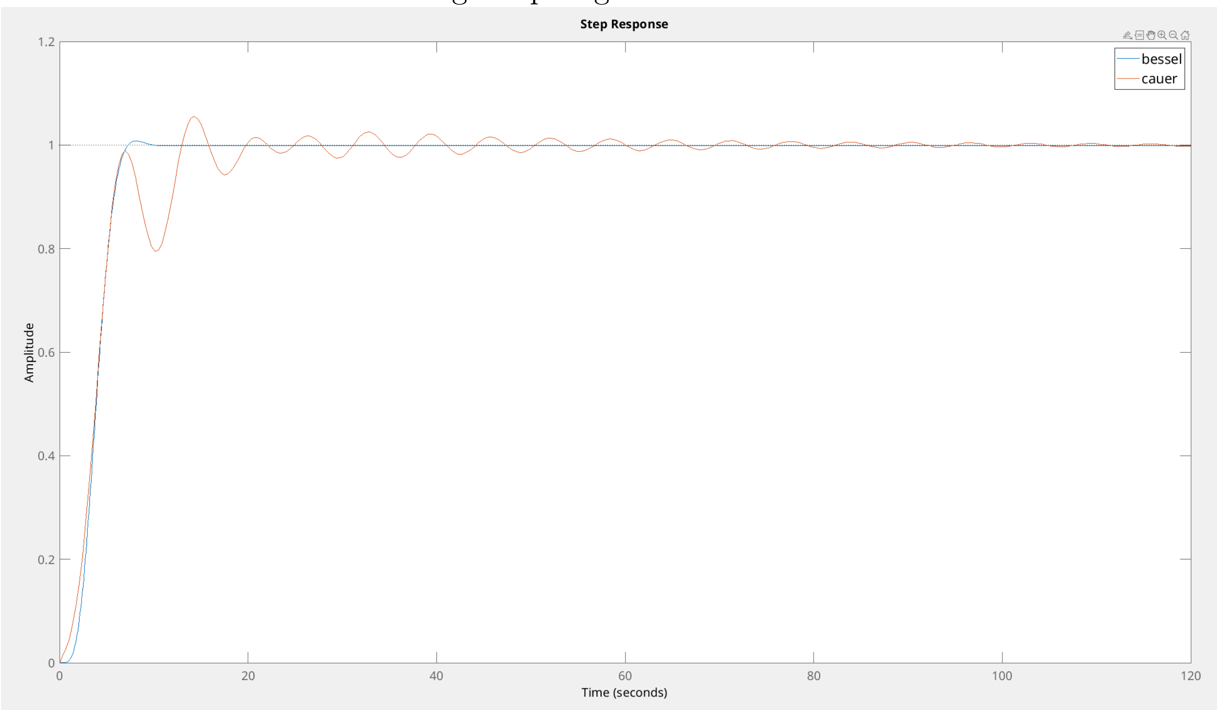


Abbildung 5: Sprungantwort



```
%% Bode-Diagram

opts = bodeoptions('cstprefs');
opts.PhaseVisible = 'off';
opts.YLim={[-60 0]};
[z,p,k] = besselap(5);
[num, den] = zp2tf(z,p,k);
bodeplot(tf(num,den),opts)

hold on;
[z,p,k] = ellipap(5,3,40);
[num, den] = zp2tf(z,p,k);
bodeplot(tf(num, den),opts)
legend('bessel','cauer')
grid on;

%% Pol-Nullstellen Cauer
fig = figure();
ax = axes();
[z,p,k] = ellipap(5,3,40);
[num, den] = zp2tf(z,p,k);
sys = tf(num, den);
pzmap(ax,sys)
legend('cauer')
l_zero = findall(ax, 'tag', 'PZ_Zero');
l_pole = findall(ax, 'tag', 'PZ_Pole');
l_zero.MarkerSize = 10;
l_pole.MarkerSize = 10;
l_zero.LineWidth = 2;
l_pole.LineWidth = 2;

%% Sprungantwort
[z,p,k] = besselap(5);
[num, den] = zp2tf(z,p,k);
step(tf(num,den))
hold on;
[z,p,k] = ellipap(5,3,40);
[num, den] = zp2tf(z,p,k);
step(tf(num,den))
legend('bessel', 'cauer')
```