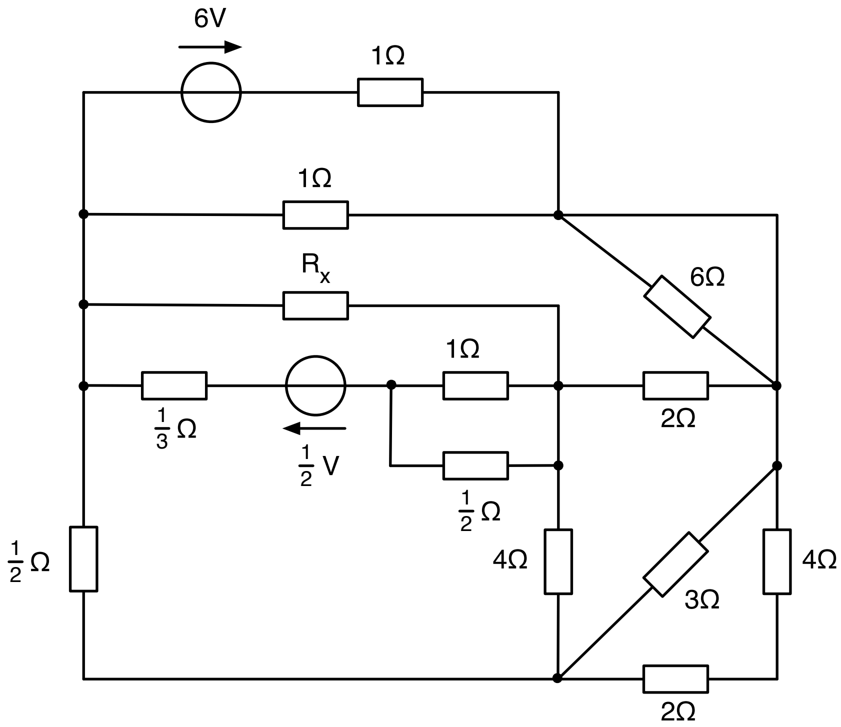
Universität Karlsruhe (TH)
**Institut für Biomedizinische Technik**

Prof. Dr. rer. nat. O. Dössel
Kaiserstr. 12 / Geb 30.33
Tel.: 0721 / 608 - 2650

Dipl. Ing. S. Seitz
Kaiserstr. 12 / Geb 30.33
Tel.: 0721 / 608 - 7182

# Vordiplomprüfung: Lineare elektrische Netze am 05. September 2007

## Aufgabe 1 (9 Punkte)

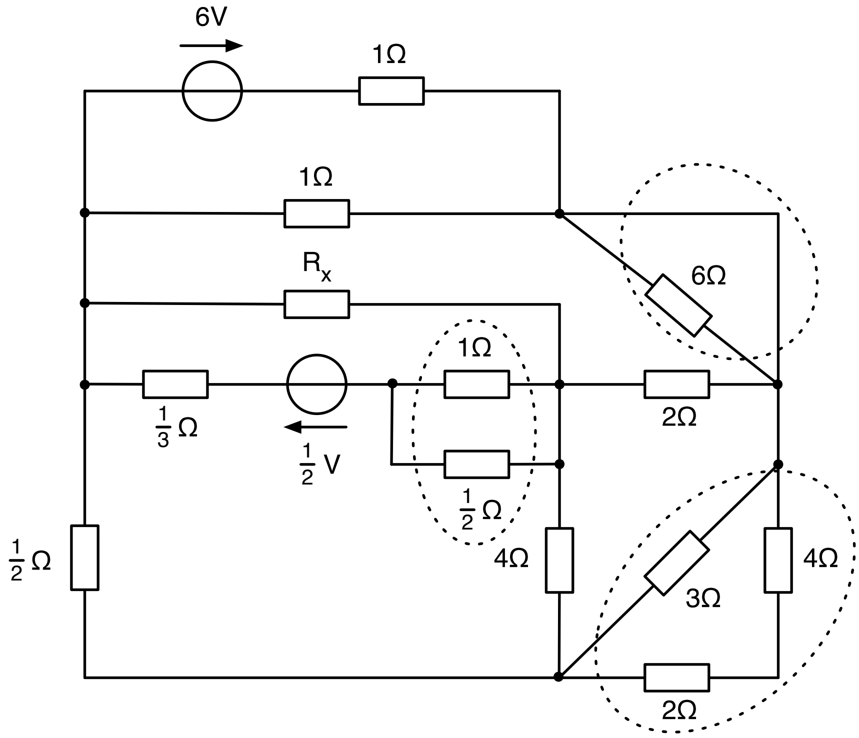



a) Vereinfachen Sie das Netzwerk so weit wie möglich, ohne dabei den Zweig mit $R_x$ zu verlieren. (8 Punkte)

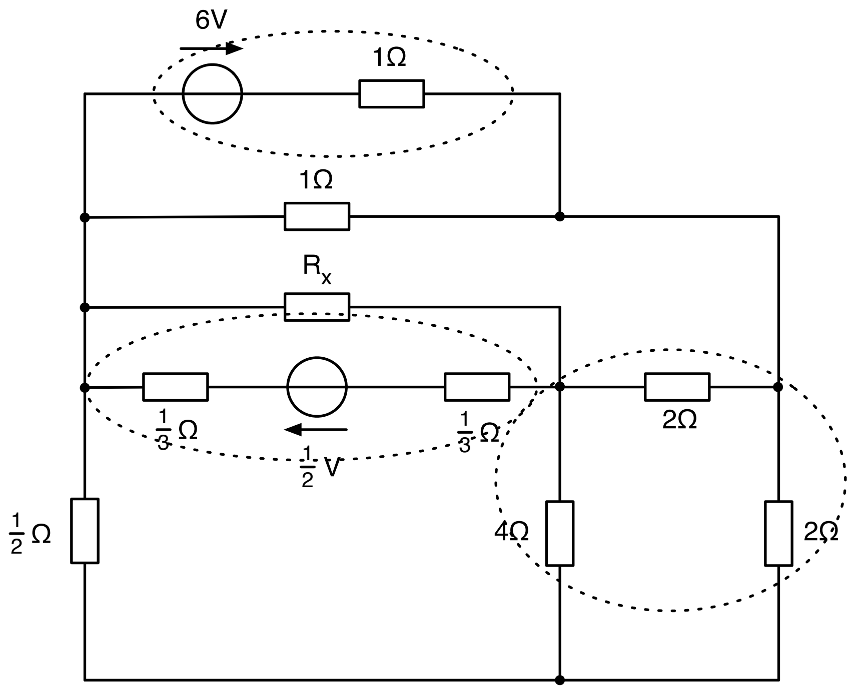
b) Wie muss $R_x$ gewählt werden, so dass über dem Widerstand $R_x$ eine Spannung von $\frac{2}{17}$ V abfällt? (1 Punkt)

## Aufgabe 1 (Lösung)

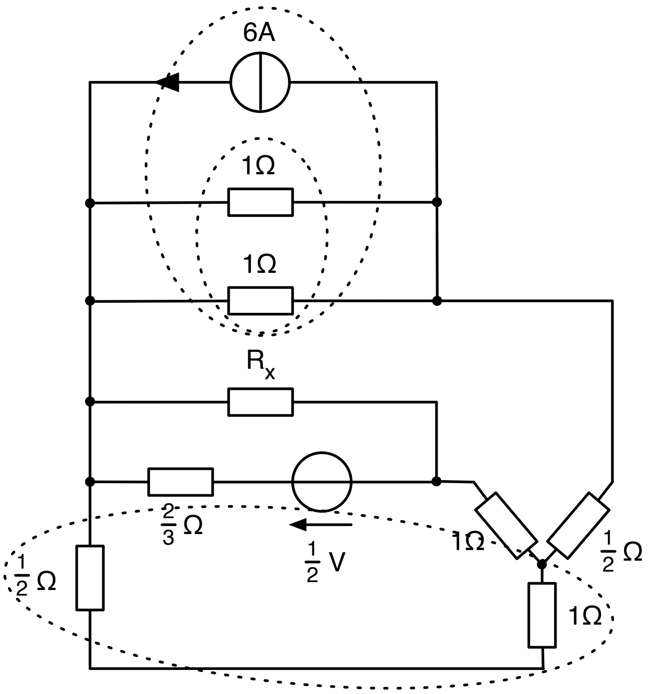
a)



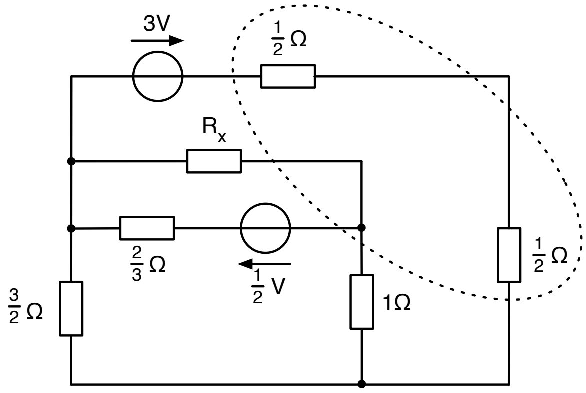

- der 6Ω-Widerstand wird durch den parallelen Leiter kurzgeschlossen 1 P.
- zwei Parallelschaltungen: 1Ω & 1/2Ω sowie (2Ω + 4Ω) & 3Ω



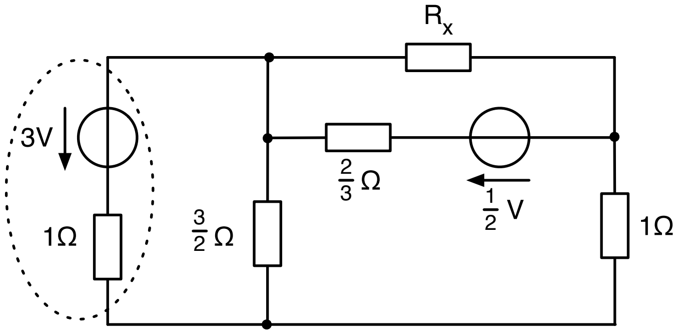

- Zusammenfassen von 1/3Ω und 1/3Ω
- Spannungsquelle in Stromquelle verwandeln
- Dreieck-Stern-Transformation 1 P.



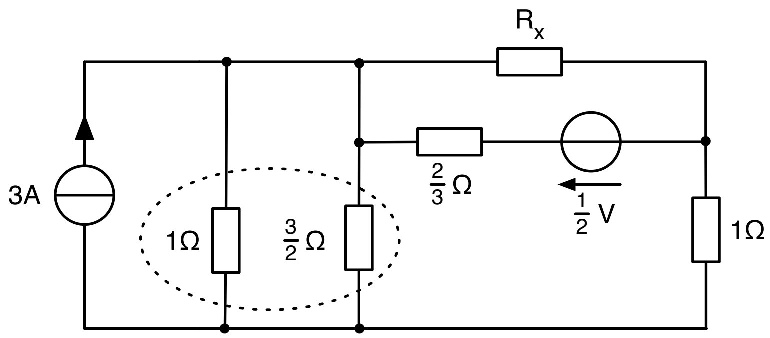

- Zusammenfassen der parallelen 1 Ω-Widerstände
- Strom- in Spannungsquelle verwandeln 1 P.
- Kombinieren von 1/2 Ω und 1 Ω



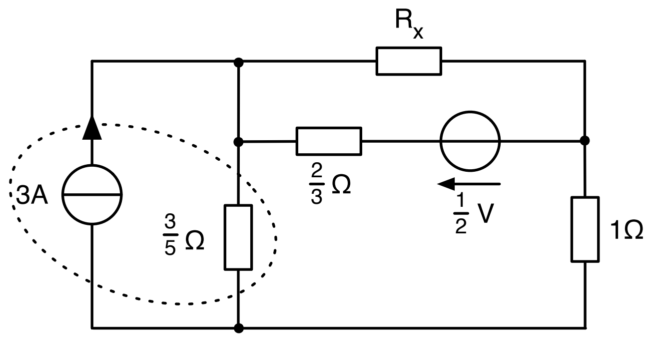

- Kombinieren von 1/2 Ω und 1/2 Ω
- Umarrangieren der Spannungsquelle



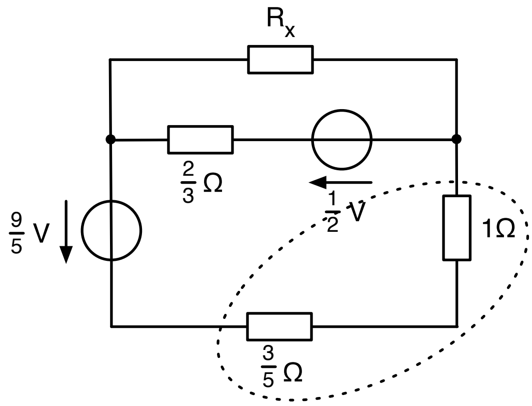

- Spannungs- in Stromquelle transformieren 1 P.



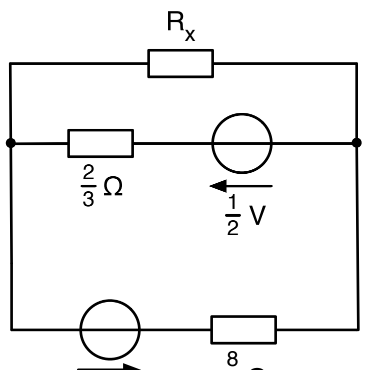

- Parallelschaltung auflösen



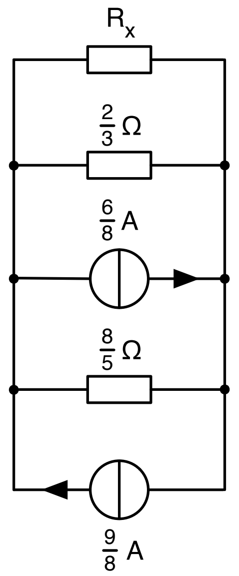

- Strom- in Spannungsquelle wandeln 1 P.



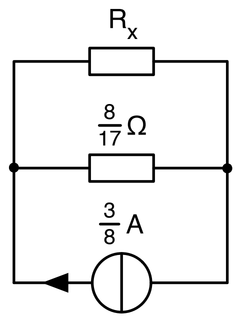

- Serienschaltung von Widerständen zusammenfassen 1 P.



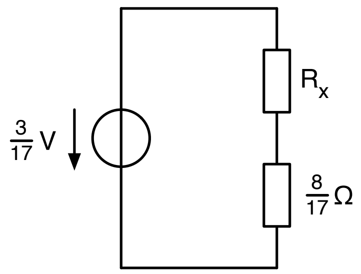

- alle Spannungsquelle in Stromquellen wandeln




- parallele Widerstände zusammenfassen
- Stromquelle kombinieren 1 P.




- Strom- in Spannungsquelle wandeln




- finaler Schaltkreis 1 P.

b) Spannungsteilerregel

$$\frac{R_x}{R_x + \frac{8}{17}} \stackrel{!}{=} \frac{\frac{2}{17}}{\frac{3}{17}}$$

$$R_x \cdot \frac{3}{17} = \frac{2}{17}\left(R_x + \frac{8}{17}\right)$$

$$R_x\left(\frac{3}{17} - \frac{2}{17}\right) = \frac{2}{17} \cdot \frac{8}{17}$$

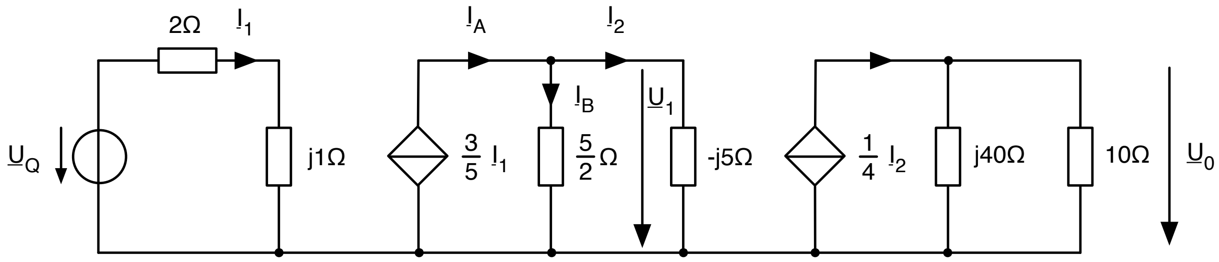
$$\frac{1}{17}R_x = \frac{2}{17} \cdot \frac{8}{17}$$

$$R_x = \frac{16}{17}$$

1 P.

## Aufgabe 2

Es sei folgende Schaltung gegeben: (12 Punkte)




Sie enthält unter anderem zwei stromgesteuerte Stromquellen.

a) Bestimmen Sie die Ströme $\underline{I}_1$, $\underline{I}_2$, $\underline{I}_A$ und die Spannungen $\underline{U}_Q$ und $\underline{U}_1$ für $\underline{U}_0$ = 5 V. (5 Punkte)

b) Zeichnen Sie die Ströme und Spannungen in ein Zeigerdiagramm ein. Verwenden Sie als Maßstab 1 A bzw. 1V => 1 cm (3 Punkte)

c) Bestimmen Sie grafisch den Strom $\underline{I}_B$. (1 Punkt)

d) In dieser Schaltung sind drei komplexe Impedanzen integriert. Bestimmen Sie die Art der Bauelemente und berechnen Sie deren Kennwert für $\omega = 1000 s^{-1}$. (3 Punkte)

## Lösung Aufgabe 2

a) Zuerst Ersatzwiderstände bestimmen:

$$\underline{Z}_{e1} = 2\Omega + j1\Omega$$
$$\underline{Z}_{e2} = \frac{5}{2}\Omega \parallel (-j5\Omega) = \frac{\frac{5}{2}\cdot(-j5)}{\frac{5}{2}-j5}\Omega = \frac{-j\frac{25}{2}}{\frac{5}{2}-j5}\Omega$$
$$\underline{Z}_{e3} = j40\Omega \parallel 10\Omega = \frac{j40\cdot 10}{j40+10}\Omega = \frac{j400}{10+j40}\Omega$$

aus dem rechten Teil der Schaltung kann $\underline{I}_2$ bestimmt werden:

$$\frac{1}{4}\underline{I}_2 = \frac{\underline{U}_0}{\underline{Z}_{e3}} = \frac{5\cdot(10+j40)}{j400}\text{A} = \frac{50+j200}{j400}\text{A}$$
$$\underline{I}_2 = 4\cdot\frac{50+j200}{j400}\text{A} = \frac{200+j800}{j400}\text{A} = (2-j\frac{1}{2})\text{A}$$

1 P.

$\underline{U}_1$ wiederum über

$$\underline{U}_1 = -j5\Omega\cdot\underline{I}_2 = -j5\Omega(2-j\frac{1}{2})\text{A} = (-\frac{5}{2}-j10)\text{V}$$

1 P.

Dieses Potential liegt über der gesamten Parallelschaltung ($\underline{Z}_{e2}$) an. $\underline{I}_A$ kann auf zwei Arten bestimmt werden, entweder als Summe der Ströme $\underline{I}_B$ und $\underline{I}_2$ oder über das Ohmsche Gesetz:

$$\underline{I}_A = \frac{\underline{U}_1}{\underline{Z}_{e2}} = \frac{(-\frac{5}{2}-j10)(\frac{5}{2}-j5)}{-j\frac{25}{2}}\text{A} = \frac{-\frac{25}{4}+j\frac{25}{2}-j\frac{50}{2}-50}{-j\frac{25}{2}}\text{A} = \frac{-\frac{225}{4}-j\frac{25}{2}}{-j\frac{25}{2}}\text{A} = (-j\frac{9}{2}+1)\text{A}$$

der erste Weg:

$$\underline{I}_B = \frac{\underline{U}_1}{\frac{5}{2}\Omega} = \frac{-\frac{5}{2}-j10}{\frac{5}{2}}\text{A} = (-1-j4)\text{A}$$

und anschliessend

$$\underline{I}_A = \underline{I}_B + \underline{I}_2 = (-1-j4)\text{A} + (-j\frac{1}{2}+2)\text{A} = (1-j\frac{9}{2})\text{A}$$

1 P.

Nun lässt sich $\underline{I}_1$ berechnen:

$$\frac{3}{5}\underline{I}_1 = \underline{I}_A$$
$$\underline{I}_1 = \frac{5}{3}\underline{I}_A = \frac{5}{3}\cdot(1-j\frac{9}{2})\text{A} = (\frac{5}{3}-j\frac{15}{2})\text{A}$$

1 P.

$\underline{U}_Q$ schliesslich

$$\underline{U}_Q = \underline{Z}_{e1}\cdot\underline{I}_1 = (2+j1)\Omega\cdot\left(\frac{5}{3}-j\frac{15}{2}\right)\text{A} = \left(\frac{10}{3}-j\frac{30}{2}+j\frac{5}{3}+\frac{15}{2}\right)\text{V} = \left(\frac{65}{6}-j\frac{40}{3}\right)\text{V}$$

1 P.

b)

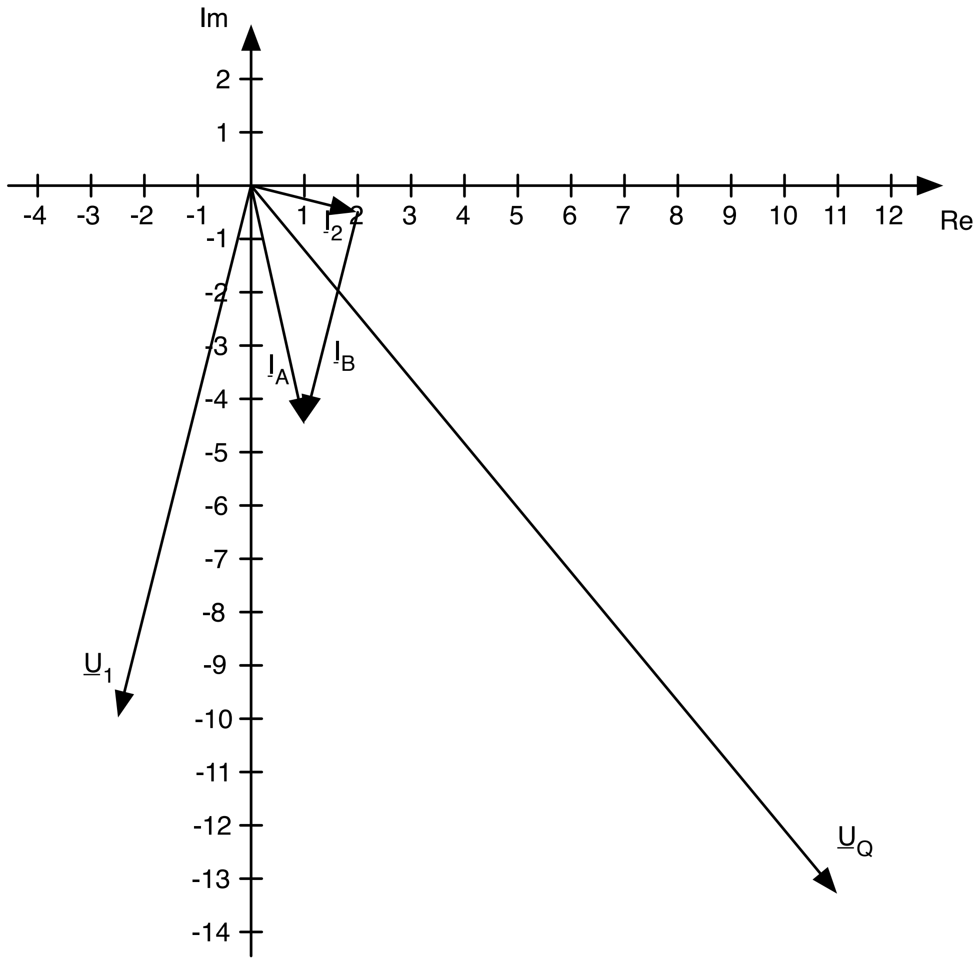



Diagramm mit Achsenbeschriftung: 1 P., Ströme: 1 P., Spannungen: 1 P.

c) Ablesen liefert:
$\underline{I}_B$ = (-1 - j4) A 1 P.

d) *erstes Bauteil*: 1 P.
das positive Vorzeichen spricht für eine Induktivität, also

$$\begin{aligned} j1\Omega &= j\omega L_1 \\ L_1 &= \frac{1\Omega}{\omega} = \frac{1\Omega}{1000s^{-1}} = 1\mathrm{mH} \end{aligned}$$

*zweites Bauteil*: 1 P.
hier deutet das Minus auf eine Kapazität hin, somit

$$\begin{aligned} -j5\Omega &= \frac{1}{j\omega C_1} = -j\frac{1}{\omega C_1} \\ C_1 &= \frac{1}{\omega \cdot 5\Omega} = \frac{1}{1000s^{-1} \cdot 5\Omega} = 200\mu\mathrm{F} \end{aligned}$$

*drittes Bauteil*: 1 P.
für das dritte Bauteil gilt das gleiche wie beim ersten, also

$$\begin{aligned} j40\Omega &= j\omega L_2 \\ L_2 &= \frac{40\Omega}{\omega} = \frac{40\Omega}{1000s^{-1}} = 40\mathrm{mH} \end{aligned}$$

## Aufgabe 3

Folgende Schaltung soll untersucht werden: (12 Punkte)

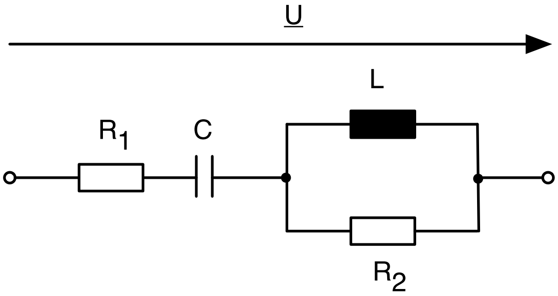



Abb. 3

a) Was ist die zwingende Voraussetzung/Definition eines Schwingkreises (Bauteile!)? (1 Punkt)

b) Geben Sie zwei äquivalente Möglichkeiten an, um die Resonanzfrequenz einer beliebigen Schwingkreisschaltung zu berechnen. (1 Punkt)

c) Berechnen Sie allgemein sowohl den Real- als auch den Imaginärteil des Gesamtwiderstandes $\underline{Z}_{ges}$ der Schaltung in Abb. 3.
Hinweis: Berechnen Sie zunächst den Parallelwiderstand aus $L$ und $R_2$ und trennen Sie diesen in Real- und Imaginärteil auf. (2 Punkte)

d) Jetzt sei $R_1$ = 50 Ω, $R_2 = \infty$, $C$ = 200 µF, $L$ = 2,5 mH. Wie groß sind die Resonanzfrequenz in Hz, die Bandbreite und die Güte dieses Systems?
Geben Sie die Werte jeweils inklusive deren Einheiten an! (6 Punkte)

e) Skizzieren Sie qualitativ den Verlauf des Phasenwinkels $\varphi_{ui}$ sowie des Stromes $\underline{I}_L$ durch die Spule bei angenommener konstanter Versorgungsspannung $\underline{U}$ über der Frequenz unter den in d) beschriebenen Voraussetzungen. Beschriften Sie alle markanten Punkte auf beiden Achsen. (2 Punkte)

## Lösung Aufgabe 3

a) eine Serien- oder Parallelkombination aus Kapazität (C) und Induktivität (L): 1 P.
L: Energiespeicher für magnetische Feldenergie
C: Energiespeicher für elektrische Feldenergie

b) Im{$\underline{Z}$} = 0
Im{$\underline{Y}$} = 0
$\varphi_{ui} = 0$
Blindleistung des Zweipols = 0 1 P.

c) Ersatzwiderstand der Parallelschaltung: 1 P.

$$\underline{Z}_L \parallel R_2 = \frac{j\omega L \cdot R_2}{j\omega L + R_2} = \frac{(j\omega L R_2)(-j\omega L + R_2)}{\omega^2 L^2 + R_2^2} = \frac{\omega^2 L^2 R_2 + j\omega L R_2^2}{\omega^2 L^2 + R_2^2}$$

Gesamtwiderstand: 1 P.

$$\begin{aligned}\underline{Z}_{ges} &= R_1 + \frac{1}{j\omega C} + \frac{\omega^2 L^2 R_2 + j\omega L R_2^2}{\omega^2 L^2 + R_2^2} = R_1 - j\frac{1}{\omega C} + \frac{\omega^2 L^2 R_2 + j\omega L R_2^2}{\omega^2 L^2 + R_2^2} \\ &= R_1 + \frac{\omega^2 L^2 R_2}{\omega^2 L^2 + R_2^2} + j\left(\frac{\omega L R_2^2}{\omega^2 L^2 + R_2^2} - \frac{1}{\omega C}\right)\end{aligned}$$

d) Im{$\underline{Z}_{ges}$} = 0 1 P.

$$\begin{aligned} 0 &\stackrel{!}{=} \frac{\omega_0 L R_2^2}{\omega_0^2 L^2 + R_2^2} - \frac{1}{\omega_0 C} \\ &= \frac{R_2^2}{R_2^2} \cdot \frac{\omega_0 L}{\omega_0^2 \frac{L^2}{R_2^2} + 1} - \frac{1}{\omega_0 C} = \frac{\omega_0 L}{\omega_0^2 \frac{L^2}{R_2^2} + 1} - \frac{1}{\omega_0 C} \\ &\xrightarrow{R_2 \to \infty} \frac{\omega_0 L}{1} - \frac{1}{\omega_0 C} = \omega_0 L - \frac{1}{\omega_0 C} \\ \frac{1}{\omega_0 C} &= \omega_0 L \\ \omega_0^2 &= \frac{1}{LC} \\ \omega_0 &= \frac{1}{\sqrt{LC}} \end{aligned}$$

Einsetzen der Werte für *L* und *C*
- Resonanzfrequenz: 1 P.

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} = \frac{1}{\sqrt{2,5\mathrm{mH} \cdot 200\mu\mathrm{F}}} \approx 1414,21\mathrm{s}^{-1}$$

bzw.

$$f_0 = \frac{\omega_o}{2\pi} = 225\,\mathrm{Hz}$$

- Bandbreite:

$$\begin{aligned}\mathrm{Re}(\underline{Z}_{ges}) &= R_1 + \frac{\omega^2 L^2 R_2}{\omega^2 L^2 + R_2^2} = R_1 + \frac{R_2^2}{R_2^2} \cdot \frac{\omega^2 \frac{L^2}{R_2}}{\omega^2 \frac{L^2}{R_2^2} + 1} \\ &\xrightarrow{R_2 \to \infty} R_1\end{aligned}$$

*ω₁*: $\mathrm{Re}(\underline{Z}_{ges}) = \mathrm{Im}(\underline{Z}_{ges})$

*ω₂*: $\mathrm{Re}(\underline{Z}_{ges}) = -\mathrm{Im}(\underline{Z}_{ges})$

*ω₁*:

$$\begin{aligned}\mathrm{Re}(\underline{Z}_{ges}) &= \mathrm{Im}(\underline{Z}_{ges}) \\ R_1 &= \omega_1 L - \frac{1}{\omega_1 C} \\ \omega_1 R_1 &= \omega_1^2 L - \frac{1}{C} \\ \omega_1^2 L - \omega_1 R_1 &= \frac{1}{C} \\ \omega_1^2 - \omega_1 \frac{R_1}{L} &= \frac{1}{LC} \\ \omega_1 &= \frac{R_1}{2L} \pm \sqrt{\frac{R_1^2}{4L^2} + \frac{1}{LC}}\end{aligned}$$

1 P.

*ω₂*:

$$\begin{aligned}\mathrm{Re}(\underline{Z}_{ges}) &= -\mathrm{Im}(\underline{Z}_{ges}) \\ R_1 &= -\omega_2 L + \frac{1}{\omega_2 C} \\ \omega_2 R_1 &= -\omega_2^2 L - \frac{1}{C} \\ \omega_2^2 L + \omega_2 R_1 &= -\frac{1}{C} \\ \omega_2^2 + \omega_2 \frac{R_1}{L} &= -\frac{1}{LC} \\ \omega_2 &= -\frac{R_1}{2L} \pm \sqrt{\frac{R_1^2}{4L^2} + \frac{1}{LC}}\end{aligned}$$

1 P.

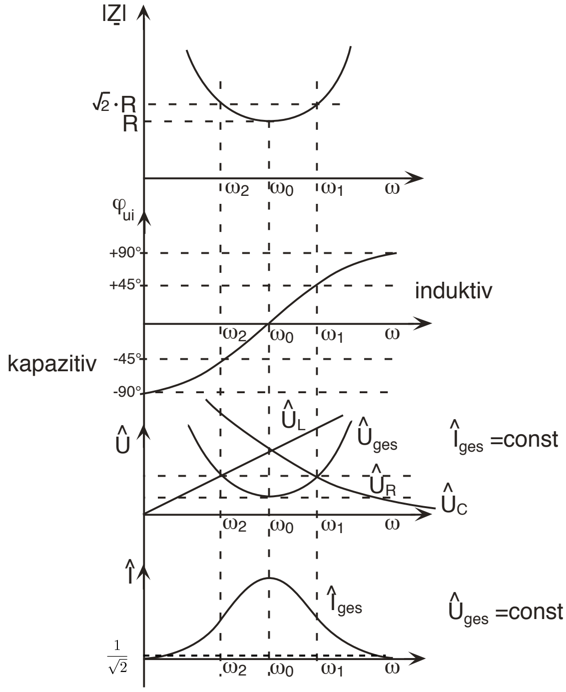
$$b_w = \omega_1 - \omega_2 = \frac{R_1}{2L} \pm \sqrt{\frac{R_1^2}{4L^2} + \frac{1}{LC}} - \left(-\frac{R_1}{2L} \pm \sqrt{\frac{R_1^2}{4L^2} + \frac{1}{LC}}\right) = \frac{R_1}{L} = 20.000\mathrm{s}^{-1}$$

1 P.

- Güte: 1 P.

$$Q = \frac{1}{R_1}\sqrt{\frac{L}{C}} = \frac{1}{50\Omega}\sqrt{\frac{2,5\mathrm{mH}}{200\mu\mathrm{F}}} \approx 0,07$$

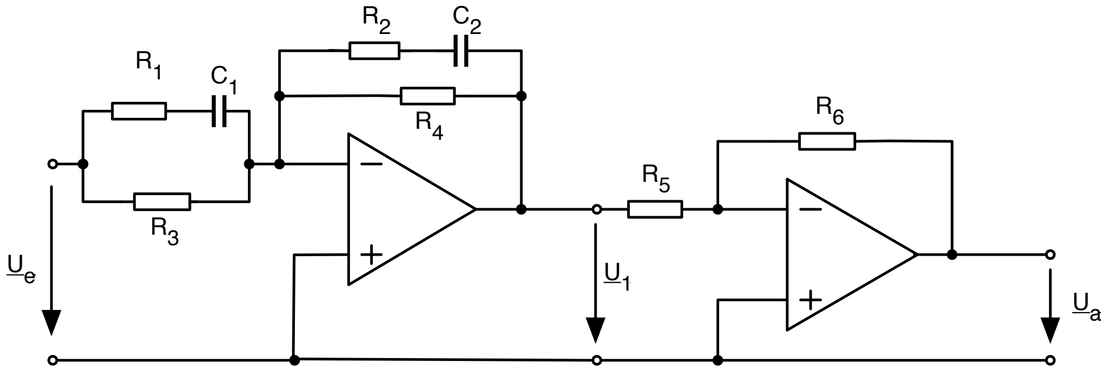
e)




Verlauf: 1 P., Achsenbeschr.: 1 P.

## Aufgabe 4

Gegeben ist folgende ideale Operationsverstärkerschaltung. (22 Punkte)




Es gelten folgende Werte:

$R_1 = 10\,\mathrm{k\Omega}, R_2 = 20\,\mathrm{k\Omega}, R_3 = 90\,\mathrm{k\Omega}, R_4 = 180\,\mathrm{k\Omega}, R_5 = 10\,\mathrm{k\Omega}, R_6 = 5\,\mathrm{k\Omega},$

$C_1 = 25\,\mu F, C_2 = 250\,\mu F$

Bei allen Rechnungen muss der Lösungsweg klar erkennbar sein!

a) Leiten Sie die Übertragungsfunktion $G_v = \dfrac{\underline{U}_a}{\underline{U}_1}$ her. (2 Punkte)

b) Leiten Sie die Übertragungsfunktion $G_{ges} = \dfrac{\underline{U}_a}{\underline{U}_e}$ her. (8 Punkte)

(Gehen Sie davon aus, dass die zweite OP-Schaltung die erste nicht belastet.).

c) Zeichnen Sie die Bodediagramm (Amplituden- und Phasengang) für $G_{ges}$. Wählen Sie eine geeignete Normierung. (12 Punkte)
Hinweis:
Achten Sie auf genaue Werte der logΩ-Achse! Verwenden Sie als Maßstäbe für die Achsen

| | |
|---|---|
| logΩ-Achse: | 1cm ≙ 0,5, Bereich -3 ≤ log Ω ≤ 3 |
| db-Achse: | 1cm ≙ 10 dB |
| Phi-Achse: | 2cm ≙ 45° |

**Lösungen:**

a) es handelt sich um einen einfachen invertierenden Verstärker

$$\underline{U}_a = -U_{R6} = -I \cdot R_2 = -\frac{\underline{U}_1}{R_5} \cdot R_6 = -\frac{R_6}{R_5}\underline{U}_1 = -\frac{1}{2}\underline{U}_1$$

1 Punkt für Maschengleichung, 1 Punkt für Ergebnis

b) $G_V$ ist aus Teil a) bekannt.

$$G_{ges} = G_1 \cdot G_V$$

$$G_1 = \frac{\underline{U}_1}{\underline{U}_e}$$

Zunächst ist $G_1$ ein normaler invertierender Verstärker, mit den Impedanzen $Z_1$ und $Z_2$:

$$Z_1 = \left(R_1 + \frac{1}{j\omega C_1}\right) \Big\| R_3 = \frac{\left(R_1 + \frac{1}{j\omega C_1}\right) R_3}{R_1 + \frac{1}{j\omega C_1} + R_3}$$

(je 1 Punkt)

$$Z_2 = \left(R_2 + \frac{1}{j\omega C_2}\right) \Big\| R_4 = \frac{\left(R_2 + \frac{1}{j\omega C_2}\right) R_4}{R_2 + \frac{1}{j\omega C_2} + R_4}$$

Eingesetzt in die Formel für den invertierenden Verstärker ergibt dies

$$\underline{U}_1 = -\frac{Z_2}{Z_1}\underline{U}_e = -\frac{\left(R_2 + \frac{1}{j\omega C_2}\right) R_4}{\left(R_2 + \frac{1}{j\omega C_2} + R_4\right)} \cdot \frac{\left(R_1 + \frac{1}{j\omega C_1} + R_3\right)}{\left(R_1 + \frac{1}{j\omega C_1}\right) R_3}\underline{U}_e$$

(1 Punkt)

$$\underline{U}_1 = -\frac{R_4}{R_3} \cdot \frac{(j\omega R_2 C_2 + 1) \cdot \left[j\omega C_1 (R_1 + R_3) + 1\right]}{(j\omega R_1 C_1 + 1) \cdot \left[j\omega C_2 (R_2 + R_4) + 1\right]}\underline{U}_e$$

(2 Punkte für richtige Umformung)

Mit $G_V$ multiplizieren und Einsetzen der Werte:

$$G_{ges} = \frac{\underline{U}_a}{\underline{U}_e} = \frac{(2{,}5\, j\omega + 1) \cdot (5\, j\omega + 1)}{(0{,}25\, j\omega + 1) \cdot (50\, j\omega + 1)} \qquad \text{mit } \frac{R_6 R_4}{R_5 R_3} = 1$$

(3 Punkte)

c)

Die Normierung erfolgt auf $\omega_{01} = \frac{1}{R_1 C_1} = \frac{1}{2{,}5}\frac{1}{s}$.

Daraus ergeben sich (Die Koeffizienten werden aus der Gleichung oben entnommen):

$$\Omega_{01} = \frac{\omega}{\omega_{01}}$$

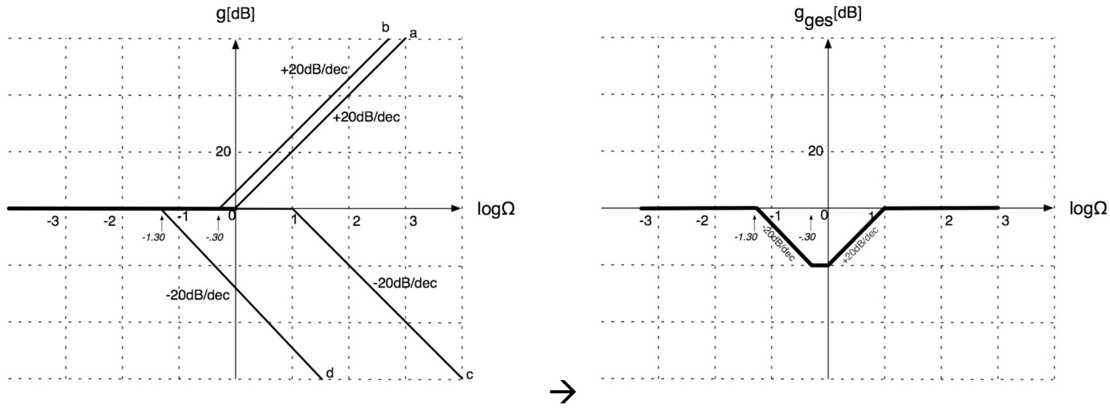
$$\Omega_{02} = \frac{\omega}{\omega_{02}} \Rightarrow \log\Omega_{02} = \log\Omega_{01} + \log\frac{5}{2{,}5} = \log\Omega_{01} + 0{,}30$$

$$\Omega_{03} = \frac{\omega}{\omega_{03}} \Rightarrow \log\Omega_{03} = \log\Omega_{01} + \log\frac{0{,}25}{2{,}5} = \log\Omega_{01} - 1$$

$$\Omega_{04} = \frac{\omega}{\omega_{04}} \Rightarrow \log\Omega_{04} = \log\Omega_{01} + \log\frac{50}{2{,}5} = \log\Omega_{01} + 1{,}30$$

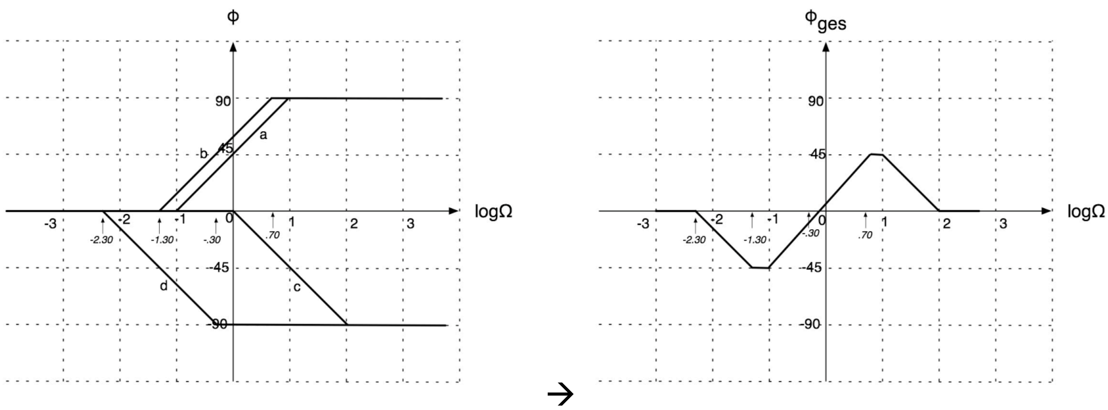
(4 Punkte)

Das Diagramm für die Verstärkung wird zeichnerisch gewonnen (Eine Nullstelle ergibt eine Gerade mit Steigung +20dB/dec und eine Polstelle eine Gerade mit Steigung -20dB/dec).




(4 Punkte)

Die Erstellung des Phasendiagramms erfolgt genauso (Polstelle 1+jΩ ergibt Phasenverschiebung von -90° innerhalb ±1 Dekade, Nullstelle 1+jΩ Phasenverschiebung von +90° innerhalb ±1 Dekade).




(4 Punkte)

## Aufgabe 5

Gegeben sei die Schaltung aus Abb. 5 (5 Punkte)

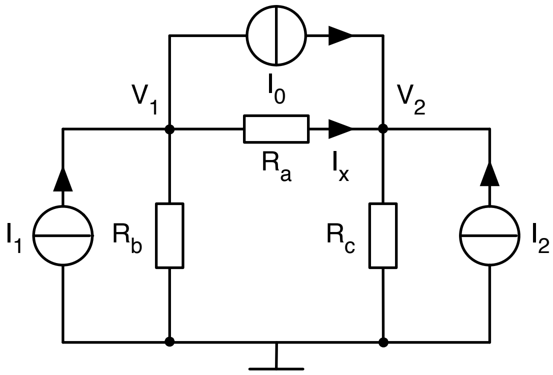



Abb. 5

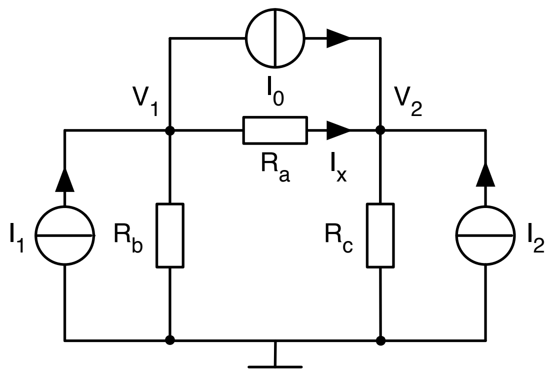
Die Bauteile haben folgende Kennwerte:

$$R_a = \frac{1}{5}\Omega,\ R_b = \frac{1}{7}\Omega,\ R_c = \frac{2}{5}\Omega,\ I_0 = 4\text{A},\ I_1 = 5\text{A},\ I_2 = 1\text{A}$$

a) Stellen Sie die Leitwertmatrix auf und bestimmen Sie den Strom Strom $I_x$. mit Hilfe des Knotenpunktpotentialverfahrens.
Hinweis: Lösen Sie das lineare Gleichungssystem mit Hilfe des Gaussschen Eliminationsverfahrens!

## Lösung Aufgabe 5

a)




Die Leitwert-Matrix für diese Schaltung lautet

$$A = \begin{pmatrix} \frac{1}{R_a} + \frac{1}{R_b} & -\frac{1}{R_a} \\ -\frac{1}{R_a} & \frac{1}{R_a} + \frac{1}{R_c} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 5+7 & -5 \\ -5 & 5+\frac{5}{2} \end{pmatrix} \Omega^{-1} = \begin{pmatrix} 12 & -5 \\ -5 & \frac{15}{2} \end{pmatrix} \Omega^{-1}$$

1 P.

und das Lineare Gleichungssystem für das KPV

$$\begin{pmatrix} 12 & -5 \\ -5 & \frac{15}{2} \end{pmatrix} \Omega^{-1} \begin{pmatrix} V_1 \\ V_2 \end{pmatrix} \mathrm{V} = \begin{pmatrix} I_1 - I_0 \\ I_2 + I_0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 5 \end{pmatrix} \mathrm{A}$$

1 P.

Lösen dieses LGS‘:

$$\begin{array}{cc|cl} 12 & -5 & 1 & \quad | \cdot \frac{5}{12} \downarrow \\ -5 & \frac{15}{2} & 5 & \end{array}$$

$$\begin{array}{cc|c} 12 & -5 & 1 \\ 0 & \frac{15}{2} - \frac{25}{12} & 5 + \frac{5}{12} \end{array}$$

$$\begin{array}{cc|cl} 12 & -5 & 1 & \\ 0 & \frac{65}{12} & \frac{65}{12} & \quad | \div \frac{65}{12} \end{array}$$

$$\begin{array}{cc|cl} 12 & -5 & 1 & \\ 0 & 1 & 1 & \quad | \cdot 5 \uparrow \end{array}$$

$$\begin{array}{cc|cl} 12 & 0 & 6 & \quad | \div 12 \\ 0 & 1 & 1 & \end{array}$$

$$\begin{array}{cc|c} 1 & 0 & \frac{1}{2} \\ 0 & 1 & 1 \end{array}$$

$$\begin{aligned} V_1 &= \frac{1}{2}\mathrm{V} \\ V_2 &= 1\mathrm{V} \end{aligned}$$

2 P.

Damit stehen alle Größen zur Bestimmung von $I_x$ zur Verfügung:

$$I_x = \frac{V_1 - V_2}{R_a} = \frac{\frac{1}{2}\mathrm{V} - 1\mathrm{V}}{\frac{1}{5}\Omega}\mathrm{A} = -\frac{5}{2}\mathrm{A}$$

1 P.