

2. Klausur
Grundlagen der Elektrotechnik I-A
21. Februar 2006



Musterloesung

Name:

Vorname:

Matr.-Nr.:

Bearbeitungszeit: 135 Minuten

- Trennen Sie den Aufgabensatz **nicht** auf.
- Benutzen Sie für die Lösung der Aufgaben **nur** das mit diesem Deckblatt ausgeteilte Papier. **Lösungen, die auf anderem Papier geschrieben werden, können nicht gewertet werden.** Weiteres Papier kann bei den Tutoren angefordert werden.
- **Notieren Sie bei der Aufgabe einen Hinweis, wenn die Lösung auf einem Extrablatt fortgesetzt wird**
- **Schreiben Sie deutlich!** Doppelte, unleserliche oder mehrdeutige Lösungen können nicht gewertet werden.
- Schreiben Sie **nicht** mit Bleistift!
- Schreiben Sie nur in **blau** oder **schwarz!**

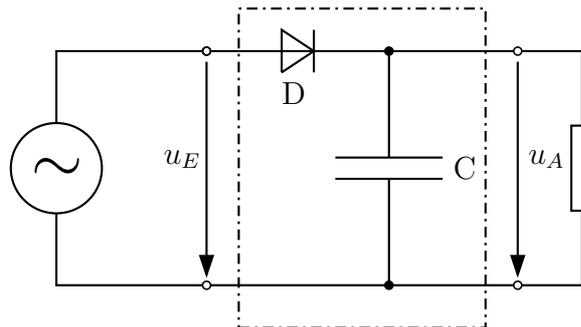
1. Aufgabe (5 Punkte): Allgemeine Fragen

Bitte beantworten Sie die folgenden Fragen:

1.1. Einweggleichrichter (0.5 Punkte)

Geben Sie die Schaltung einer Einweg-Gleichrichterschaltung (auch Einpuls-Mittelpunktschaltung M1) mit kapazitiver Glättung an.

Lösung:



1.2. Strom und Spannung am Kondensator (0.5 Punkte)

Geben Sie Formel für die Beziehung von Strom und Spannung am Kondensator an.

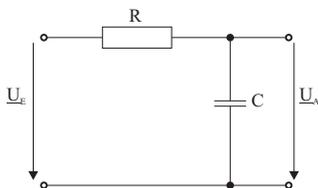
Lösung:

$$i_C = C \cdot \frac{d}{dt} u_C \quad \text{oder} \quad \underline{I}_C = C \cdot j\omega \cdot \underline{U}_C$$

1.3. Übertragungsfunktion (0,5 Punkte)

Geben Sie die Formel für die Übertragungsfunktion $\underline{v} = \frac{\underline{U}_A}{\underline{U}_E}$ folgender Schaltung an.

Lösung:



$$\underline{v} = \frac{1}{1 + j\omega RC}$$

oder mit $\tau = R \cdot C$

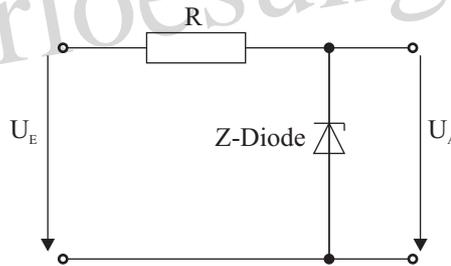
$$\underline{v} = \frac{1}{1 + j\omega\tau}$$

1.4. Z-Diode (0,5 Punkte)

Zeichnen Sie eine Stabilisierungsschaltung mit einer Z-Diode. Kennzeichnen Sie die Eingangsspannung U_E und die Ausgangsspannung U_A .

Lösung:

Musterloesung



1.5. Wirkleistung (0,5 Punkte)

Geben Sie die an einem Widerstand R umgesetzte Wirkleistung P an, wenn an ihm die Spannung U_{eff} abfällt.

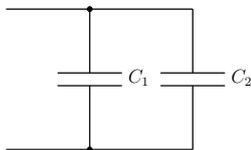
Lösung:

$$P = \frac{U_{eff}^2}{R}$$

1.6. Wechselstromersatzwiderstand (0,5 Punkte)

Geben Sie die Formel für den Wechselstromersatzwiderstand Z_{ges} für die gezeigte Anordnung an.

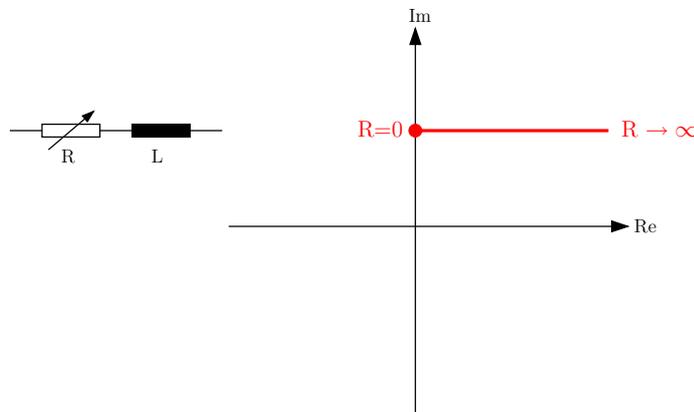
Lösung:



$$Z_{ges} = \frac{1}{j\omega(C_1 + C_2)}$$

1.7. Ortskurve (0,5 Punkte)

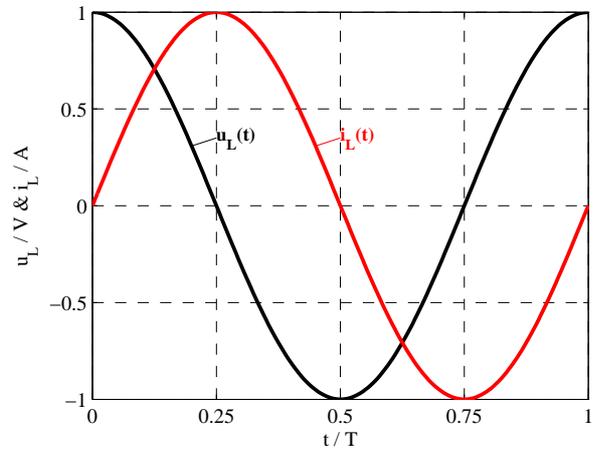
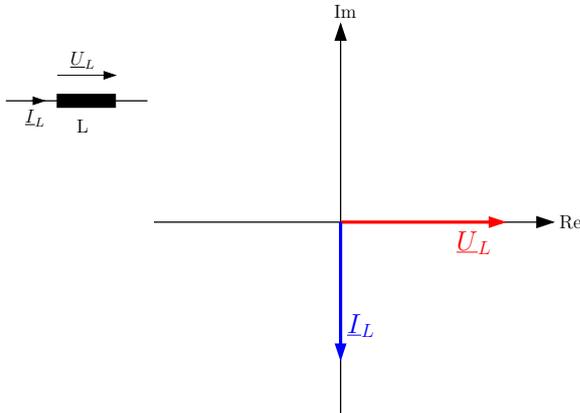
Zeichnen Sie die Ortskurve des gezeigten komplexen Widerstandes bei fester Frequenz $\omega = const.$ und veränderlichem Widerstand R . Kennzeichnen Sie dabei $R = 0$ und $R \rightarrow \infty$.



1.8. Zeiger und Zeitverläufe an der Spule (1 Punkt)

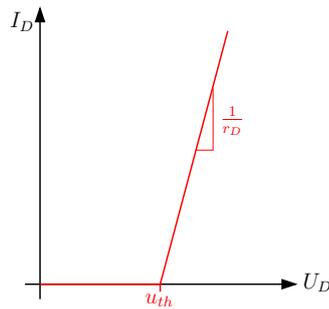
- Zeichnen Sie die Zeiger für Strom und Spannung an einer Induktivität für $\underline{U}_L = U \cdot e^{j0^\circ}$ in die komplexe Ebene (links) ein.

- Zeichnen Sie in das Diagramm (rechts) den Zeitverlauf für den Spulenstrom $i_L(t)$ für den gegebenen Zeitverlauf der Spannung $u_L(t)$ ein.



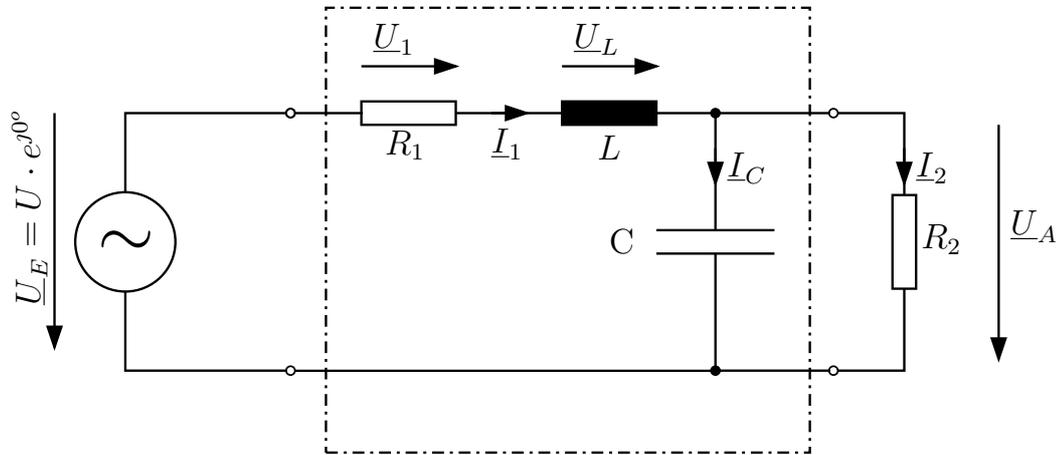
1.9. Diodenkennlinie (0.5 Punkte)

Zeichnen Sie in das Diagramm die linearisierte Diodenkennlinien im Durchlassbereich ein. Machen Sie dabei die charakteristischen Kenngrößen kenntlich.



2. Aufgabe (5 Punkte): Zeigerdiagramm

Gegeben ist folgende Schaltung:



2.1. Qualitatives Zeigerdiagramm (2 Punkte)

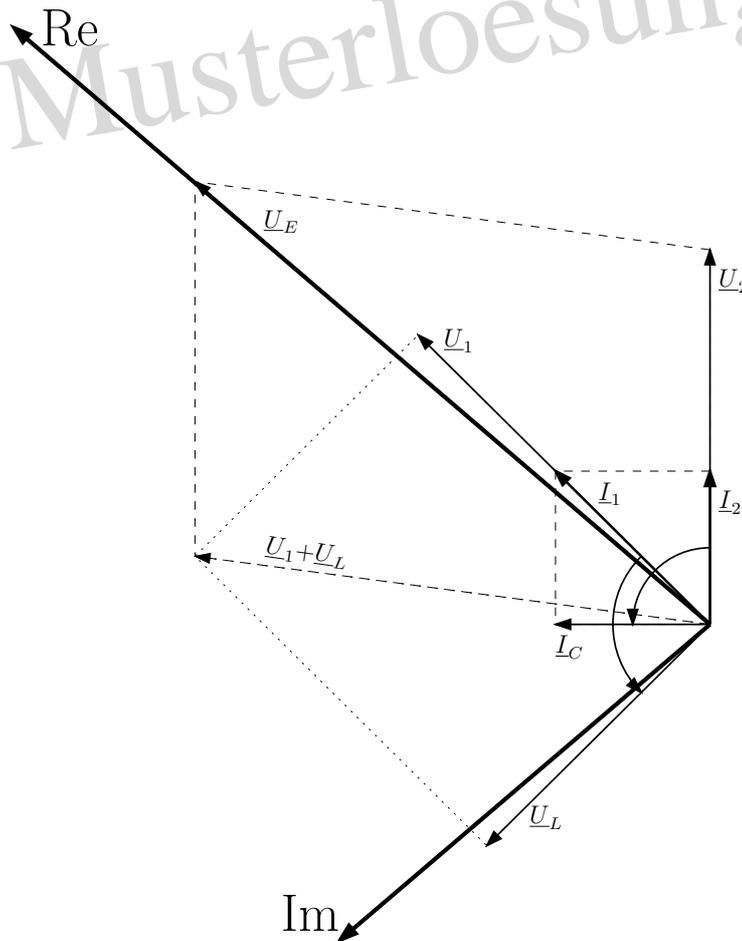
Zeichnen Sie (auf der nächsten Seite) das qualitative Zeigerdiagramm **aller** Ströme und Spannungen für $\underline{U}_E = U \cdot e^{j0^\circ}$.

Beachten Sie:

- Rechte Winkel und Zeigeradditionen sind klar zu kennzeichnen!
- Wählen Sie die Spannungen betragsmäßig größer als die Ströme!
- Zeichnen Sie nicht zu klein!
- Zeichnen Sie das kartesische Koordinatensystem ein!

Lösung:

Musterloesung



1. $\underline{I}_2 \parallel \underline{U}_2$
2. \underline{I}_C 90° vor \underline{U}_2
3. $\underline{I}_1 = \underline{I}_2 + \underline{I}_C$
4. \underline{U}_L 90° vor \underline{I}_1
5. $\underline{U}_1 \parallel \underline{I}_1$
6. $\underline{U}_E = \underline{U}_1 + \underline{U}_L + \underline{U}_2$
7. Re-Achse $\parallel \underline{U}_E$
8. Im-Achse 90° vor Re-Achse

2.2. Gesamtimpedanz (1 Punkt)

Berechnen Sie symbolisch die Gesamtimpedanz \underline{Z}_{ges} , die die Spannungsquelle im Leerlauf ($R_2 \rightarrow \infty$) speisen muss, und stellen Sie diese in der Form $\underline{Z} = X + jY$ dar.

Lösung:

$$\begin{aligned}
 \underline{Z}_{ges} &= R_1 + \underline{X}_L + \underline{X}_C & (1) \\
 &= R_1 + j\omega L + \frac{1}{j\omega C} \\
 &= R_1 + j\omega L - j\frac{1}{\omega C}
 \end{aligned}$$

$$\underline{Z}_{ges} = R_1 + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right) \quad \text{oder} \quad \underline{Z}_{ges} = R_1 + j\omega\left(L - \frac{1}{\omega^2 C}\right) \quad (2)$$

2.3. Ohmsche Gesamtimpedanz (1 Punkt)

Berechnen Sie, wie groß die Kapazität C sein muss, wenn die Gesamtimpedanz \underline{Z}_{ges} im Leerlauf ($R_2 \rightarrow \infty$) rein ohmsch sein soll.

Lösung:

Musterloesung

$$L - \frac{1}{\omega^2 C} = 0 \quad (3)$$

$$L = \frac{1}{\omega^2 C}$$

$$C = \frac{1}{\omega^2 L} \quad (4)$$

2.4. Übertragungsfunktion (1 Punkt)

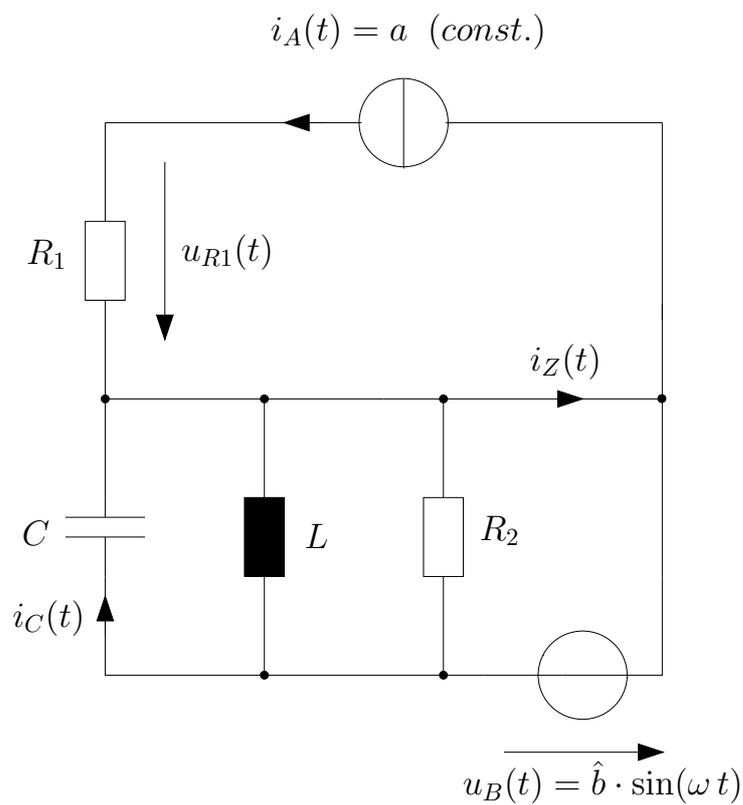
Ersetzen Sie die Spule L durch einen Kurzschluss. Wie lautet jetzt die Übertragungsfunktion $\underline{V} = \frac{\underline{U}_A}{\underline{U}_E}$ im Leerlauf ($R_2 \rightarrow \infty$).

Lösung:

$$\begin{aligned} \underline{V} &= \frac{\underline{U}_A}{\underline{U}_E} \\ &= \frac{1}{1 + j\omega CR} = \frac{1}{1 + j\omega\tau} \end{aligned} \quad (5)$$

3. Aufgabe (5 Punkte): Komplexe Superposition

Die nachfolgende Schaltung ist gegeben.

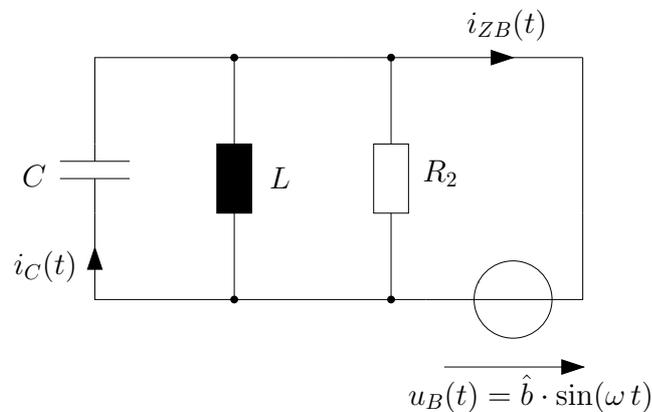
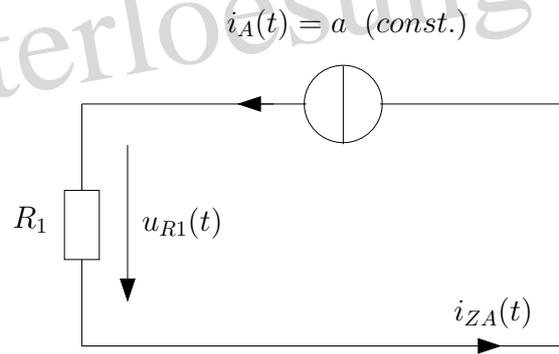


3.1. Ersatzschaltbilder (1 Punkt)

Zeichnen Sie die beiden Ersatzschaltbilder zur Berechnung des Netzwerkes nach dem Superpositionsprinzip. Tragen Sie alle Teilströme und -spannungen ein, die Sie in Ihren Berechnungen verwenden.

Lösung:

Musterlösung



3.2. Symbolische Stromberechnung (2,5 Punkte)

Stellen Sie eine Formel (**symbolisch!**) für den Strom $i_Z(t)$ auf. Verwenden Sie dazu das Superpositionsprinzip. **Anmerkung:** Geben Sie die Ergebnisse in zeitabhängiger Form an. Keine Zwischenergebnisse überspringen!

Lösung:

1. Lösungsmöglichkeit:

Für Teilschaltung A):

$$i_{ZA}(t) = a$$

Für Teilschaltung B):

- In komplexe Darstellung umformen (entweder mit Effektivwerten oder Scheitelwerten rechnen; üblicherweise werden Effektivwerte verwendet)

$$u_B(t) \rightarrow \underline{U}_B = \frac{1}{\sqrt{2}} \hat{b} e^{j0} = \frac{1}{\sqrt{2}} \hat{b} \quad (0.5 \text{ Punkte})$$

- Berechnung der Gesamtimpedanz \underline{Z} (0.5 Punkte)

$$\underline{Z} = \frac{1}{j\omega C} \parallel j\omega L \parallel R_2 = \frac{1}{j\omega C + \frac{1}{j\omega L}} \parallel R_2 = \frac{1}{j\omega C + \frac{1}{j\omega L} + \frac{1}{R_2}}$$

- Berechnung des komplexen Stroms \underline{I}_{ZB}

$$\underline{I}_{ZB} = \frac{\underline{U}_B}{\underline{Z}} = \left(j\omega C + \frac{1}{j\omega L} + \frac{1}{R_2} \right) \underline{U}_B = \left(\frac{1}{R_2} + j \left(\omega C - \frac{1}{\omega L} \right) \right) \frac{\hat{b}}{\sqrt{2}}$$

- Umrechnung in die vollständige reelle Darstellung (jeweils 0.5 Punkte)

$$|\underline{I}_{ZB}| = \frac{|\hat{b}|}{\sqrt{2}} \sqrt{\frac{1}{R_2^2} + \left(\omega C - \frac{1}{\omega L} \right)^2}$$

$$\text{phase}(\underline{I}_{ZB}) = \arctan\left(\frac{\text{Im}(\underline{I}_{ZB})}{\text{Re}(\underline{I}_{ZB})}\right) = \arctan\left(\omega R_2 C - \frac{R_2}{\omega L}\right)$$

- Ergebnis zusammenfassen (Effektivwert in Scheitelwert umrechnen):

$$i_Z(t) = i_{ZA}(t) + i_{ZB}(t)$$

Daraus folgt (0.5 Punkte)

$$i_Z(t) = a + |\hat{b}| \sqrt{\frac{1}{R_2^2} + \left(\omega C - \frac{1}{\omega L} \right)^2} \sin\left(\omega t + \arctan\left(\omega R_2 C - \frac{R_2}{\omega L}\right)\right)$$

2. Lösungsmöglichkeit:

Für Teilschaltung A):

$$i_{ZA}(t) = a$$

Für Teilschaltung B):

$$i_c(t) = C \frac{du_B(t)}{dt} = \omega \hat{b} C \cos(\omega t), \quad i_L(t) = \frac{1}{L} \int u_B(t) dt = -\frac{\hat{b}}{\omega L} \cos(\omega t)$$

$$i_R(t) = \frac{\hat{b}}{R_2} \sin(\omega t) \quad (\text{jeweils 0.5 Punkte})$$

$$\Rightarrow i_{ZB}(t) = i_c(t) + i_L(t) + i_R(t) = \hat{b} \left(\left(\omega C - \frac{1}{\omega L} \right) \cos(\omega t) + \frac{1}{R_2} \sin(\omega t) \right) \quad (0.5 \text{ Punkte})$$

$$\Rightarrow \underline{\underline{i_Z(t) = a + \hat{b} \left(\left(\omega C - \frac{1}{\omega L} \right) \cos(\omega t) + \frac{1}{R_2} \sin(\omega t) \right)}} \quad (0.5 \text{ Punkte})$$

3.3. Stromberechnung (0.5 Punkte)

Wie groß ist der Strom $i_Z(t)$ für $\hat{b} = 220\text{V}$, $a = 1\text{A}$, $R_1 = 100\Omega$, $R_2 = 105\Omega$, $L = 200\text{mH}$ und $C = 100\mu\text{F}$? Die Frequenz f sei 50Hz . Diese Angaben gelten auch für die nachfolgenden Aufgaben.

Lösung:

Einsetzen und ausrechnen. Es folgt

$$\underline{\underline{i_Z(t) = 1\text{A} + 4 \sin(\omega t + 1,012) \text{A}}}$$

3.4. Spannungsberechnung (0.5 Punkte)

Wie groß ist die Spannung $u_{R1}(t)$ über R_1 ?

Lösung:

Die Spannungsquelle liefert keinen Anteil. Daher gilt

$$u_{R1}(t) = i_A(t) \cdot R_1 = a \cdot R_1 = 1\text{A} \cdot 100\Omega = \underline{\underline{100\text{V}}}$$

3.5. Strom durch Kondensator (0.5 Punkte)

Wie groß ist der Strom $i_c(t)$ durch den Kondensator C ?

Lösung:

Hier hat die Stromquelle keinen Einfluß. Daher ist die Spannung über den Kondensator gleich der Spannung der Spannungsquelle, d.h.

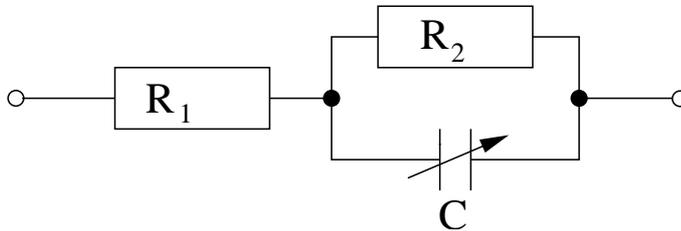
$$u_B(t) \rightarrow \underline{U}_B = \frac{1}{\sqrt{2}} \hat{b}, \quad \underline{I}_C = \frac{\underline{U}_B}{1/(j\omega C)} = j \frac{1}{\sqrt{2}} \hat{b} \omega C$$

Es folgt nach Übergang von $\underline{I}_C \rightarrow i_c(t)$

$$i_c(t) = \hat{b} \omega C \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) = 220\text{V} \cdot 2\pi \cdot 50\text{Hz} \cdot 100 \cdot 10^{-6}\text{F} \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) = \underline{\underline{2\pi \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) \text{A}}}$$

4. Aufgabe (5 Punkte): Ortskurve

Gegeben ist die folgende Schaltung:



Gegeben:

$$R_1 = 470\Omega$$

$$R_2 = 1.2k\Omega$$

$$f = 1.5kHz$$

$$C = [50, 100, 300]nF$$

4.1. Impedanz angeben (2 Punkte)

Geben Sie den Real- und den Imaginäranteil der Gesamtimpedanz \underline{Z} (Formel) an.

Lösung:

$$\underline{Z} = R_1 + R_2 \parallel \frac{1}{j\omega C} = R_1 + \frac{R_2}{j\omega C [R_2 + 1/(j\omega C)]} = \quad (6)$$

$$R_1 + \frac{R_2}{j\omega C R_2 + 1} = R_1 + \frac{R_2(1 - j\omega C R_2)}{(\omega C R_2)^2 + 1} = R_1 + \frac{R_2 - j\omega C R_2^2}{(\omega C R_2)^2 + 1} \quad (7)$$

$$\underline{Z} = R_1 + \frac{R_2}{(\omega C R_2)^2 + 1} - j \frac{\omega C R_2^2}{(\omega C R_2)^2 + 1} \quad (8)$$

$$\operatorname{Re}\{\underline{Z}\} = R_1 + \frac{R_2}{(\omega C R_2)^2 + 1} \quad (9)$$

$$\operatorname{Im}\{\underline{Z}\} = -\frac{\omega C R_2^2}{(\omega C R_2)^2 + 1} \quad (10)$$

4.2. Impedanz berechnen (1.5 Punkte)

Berechnen Sie die Impedanz in Polarkoordinaten für $C=50, 100, 300$ nF (Ihr Rechenweg muss nachvollziehbar sein!).

Lösung:

Der Rechenweg muss nachvollziehbar sein! Hier stehen nur die Ergebnisse.

$$\underline{Z}(C = 50nF) = 1472\Omega \cdot e^{-j20^\circ} \quad (11)$$

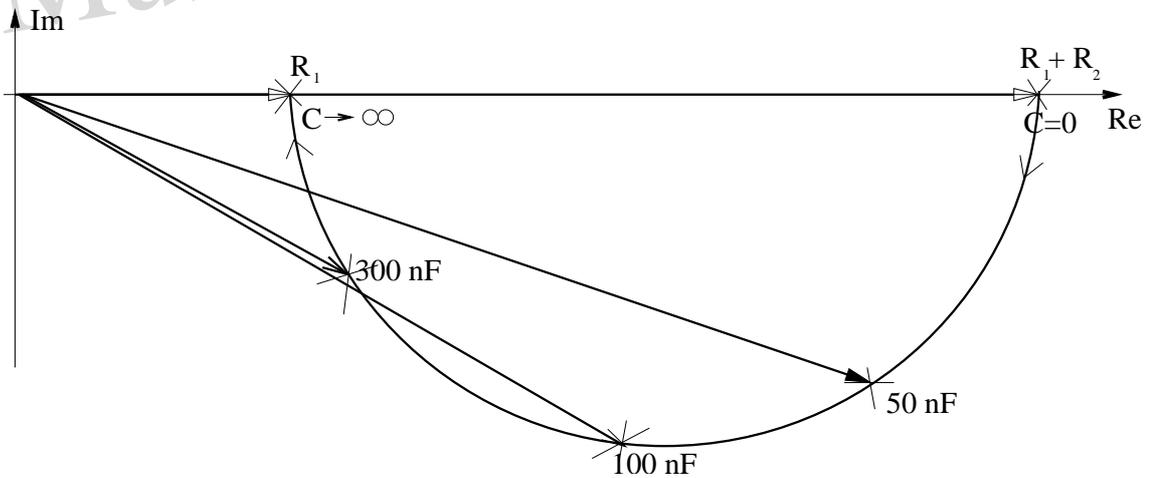
$$\underline{Z}(C = 100nF) = 1160.9\Omega \cdot e^{-j31^\circ} \quad (12)$$

$$\underline{Z}(C = 300nF) = 653\Omega \cdot e^{-j29.9^\circ} \quad (13)$$

4.3. Ortskurve (1 Punkt)

Zeichnen Sie die Ortskurve der Gesamtimpedanz \underline{Z} der Schaltung ($1cm=100\Omega$). Kennzeichnen Sie mindestens 4 Punkte der Ortskurve.

Lösung:



4.4. Variable Frequenz (0.5 Punkte)

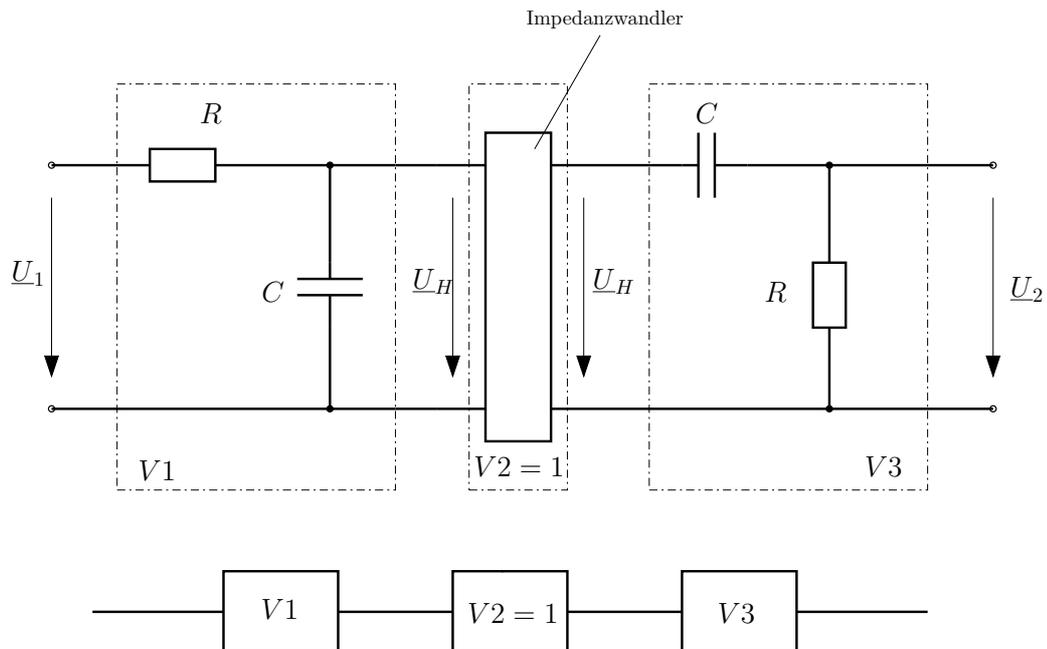
Anstatt der Kapazität wird nun die Frequenz variiert. Skizzieren Sie qualitativ die Ortskurve und kennzeichnen Sie die Punkte $f = 0$ und $f \rightarrow \infty$.

Lösung:

Die Kurve sieht aus wie die Kurve in Aufgabe 1.3. Der Punkt für $C = 0$ wird zum Punkt $\omega = 0$, und der Punkt $C \rightarrow \infty$ wird zum Punkt $\omega \rightarrow \infty$.

5. Aufgabe (5 Punkte): Übertragungsfunktionen

Gegeben ist die folgende Schaltung (Anmerkung: Der Impedanzwandler entkoppelt beide Schaltungen vollständig, d.h. die Ausgangsspannung \underline{U}_H des Impedanzwandlers ist immer gleich seiner Eingangsspannung.)



5.1. Übertragungsverhalten (0,5 Punkte)

Welches prinzipielle Übertragungsverhalten hat diese Schaltung?

Lösung:

Das erste RC-Glied ist ein Tiefpass, das zweite ein Hochpass. Hintereinander geschaltet ergibt sich ein **Bandpass**.

5.2. Übertragungsverhältnis berechnen (2,5 Punkte)

Berechnen Sie das komplexe Übertragungsverhältnis \underline{V} und den Amplitudengang der Schaltung.

Lösung:

- Der Frequenzgang ist das in der Regel komplexe Verhältnis \underline{V} zwischen Ausgangsspannung \underline{U}_2 und Eingangsspannung \underline{U}_1 .
- Es wird die Spannung \underline{U}_H definiert (Siehe Schaltplan).

$$\bullet \frac{\underline{U}_H}{\underline{U}_1} = \frac{1/(j\omega C)}{R + 1/(j\omega C)} = \frac{1}{1 + j\omega RC} \Rightarrow \underline{U}_H = \frac{1}{1 + j\omega RC} \underline{U}_1$$

$$\bullet \frac{U_2}{U_H} = \frac{R}{R + 1/(j\omega C)} = \frac{j\omega RC}{1 + j\omega RC} \Rightarrow U_2 = \frac{j\omega RC}{1 + j\omega RC} U_H$$

- Zusammen ergibt sich

$$U_2 = \frac{j\omega RC}{1 + j\omega RC} \frac{1}{1 + j\omega RC} U_1 \Rightarrow \underline{V} = \frac{U_2}{U_1} = \frac{j\omega RC}{(1 + j\omega RC)^2}$$

- In Real- und Imaginärteil aufspalten. Dazu über und unter dem Bruchstrich mit $(1 - j\omega RC)^2$ multiplizieren

$$\underline{V} = \frac{(1 - j\omega RC)^2 j\omega RC}{((1 + j\omega RC)(1 - j\omega RC))^2} = \frac{2(\omega RC)^2 + j(\omega RC - (\omega RC)^3)}{(1 + (\omega RC)^2)^2}$$

- Es folgt

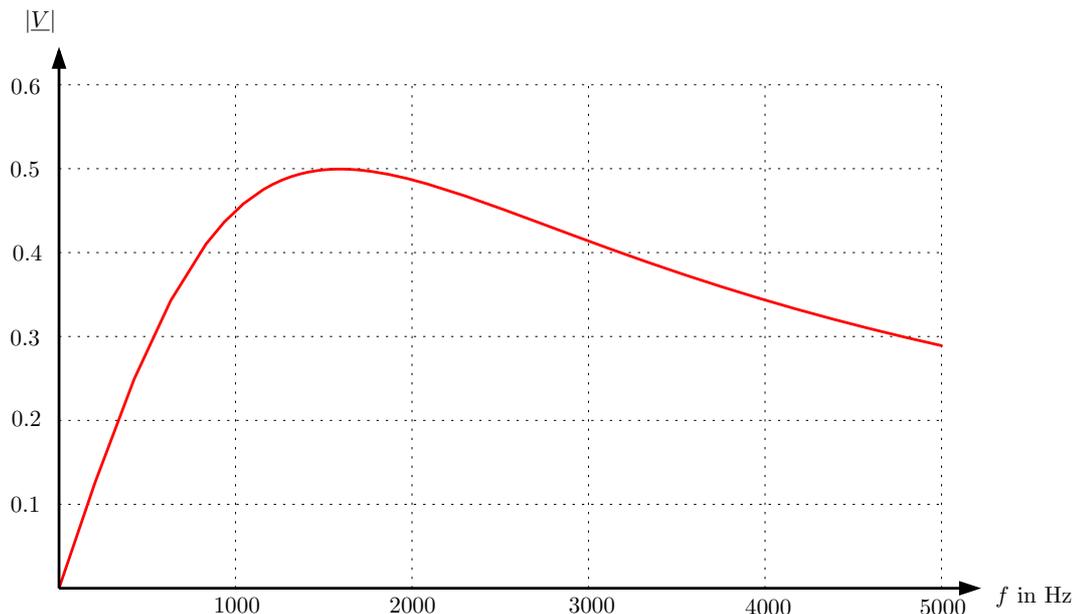
$$\operatorname{Re}(\underline{V}) = \frac{2(\omega RC)^2}{(1 + (\omega RC)^2)^2} \quad \operatorname{Im}(\underline{V}) = \frac{\omega RC - (\omega RC)^3}{(1 + (\omega RC)^2)^2}$$

- und der Amplitudengang ist

$$|\underline{V}| = \sqrt{\operatorname{Re}(\underline{V})^2 + \operatorname{Im}(\underline{V})^2} = \frac{\sqrt{4(\omega RC)^4 + (\omega RC - (\omega RC)^3)^2}}{(1 + (\omega RC)^2)^2}$$

5.3. Amplitudengang skizzieren (1,5 Punkte)

Skizzieren Sie den Amplitudengang für $R = 100\Omega$ und $C = 1\mu F$. Verwenden Sie dazu das vorgefertigte Diagramm. (Anmerkung: Amplitudengang nicht in dB).



5.4. Verständnisfrage (0,5 Punkte)

Stellen Sie sich vor, dass Sie die Schaltung so aufbauen wollen. Sie haben aber nur 130 , 200 und 500Ω Widerstände und Kondensatoren mit 33 und $500nF$. Was machen Sie? **Bitte Begründen!**

Lösung:

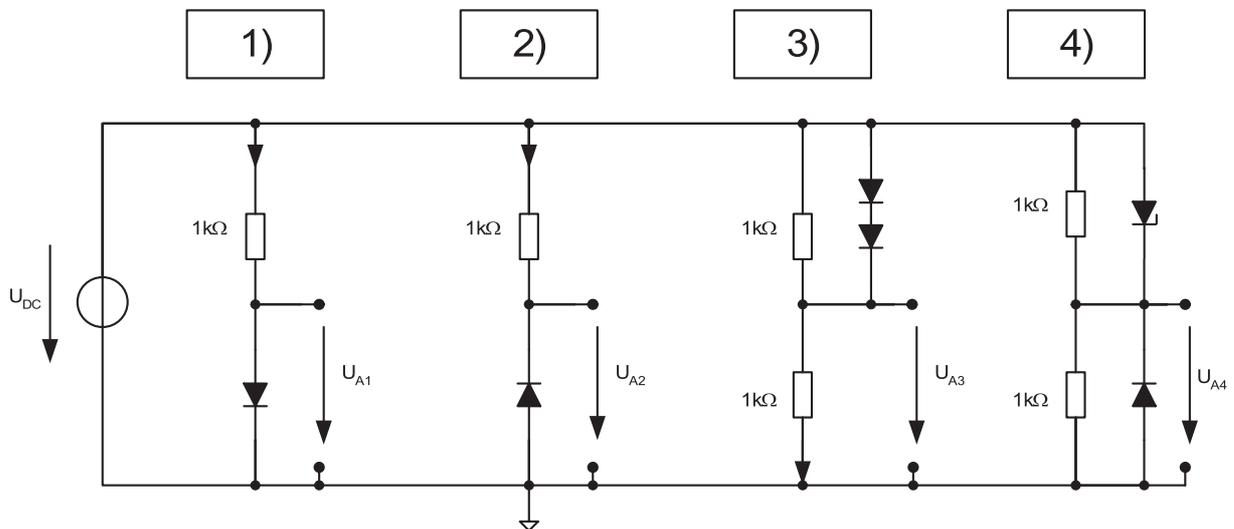
Ich nehme die 200Ω Widerstände und die $500nF$ Kondensatoren. Die Schaltung hat den selben Frequenzgang, da dieser nur durch den Faktor $R \cdot C$ bestimmt wird.

6. Aufgabe (5 Punkte): Dioden und Z-Dioden

6.1. Spannung an Diodenschaltungen (2 Punkte)

Bestimmen Sie die Ausgangsspannungen $U_{A1} \dots U_{A4}$ an den 4 Diodenschaltungen. Für alle Schaltungen gilt:

- Die Eingangsspannung ist $U_{DC} = 10\text{ V}$
- Für jede in **Durchlaßrichtung** betriebene Diode (auch die Z-Diode) gilt $U_F = 0,7\text{ V}$
- Bei einer Z-Diode fließt auch in Sperrpolung Strom, wenn die Durchbruchspannung überschritten wird. Es soll gelten: $U_Z = 6,2\text{ V}$



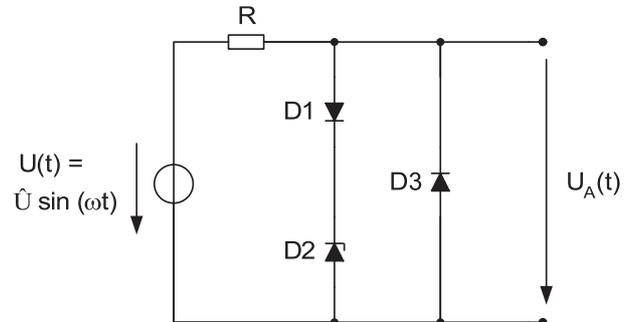
Lösung:

1. Die Diode wird in Durchlaßrichtung betrieben, an ihr fällt die Spannung U_F ab:
 $U_{A1} = U_F = 0,7\text{ V}$ (0,5 Punkte)
2. Die Diode wird in Sperrichtung betrieben, an ihr fällt die gesamte Spannung U_{DC} ab:
 $U_{A2} = U_{DC} = 10\text{ V}$ (0,5 Punkte)
3. Die beiden Dioden werden in Durchlaßrichtung betrieben, der Spannungsabfall an beiden Dioden ist $2 \cdot U_F$, also ist
 $U_{A3} = U_{DC} - (2 \cdot U_F) = 10\text{ V} - 2 \cdot 0,7\text{ V} = 8,6\text{ V}$ (0,5 Punkte)
4. Die Z-Diode arbeitet als normale Diode, da sie in Durchlaßrichtung betrieben wird, an ihr fällt U_F ab. Die Diode parallel zum Ausgang wird in Sperrichtung betrieben, an ihr fällt also die Ausgangsspannung ab:
 $U_{A4} = U_{DC} - U_F = 10\text{ V} - 0,7\text{ V} = 9,3\text{ V}$ (0,5 Punkte)

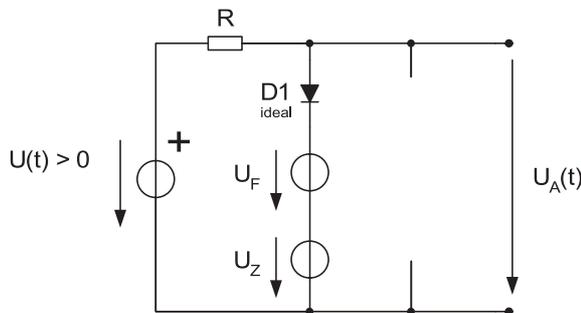
6.2. Spannungsbegrenzerschaltung - Ersatzschaltbild (2 Punkte)

Gegeben ist die nebenstehende Spannungsbegrenzerschaltung. Zeichnen Sie je ein Ersatzschaltbild für die positive und die negative Halbwelle der Eingangsspannung. Berücksichtigen Sie hierbei:

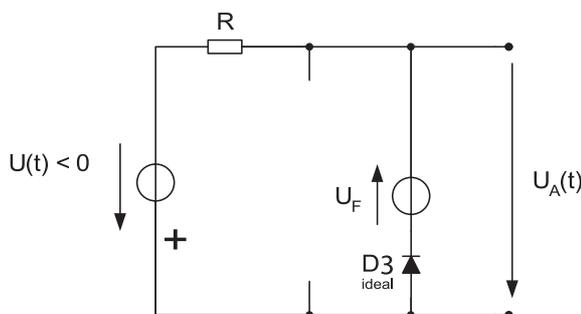
- $\hat{U} = 20\text{ V}$, $f = 50\text{ Hz}$, $R = 2\text{ k}\Omega$
- für alle Dioden ist $r_F = 0$
- für die Dioden $D1$ und $D3$ ist $r_R = \infty$ und $U_F = 0,7\text{ V}$
- für die Z-Diode $D2$ gilt $r_Z = 0$, $r_F = 0$ und $U_F = 0,7\text{ V}$, $U_Z = 9,3\text{ V}$



Lösung:



Während der positiven Halbwelle leitet $D1$, $D2$ wird im Zenerbereich betrieben. Im Ersatzschaltbild entfallen nach Vorgabe r_F, r_Z und r_R . Die Diode $D3$ sperrt und kann vernachlässigt werden $r_R = \infty$.

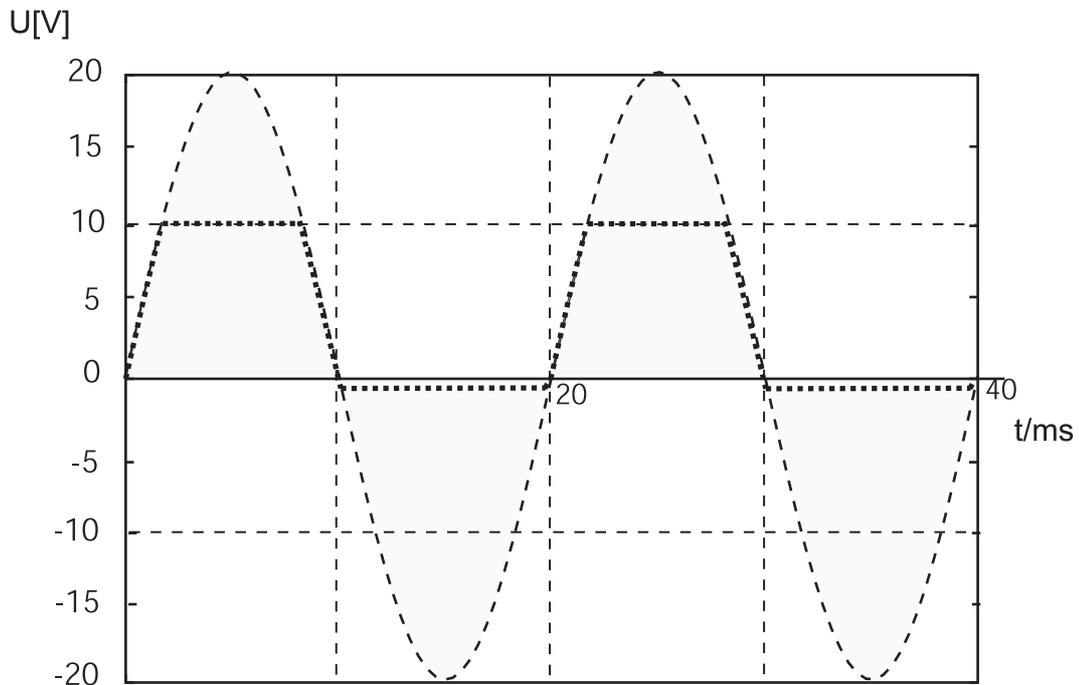


Während der negativen Halbwelle leitet $D2$, jedoch sperrt $D1$, somit kann der ganze Zweig vernachlässigt werden $r_R = \infty$. Die Diode $D3$ leitet.

6.3. Spannungsbegrenzerschaltung - Spannungszeitverlauf (1 Punkt)

Skizzieren Sie den Verlauf der Ausgangsspannung $U_A(t)$ in das gegebene Diagramm.

Berücksichtigen Sie hierbei die vereinfachenden Angaben aus Unteraufgabe 6.2



Lösung:

Während der positiven Halbwelle leitet die Diode $D1$, die Z-Diode wird in Sperrrichtung, also in ihrem Zener-Arbeitsbereich betrieben. Damit wird die Ausgangsspannung auf die Zenerspannung $U_Z = 10\text{ V}$ begrenzt. Bis zum Erreichen von $U(t) = U_Z$ folgt die Ausgangsspannung der Eingangsspannung

Während der negativen Halbwelle sperrt die Diode $D1$. Die Diode $D3$ leitet, damit ist am Ausgang die Spannung auf $U_{A,min} = -U_F$ begrenzt. Bis zum Erreichen von $U(t) = -U_F$ folgt die Ausgangsspannung der Eingangsspannung