

1. Kurzfragen zu Elektrotechnik 1 (18 Punkte)

KF1) Eine Wassermenge von 80001 m^3 ($\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$) soll mit einer Pumpe mit einer Leistungsaufnahme von 2 kW (Annahme: $\eta = 0,8$) um 5 m angehoben werden. 3 P

Wie lange dauert der Pumpvorgang und wie groß ist die Verlustenergie?

$$\begin{aligned} E_{\text{pot}} &= m \cdot g \cdot h = 80001 \text{ kg} \cdot 9,81 \text{ m/s}^2 \cdot 5 \text{ m} = 392,4 \text{ kJ} = 109 \text{ Wh} \\ \eta \cdot P &= \frac{E_{\text{pot}}}{t} \Rightarrow t = \frac{E_{\text{pot}}}{P \cdot \eta} = \frac{109 \text{ Wh}}{2 \text{ kW} \cdot 0,8} = 0,07 \text{ h} = 4 \text{ min} \\ E_{\text{Verlust}} &= (1 - \eta) \cdot P \cdot t = (1 - 0,8) \cdot 2 \text{ kW} \cdot 0,07 \text{ h} = 28 \text{ Wh} \end{aligned}$$

KF2) Ein Drehspulinstrument mit einem Innenwiderstand $R_m = 100 \Omega$ und einem Messbereichsendwert $U_m = 1,5 \text{ V}$ soll als Spannungsmesser mit dem Messbereichsendwert $U = 150 \text{ V}$ eingesetzt werden. 2 P

Wie ist der Vorwiderstand zu dimensionieren?

$$R_V = R_M \left(\frac{U}{U_m} - 1 \right) = 100 \Omega \left(\frac{150 \text{ V}}{1,5 \text{ V}} - 1 \right) = 9,9 \text{ k}\Omega$$

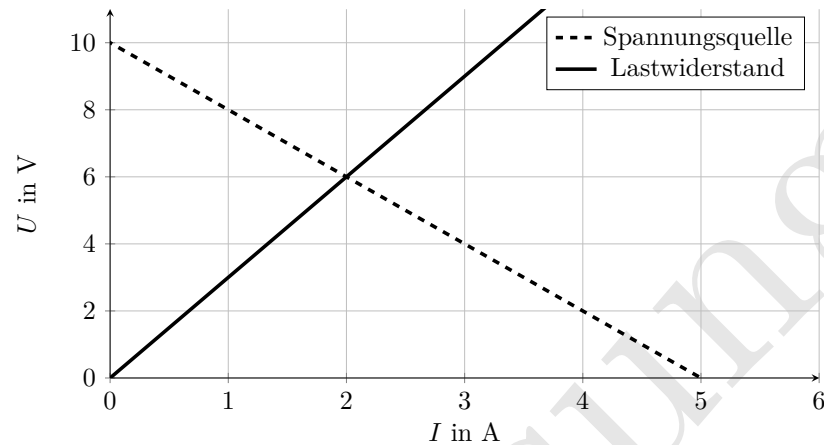
alternativ:

$$\begin{aligned} U_V &= U - U_m = 150 \text{ V} - 1,5 \text{ V} = 148,5 \text{ V} \\ I &= \frac{U_m}{R_m} = \frac{1,5 \text{ V}}{100 \Omega} = 0,015 \text{ A} \\ R_V &= \frac{U_V}{I} = \frac{148,5 \text{ V}}{0,015 \text{ A}} = 9,9 \text{ k}\Omega \end{aligned}$$

KF3) Gegeben ist eine verlustbehaftete Spannungsquelle mit $U_0 = 10 \text{ V}$ und $R_i = 2 \Omega$.

5 P

- a) Zeichnen Sie die Kennlinie der Spannungsquelle in das gegebene Koordinatensystem ein und beschriften Sie diese.



- b) Es wird ein Lastwiderstand mit $R_L = 3 \Omega$ angeschlossen. Ermitteln Sie durch Eintragen der Widerstandskennlinie im Diagramm aus Teilaufgabe a) den durch den Widerstand fließenden Strom und die Spannung am Widerstand und geben Sie diese Werte hier an. Beschriften Sie die eingetragene Kennlinie.

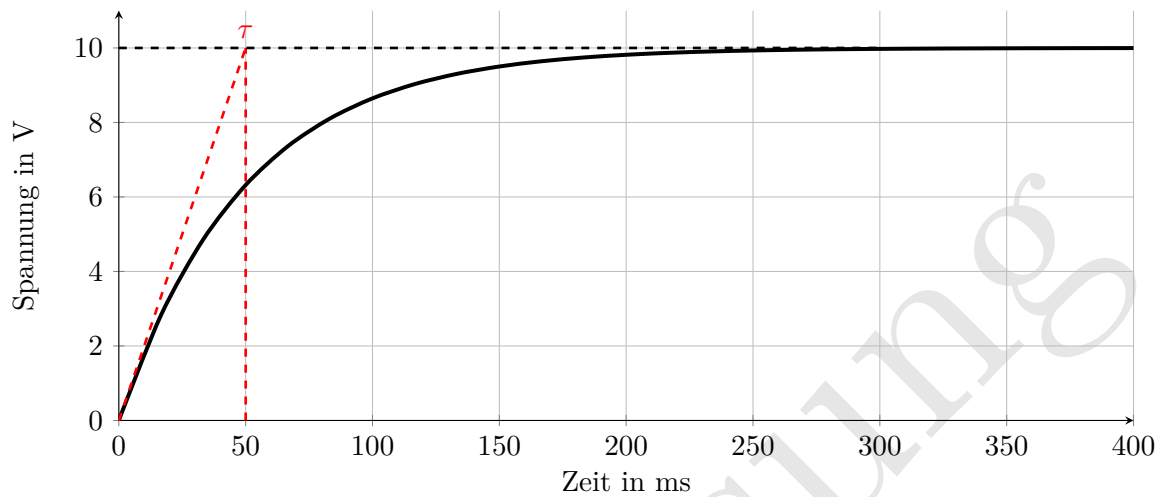
$$U_{AP} = 6 \text{ V}$$

$$I_{AP} = 2 \text{ A}$$

- c) Bestimmen Sie die in der Spannungsquelle umgesetzte Verlustleistung, wenn der Lastwiderstand $R_L = 3 \Omega$ an der Spannungsquelle betrieben wird.

$$P_{\text{Verlust}} = I^2 \cdot R_i = \left(\frac{U_0}{R_i + R_L} \right)^2 \cdot R_i = \left(\frac{10 \text{ V}}{2 \Omega + 3 \Omega} \right)^2 \cdot 2 \Omega = 8 \text{ W}$$

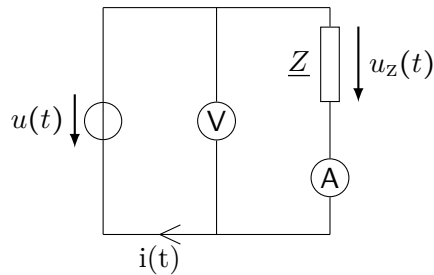
KF4) Gegeben ist der zeitliche Verlauf der Kondensatorsspannung beim Einschaltvorgang einer RC- 3 P
Reihenschaltung an einer Gleichspannungsquelle mit $U = 10 \text{ V}$.



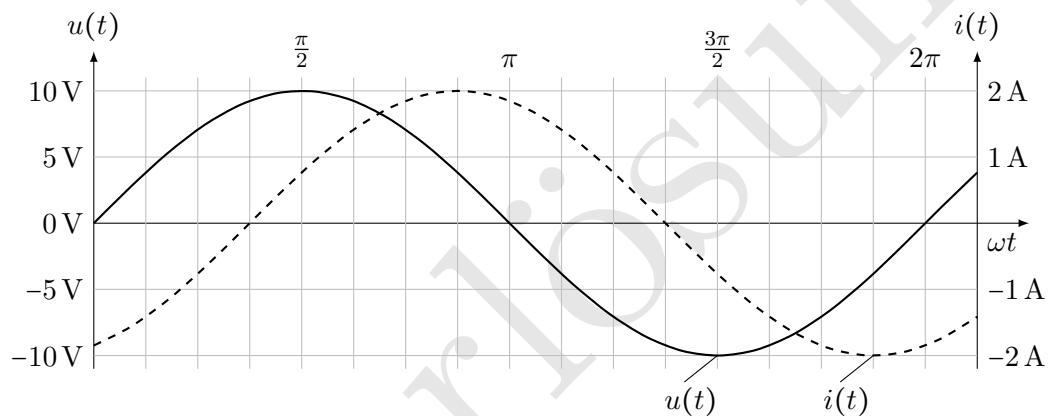
Bestimmen Sie den Wert des ohmschen Widerstandes R , wenn bekannt ist, dass die Kapazität 10 mF beträgt.

$$\tau = R \cdot C \quad \Rightarrow \quad R = \frac{\tau}{C} = \frac{50 \text{ ms}}{10 \text{ mF}} = 5 \Omega$$

- KF5) Gegeben ist das folgende Netzwerk auch einer idealen Wechselspannungsquelle und einer 5 P unbekanntem Impedanz \underline{Z} .



Die zeitlichen Verläufe von Spannung und Strom sind im Diagramm gegeben.



- a) Bestimmen Sie die Effektivwerte von Strom und Spannung sowie die unbekanntem Impedanz \underline{Z} nach Betrag und Phase für eine Frequenz von 50 Hz.

$$\varphi = 67,5^\circ \quad (\text{aus Diagramm abgelesen})$$

$$U_{\text{eff}} = \frac{10 \text{ V}}{\sqrt{2}} = 7,07 \text{ V}$$

$$I_{\text{eff}} = \frac{2 \text{ A}}{\sqrt{2}} = 1,41 \text{ A}$$

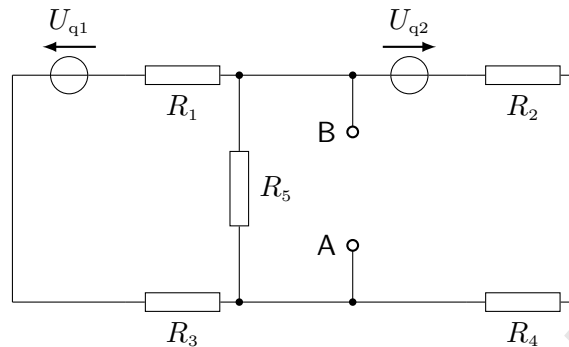
$$\underline{Z} = \frac{U}{I} \cdot e^{j\varphi} = \frac{7,07 \text{ V}}{1,41 \text{ A}} \cdot e^{j67,5^\circ} = 5 \Omega \cdot e^{j67,5^\circ}$$

- b) Verhält sich die Last induktiv, ohmsch-induktiv, ohmsch, ohmsch-kapazitiv oder kapazitiv? Begründen Sie Ihre Antwort!

Die Last verhält sich ohmsch-induktiv, da der Strom der Spannung um $\varphi < 90^\circ$ nach eilt.

2. Gleichstrom (22 Punkte)

Gegeben ist das dargestellte Netzwerk:



Folgende Werte sind gegeben:

$$U_{q1} = 10 \text{ V}$$

$$U_{q2} = 20 \text{ V}$$

$$R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R_5 = 5 \Omega$$

Aufgaben:

- GS1) Geben Sie bei allen Teilaufgaben einen Ansatz mit entsprechenden Indizes an, setzen Sie auch in Zwischenschritten Zahlenwerte ein und verwenden Sie die richtigen Einheiten und gegebenenfalls Unterstriche. *Diese Teilaufgabe erfordert keine Bearbeitung.* 4 P
- GS2) Wandeln Sie das gegebene Netzwerk in eine äquivalente Ersatzspannungsquelle bezüglich der Klemmen A und B um. Geben Sie das Ersatzschaltbild und die charakteristischen Größen (R_i , U_0 und I_K) an. 7 P

An eine Ersatzspannungsquelle ($U_0 = 2,5 \text{ V}$, $R_i = 2,5 \Omega$) wird der Lastwiderstand R_{AB} angeschlossen.

- GS3) Zeichnen Sie das Ersatzschaltbild inklusive aller Ströme und Spannungen. Bestimmen Sie die Größe des Widerstandes, sodass der Spannungsabfall an diesem doppelt so groß ist wie der Spannungsabfall am Innenwiderstand der Ersatzspannungsquelle. 3 P
- GS4) Legen Sie den Belastungswiderstand R_{AB} so aus, dass an diesem die gleiche Leistung wie am Innenwiderstand umgesetzt wird. Wie nennt man diesen Lastfall und wodurch ist er charakterisiert? 3 P

An die Ersatzspannungsquelle ($U_0 = 10 \text{ V}$, $R_i = 2,5 \Omega$) wird nun eine Glühlampe mit einem Widerstand von $R_L = 5 \Omega$ und einer Leistungsaufnahme von 5 W angeschlossen.

- GS5) Um einen unzulässig hohen Strom zu verhindern muss ein Parallelwiderstand zu der Lampe geschaltet werden. Zeichnen Sie ein Ersatzschaltbild und legen Sie diesen Widerstand aus. 5 P

Lösung

GS1) Formale Bewertung: Es wurden alle Einheiten und gegebenenfalls Unterstriche richtig verwendet und in allen Zwischenschritten Zahlenwerte eingesetzt.

GS2) Ersatzspannungsquelle:

a) Innenwiderstand

$$R_i = \frac{1}{\frac{1}{R_1+R_3} + \frac{1}{R_2+R_4} + \frac{1}{R_5}} = \frac{1}{\frac{1}{5\Omega+5\Omega} + \frac{1}{5\Omega+5\Omega} + \frac{1}{5\Omega}} = 2,5\Omega$$

b) Umwandlung in Stromquellen und Kurzschlussversuch:

$$I_{K1} = \frac{U_{q1}}{R_1 + R_3} = \frac{10\text{ V}}{5\Omega + 5\Omega} = 1\text{ A}$$

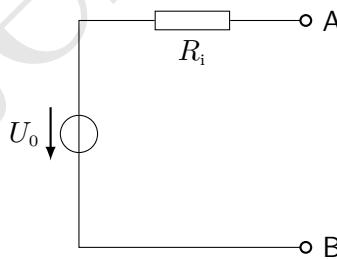
$$I_{K2} = \frac{U_{q2}}{R_2 + R_4} = \frac{20\text{ V}}{5\Omega + 5\Omega} = 2\text{ A}$$

$$I_K = I_{K1} + I_{K2} = 1\text{ A} + 2\text{ A} = 3\text{ A}$$

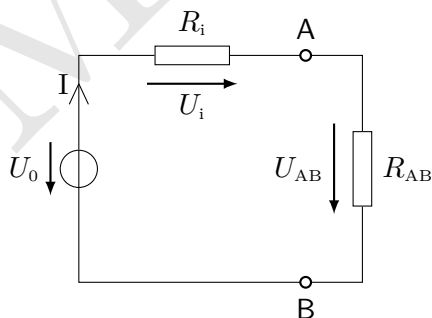
c) Leerlaufspannung

$$U_0 = R_i \cdot I_K = 2,5\Omega \cdot 3\text{ A} = 7,5\text{ V}$$

d) Ersatzschaltbild



GS3) Widerstand auslegen für $U_{AB} = 2 \cdot U_i$



$$U_{AB} = U_0 \cdot \frac{R_{AB}}{R_i + R_{AB}}$$

$$U_i = U_0 \cdot \frac{R_i}{R_i + R_{AB}}$$

$$\frac{U_{AB}}{U_i} = \frac{R_{AB}}{R_i} = 2 \quad \text{Spannungsteiler}$$

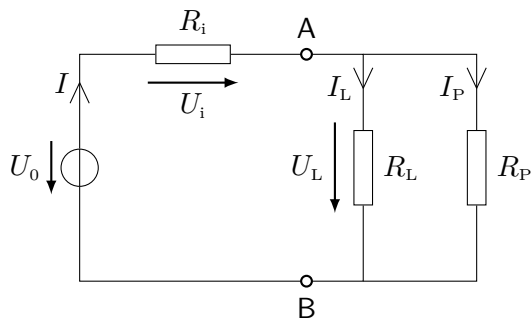
$$R_{AB} = 2 \cdot R_i = 2 \cdot 2,5\Omega = 5\Omega$$

GS4) Widerstand auslegen für $P_{AB} = P_i$

$$P = I^2 \cdot R, \text{ bei gleichem } I \Rightarrow R_{AB} = R_i = 2,5\Omega.$$

Lastfall: Leistungsanpassung, maximale Leistung am Lastwiderstand

GS5) Auslegung Parallelwiderstand



$$U_L = \sqrt{P_L \cdot R_L} = \sqrt{5 \text{ W} \cdot 5 \Omega} = 5 \text{ V}$$

$$\frac{U_L}{U_0} = \frac{U_i}{U_0} = \frac{1}{2} \quad \text{Spannungsteiler}$$

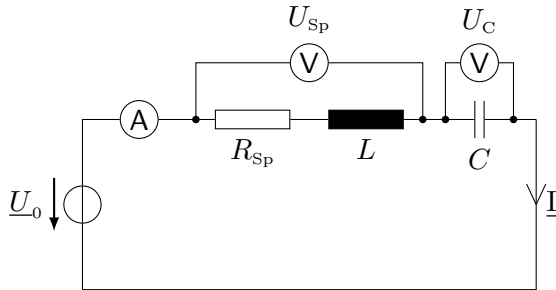
$$U_L = U_i \Rightarrow \frac{R_L \cdot R_P}{R_L + R_P} = R_i$$

$$R_L \cdot R_P = R_L \cdot R_i + R_P \cdot R_i$$

$$R_P = \frac{R_L \cdot R_i}{R_L - R_i} = \frac{5 \Omega \cdot 2,5 \Omega}{5 \Omega - 2,5 \Omega} = 5 \Omega$$

3. Wechselstrom (22 Punkte)

Gegeben ist die folgende Schaltung, in der jeweils der Spannungsabfall über eine verlustbehaftete Induktivität und einen Kondensator mittels Weicheisenmessgeräten gemessen wird.



Folgende Werte sind gegeben:

$$L = 450 \text{ mH}$$

$$C = 680 \text{ nF}$$

Aufgaben:

WS1) Geben Sie bei allen Teilaufgaben einen Ansatz mit entsprechenden Indizes an, setzen Sie auch in Zwischenschritten Zahlenwerte ein und verwenden Sie die richtigen Einheiten und gegebenenfalls Unterstriche. *Diese Teilaufgabe erfordert keine Bearbeitung.* 4 P

An einer Spannungsquelle mit $U_0 = 10 \text{ V}$ und $f = 50 \text{ Hz}$ werden folgende Werte gemessen:

$$U_{sp} = 1,25 \text{ V}$$

$$I = 2,2 \text{ mA}$$

WS2) Bestimmen Sie den ohmschen Widerstand der Spule, den Spannungsabfall an U_C sowie den Phasenwinkel der Schaltung. 6 P

Nachfolgend soll für die obige Schaltung der Betragsresonanzfall untersucht werden. Mit dem im Messaufbau genutzten Messgeräten wird die Resonanzfrequenz experimentell durch $U_{sp} = U_C$ ermittelt:

$$U_{sp} = 11,1 \text{ V}$$

$$U_C = 11,1 \text{ V}$$

$$I = 12,2 \text{ mA}$$

WS3) Berechnen Sie die Resonanzfrequenz der Schaltung aus den angegebenen Bauteilwerten (ohne Berücksichtigung von R_{sp}). 2 P

WS4) Berechnen Sie die im Experiment ermittelte Resonanzfrequenz aus den gegebenen Messwerten und begründen Sie, warum sich nicht die in Teilaufgabe 3 ermittelte Frequenz ergibt. 3 P

Die Frequenz der Eingangsspannung wird geändert, sodass sich für die Schaltung ein Phasenwinkel $\varphi = 0$ ergibt und sich folgende Werte einstellen:

$$U_{sp} = 17,9 \text{ V}$$

$$U_C = 14,8 \text{ V}$$

$$I = 18,2 \text{ mA}$$

WS5) Zeichnen Sie das Zeigerbild (\underline{I} , \underline{U}_{sp} , \underline{U}_C , \underline{U}_0) für diesen Fall. Bestimmen Sie ebenfalls rechnerisch den Phasenwinkel φ_L , der sich zwischen \underline{U}_{sp} und \underline{I} einstellt und tragen Sie diesen im Zeigerdiagramm ein. Verwenden Sie als Maßstab $1 \text{ V} \hat{=} 0,5 \text{ cm}$ und $1 \text{ mA} \hat{=} 0,5 \text{ cm}$ 7 P

Lösung

WS1) Formale Bewertung: Es wurden alle Einheiten und gegebenenfalls Unterstriche richtig verwendet und in allen Zwischenschritten Zahlenwerte eingesetzt.

WS2) Spulenwiderstand und Spannungsabfall über C sowie Phasenwinkel der Schaltung

$$\begin{aligned}U_{\text{Sp}} &= Z_{\text{Sp}} \cdot I = \sqrt{R_{\text{Sp}}^2 + X_{\text{Sp}}^2} \cdot I \\ \Rightarrow R_{\text{Sp}} &= \sqrt{\left(\frac{U_{\text{Sp}}}{I}\right)^2 - (2\pi \cdot f \cdot L)^2} = \sqrt{\left(\frac{1,25 \text{ V}}{2,2 \text{ mA}}\right)^2 - (2\pi \cdot 50 \text{ Hz} \cdot 450 \text{ mH})^2} = 550 \Omega \\ U_C &= Z_C \cdot I = \frac{1}{\omega \cdot C} \cdot I = \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot C} \cdot I = \frac{1}{2\pi \cdot 50 \text{ Hz} \cdot 680 \text{ nF}} \cdot 2,2 \text{ mA} = 10,3 \text{ V} \\ \varphi &= \arctan\left(\frac{X_L - X_C}{R}\right) = \arctan\left(\frac{2\pi \cdot f \cdot L - \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot C}}{R}\right) \\ &= \arctan\left(\frac{2\pi \cdot 50 \text{ Hz} \cdot 450 \text{ mH} - \frac{1}{2\pi \cdot 50 \text{ Hz} \cdot 680 \text{ nF}}}{550 \Omega}\right) = -83,1^\circ\end{aligned}$$

WS3) Resonanzfrequenz aus Bauteilwerten:

$$f_{\text{res}} = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{LC}} = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{450 \text{ mH} \cdot 680 \text{ nF}}} = 287,7 \text{ Hz}$$

WS4) Resonanzfrequenz aus Messwerten:

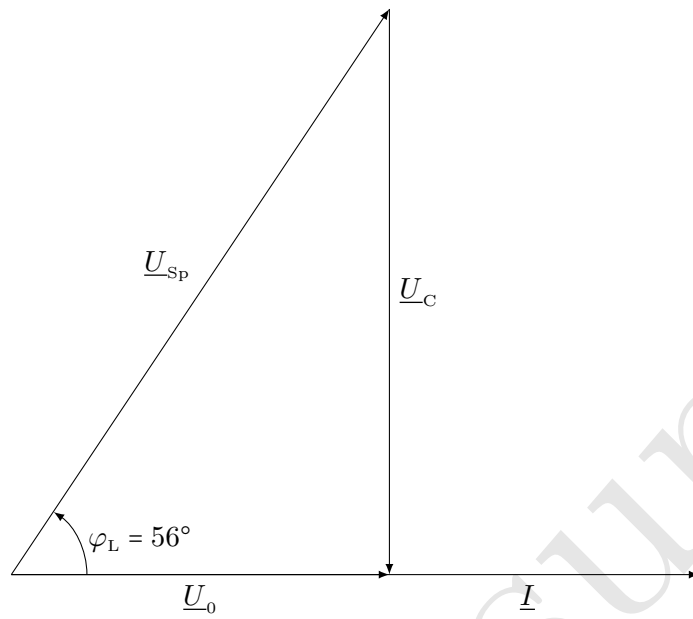
$$\begin{aligned}X_{C, \text{ res, Betrag}} &= \frac{U_C}{I} = \frac{11,1 \text{ V}}{12,2 \text{ mA}} = 909,8 \Omega \\ f_{\text{res, Betrag}} &= \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot C \cdot X_{C, \text{ res, Betrag}}} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 680 \text{ nF} \cdot 909,8 \Omega} = 257 \text{ Hz}\end{aligned}$$

Die ermittelte Resonanzfrequenz weicht vom Ergebnis aus WS3 ab, da in WS3 die Bedingung $U_L = U_C$ zugrunde liegt, im Experiment aber nur U_{Sp} ermittelt werden kann.

WS5) Zeigerbild

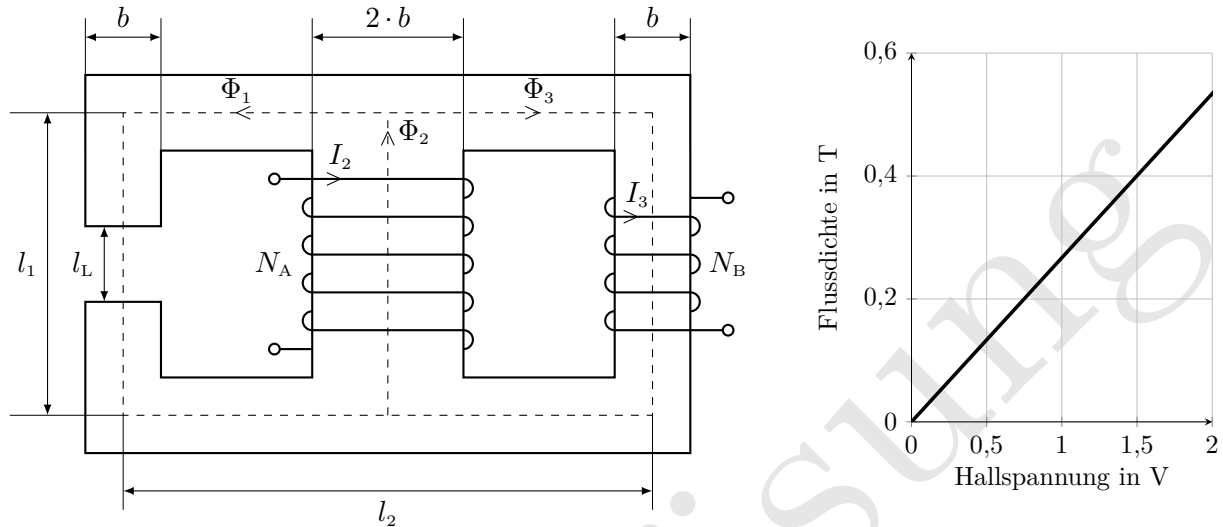
Rechnerische Bestimmung von φ_L :

$$\begin{aligned}\varphi = 0 &\Rightarrow |\text{Im}\{\underline{U}_{\text{Sp}}\}| = |\underline{U}_C| = 14,8 \text{ V} \\ \varphi_L &= \arcsin\left(\frac{|\text{Im}\{\underline{U}_{\text{Sp}}\}|}{|\underline{U}_{\text{Sp}}|}\right) = \arcsin\left(\frac{14,8 \text{ V}}{17,9 \text{ V}}\right) = 56^\circ\end{aligned}$$



4. Magnetfeld (22 Punkte)

Gegeben ist der dargestellte Eisenkern, sowie die Kennlinie einer Hallsonde:



Folgende Werte sind gegeben:

$$I_2 = 5 \text{ A}$$

$$N_A = 500 \text{ Wdg.}$$

$$N_B = 50 \text{ Wdg.}$$

$$\mu_r = 1000$$

$$l_1 = 25 \text{ cm}$$

$$l_2 = 50 \text{ cm}$$

$$l_L = 1 \text{ cm}$$

$$b = 10 \text{ cm}$$

Die Tiefe des Eisenkerns beträgt $b = 10 \text{ cm}$.

Aufgaben:

MF1) Geben Sie bei allen Teilaufgaben einen Ansatz mit entsprechenden Indizes an, setzen Sie auch in Zwischenschritten Zahlenwerte ein und verwenden Sie die richtigen Einheiten und gegebenenfalls Unterstriche. *Diese Teilaufgabe erfordert keine Bearbeitung.* 4 P

MF2) Zeichnen Sie das elektrische Ersatzschaltbild des magnetischen Kreises inklusive aller Flüsse und der Durchflutung und bestimmen Sie den magnetischen Fluss im Luftspalt. 12 P

Beachten Sie dabei folgende Hinweise:

- In Spule B fließt kein Strom ($I_3 = 0$).
- Der magn. Fluss Φ_2 beträgt $0,038 \text{ Vs}$.
- Der magn. Widerstand, der den Fluss Φ_2 führt, beträgt $R_{M,2} = 9,95 \cdot 10^3 \text{ A/Vs}$.
- Der magn. Widerstand, der den Fluss Φ_3 führt, beträgt $R_{M,3} = 5,97 \cdot 10^4 \text{ A/Vs}$.

Durch Änderung des Stromflusses in Spule A (Windungszahl N_A) stellt sich ein Fluss $\Phi_2 = 0,061 \text{ Vs}$ ein. Im Luftspalt wird mittels einer Hallsonde eine Hallspannung von $1,5 \text{ V}$ gemessen.

MF3) Bestimmen Sie die Fluss Φ_1 . Beachten Sie dabei die gegebenen Kennlinie der Hallsonde. 2 P

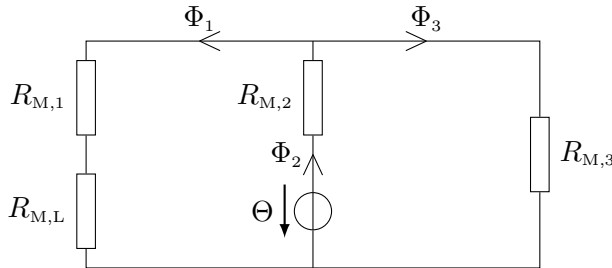
Der Luftspalt wird mit einem Quader aus dem gleichen Material, aus dem der Eisenkern besteht, vollständig ausgefüllt. In Spule A (Windungszahl N_A) wird ein Wechselstrom mit $i_2(t) = 5 \text{ A} \cdot \sin(314,16 \text{ s}^{-1} \cdot t)$ eingepreßt, wodurch sich ein Fluss $\Phi_2 = 0,0628 \text{ Vs} \cdot \sin(314,16 \text{ s}^{-1} \cdot t)$ einstellt.

MF4) Bestimmen Sie den zeitlichen Verlauf des sich einstellenden Flusses Φ_3 und den zeitlichen Verlauf der in Spule B (Windungszahl N_B) induzierten Spannung $u_3(t)$. 4 P

Lösung

MF1) Formale Bewertung: Es wurden alle Einheiten und gegebenenfalls Unterstriche richtig verwendet und in allen Zwischenschritten Zahlenwerte eingesetzt.

MF2) Ersatzschaltbild und Fluss Φ_3



$$R_{M,1} = \frac{l_1 + l_2 - l_L}{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot b^2} = \frac{0,25 \text{ m} + 0,5 \text{ m} - 0,01 \text{ m}}{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \text{ Vs/Am} \cdot 1000 \cdot (0,1 \text{ m})^2} = 5,89 \cdot 10^4 \text{ A/Vs}$$

$$R_{M,L} = \frac{l_L}{\mu_0 \cdot b^2} = \frac{0,01 \text{ m}}{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \text{ Vs/Am} \cdot (0,1 \text{ m})^2} = 7,96 \cdot 10^5 \text{ A/Vs}$$

$$R_{M,ges} = R_2 + \frac{(R_1 + R_L) \cdot R_3}{R_1 + R_L + R_3}$$

$$= 9,95 \cdot 10^3 \text{ A/Vs} + \frac{(5,89 \cdot 10^4 \text{ A/Vs} + 7,96 \cdot 10^5 \text{ A/Vs}) \cdot 5,97 \cdot 10^4 \text{ A/Vs}}{5,89 \cdot 10^4 \text{ A/Vs} + 7,96 \cdot 10^5 \text{ A/Vs} + 5,97 \cdot 10^4 \text{ A/Vs}}$$

$$= 6,58 \cdot 10^4 \text{ A/Vs}$$

$$\Theta = \Phi_2 \cdot R_{M,2} - \Phi_1 \cdot (R_1 + R_L)$$

$$\Phi_1 = \frac{N \cdot I_2 - R_2 \cdot \Phi_2}{R_1 + R_L}$$

$$= \frac{500 \cdot 5 \text{ A} - 9,95 \cdot 10^3 \text{ A/Vs} \cdot 0,038 \text{ Vs}}{5,89 \cdot 10^4 \text{ A/Vs} + 7,96 \cdot 10^5 \text{ A/Vs}} = 2,5 \cdot 10^{-3} \text{ Vs}$$

MF3) Fluss Φ_1 mittels Hallsonde

$$B(U_H = 1,5 \text{ V}) = 0,4 \text{ T}$$

$$\Phi_1 = B_1 \cdot b^2 = 0,4 \text{ T} \cdot (0,1 \text{ m})^2 = 4 \cdot 10^{-3} \text{ Vs}$$

MF4) Fluss Φ_3 und induzierte Spannung $u_3(t)$

$$\Phi_{3,neu}(t) = \frac{\Phi_{2,neu}(t)}{2}$$

$$= \frac{0,0628 \text{ Vs} \cdot \sin(314,16 \text{ s}^{-1} \cdot t)}{2} = 0,0314 \text{ Vs} \cdot \sin(314,16 \text{ s}^{-1} \cdot t)$$

$$u_3(t) = N_B \cdot \frac{d\Phi_{3,neu}(t)}{dt} = 50 \cdot \frac{d(0,0314 \text{ Vs} \cdot \sin(314,16 \text{ s}^{-1} \cdot t))}{dt}$$

$$= 50 \cdot 0,0314 \text{ Vs} \cdot 314,16 \text{ s}^{-1} \cdot \cos(314,16 \text{ s}^{-1} \cdot t) = 493,23 \text{ V} \cdot \cos(314,16 \text{ s}^{-1} \cdot t)$$

5. Kurzfragen zu Elektrotechnik 2 (18 Punkte)

KF1) Gegeben ist ein einphasiger Transformator mit folgenden Werten:

6 P

$$U_N = 20 \text{ kV}$$

$$N_1 = 50\,000 \text{ Wdg.}$$

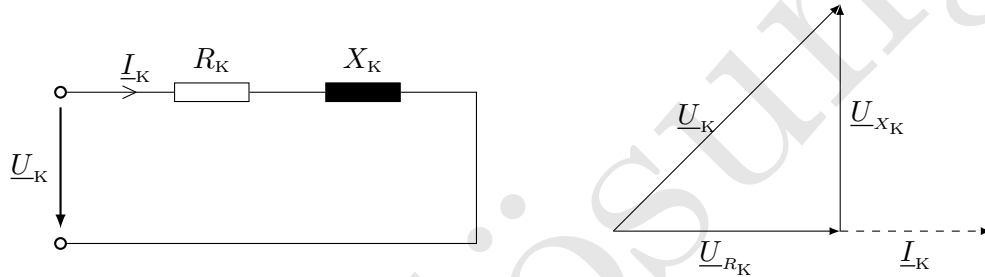
$$S_N = 100 \text{ kV A}$$

$$N_2 = 1000 \text{ Wdg.}$$

$$I_N = 5 \text{ A}$$

$$\ddot{u} = 50$$

- a) Zeichnen Sie das vereinfachte Ersatzschaltbild und das zugehörige Zeigerbild für den Kurzschlussversuch.



- b) Beim Kurzschlussversuch wurden folgende Werte gemessen:

$$P_K = 1 \text{ kW}$$

$$u_k = 4\%$$

Berechnen Sie R_1 und R_2 sowie $X_{\sigma 1}$ und $X_{\sigma 2}$.

$$Z_K = \frac{u_k \cdot U_N}{I_K} = \frac{4\% \cdot 20 \text{ kV}}{5 \text{ A}} = 160 \Omega$$

$$R_K = \frac{P_K}{I_K^2} = \frac{1 \text{ kW}}{(5 \text{ A})^2} = 40 \Omega$$

$$\Rightarrow R_1 = \frac{R_K}{2} = \frac{40 \Omega}{2} = 20 \Omega$$

$$\Rightarrow R_2 = \frac{R_1}{\ddot{u}^2} = \frac{20 \Omega}{50^2} = 8 \text{ m}\Omega$$

$$X_K = \sqrt{(Z_K)^2 - (R_K)^2} = \sqrt{(160 \Omega)^2 - (40 \Omega)^2} = 154,9 \Omega$$

$$\Rightarrow X_{\sigma 1} = \frac{X_K}{2} = \frac{154,9 \Omega}{2} = 77,5 \Omega$$

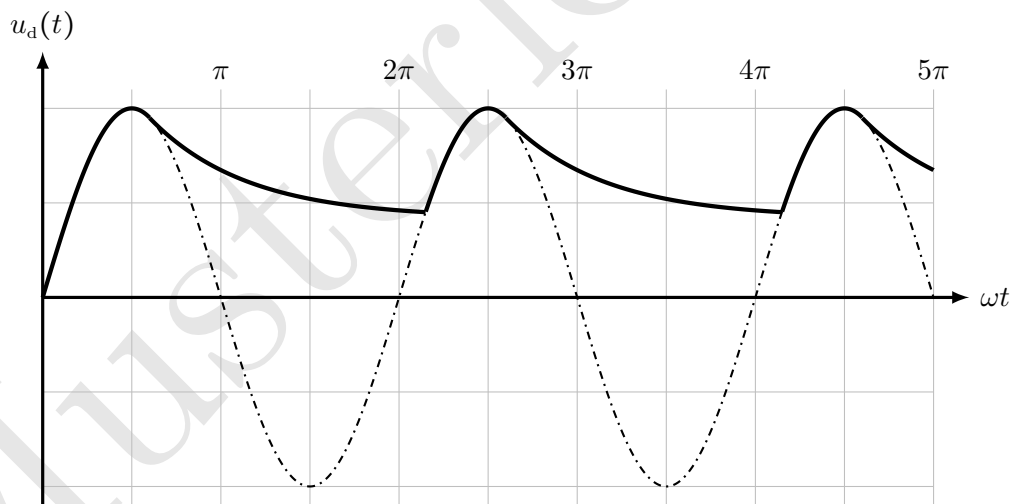
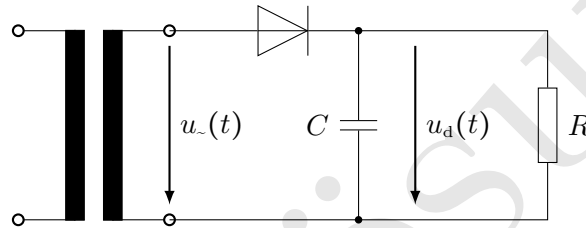
$$\Rightarrow X_{\sigma 2} = \frac{X_{\sigma 1}}{\ddot{u}^2} = \frac{77,5 \Omega}{50^2} = 31 \text{ m}\Omega$$

KF2) Nennen Sie die fünf Sicherheitsregeln in der richtigen Reihenfolge!

3 P

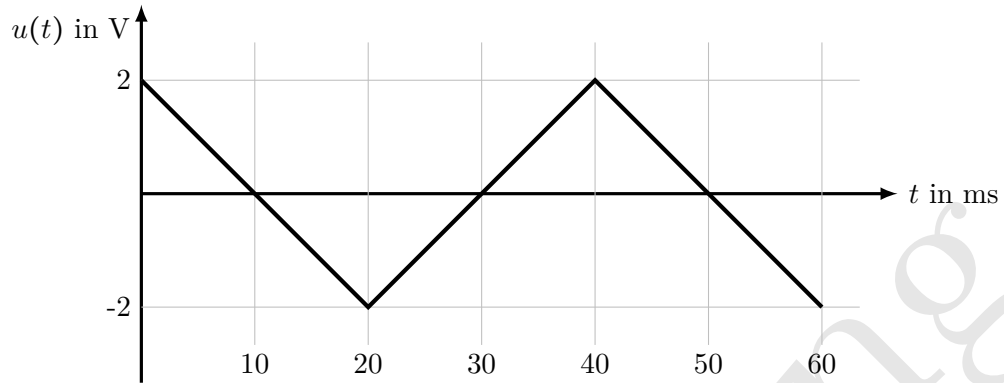
- 1) Freischalten
- 2) Gegen Wiedereinschalten sichern
- 3) Spannungsfreiheit feststellen
- 4) Erden und Kurzschließen
- 5) benachbarte, unter Spannung stehende Teile abschirmen

KF3) Zeichnen Sie qualitativ den Spannungsverlauf der folgenden Schaltung in das gegebene Diagramm ein! 1 P



KF4) Gegeben ist folgender Spannungsverlauf.

4P



a) Geben Sie die Periodendauer T an!

$$T = 40 \text{ ms}$$

b) Berechnen Sie den Gleichrichtwert!

$$\begin{aligned} |\bar{u}(t)| &= \frac{1}{T} \int_t^{t+T} |u(t)| dt \\ &= \frac{1}{10 \text{ ms}} \int_{0 \text{ ms}}^{10 \text{ ms}} \left| -\frac{2 \text{ V}}{10 \text{ ms}} \cdot t + 2 \text{ V} \right| dt \\ &= \frac{1}{10 \text{ ms}} \left[\left| -\frac{2 \text{ V}}{10 \text{ ms}} \cdot \frac{1}{2} \cdot t^2 + 2 \text{ V} \cdot t \right| \right]_{0 \text{ ms}}^{10 \text{ ms}} \\ &= \frac{1}{10 \text{ ms}} \left[\left| -\frac{2 \text{ V}}{10 \text{ ms}} \cdot \frac{1}{2} \cdot 10 \text{ ms}^2 + 2 \text{ V} \cdot 10 \text{ ms} \right| \right] \\ &= \frac{1}{10 \text{ ms}} [|(-1 \text{ V} + 2 \text{ V}) \cdot 10 \text{ ms}|] \\ &= 1 \text{ V} \end{aligned}$$

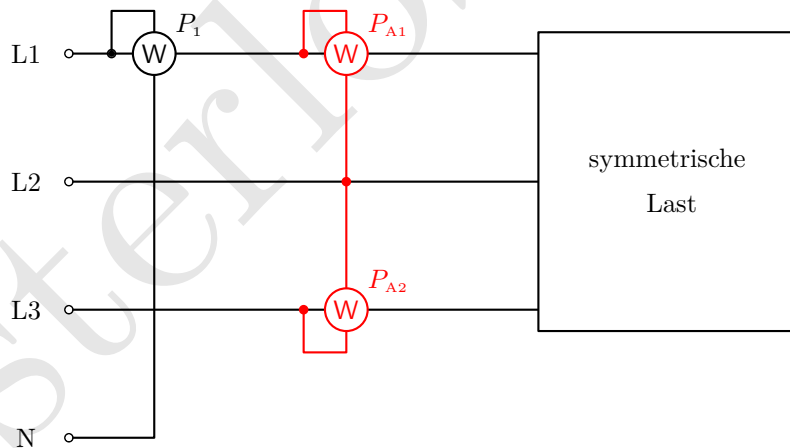
KF5) An einer unbekanntem symmetrischen Drehstromlast werden mittels einphasiger Leistungs- 4P messung und Leistungsmessung per Aron-Schaltung folgende Werte ermittelt:

$$P_{A1} = 100 \text{ W}$$

$$P_{A2} = 80 \text{ W}$$

$$P_1 = 60 \text{ W}$$

- a) Zeichnen Sie die Messgeräte zur Bestimmung der Leistungen P_{A1} und P_{A2} in das Schaltbild ein. Achten Sie auf vollständige Beschriftung.



- b) Bestimmen Sie die in der Schaltung umgesetzte Wirk- und Blindleistung.

$$P = 3 \cdot P_1 = P_{A1} + P_{A2} = 100 \text{ W} + 80 \text{ W} = 180 \text{ W}$$

$$Q = \sqrt{3} \cdot (P_{A2} - P_{A1}) = \sqrt{3} \cdot (80 \text{ W} - 100 \text{ W}) = -34,6 \text{ var}$$

- c) Aus welchen Bauteilen ist die Last aufgebaut? Begründen Sie Ihre Antwort anhand er gemessenen Werte.

Die Last besteht aus einer RC-Schaltung, da $P \neq 0$ und $Q < 0$.

6. Drehstrom (22 Punkte)

Aufgaben:

- DS1) Geben Sie bei allen Teilaufgaben einen Ansatz mit entsprechenden Indizes an, setzen Sie auch in Zwischenschritten Zahlenwerte ein und verwenden Sie die richtigen Einheiten und gegebenenfalls Unterstriche. *Diese Teilaufgabe erfordert keine Bearbeitung.* 4 P
- DS2) Zeichnen Sie an das unten gegebene symmetrische Drehstromnetz eine symmetrische ohmsche Last in Dreieckschaltung. Zeichnen Sie auch alle an der Last auftretenden Ströme und Spannungen ein und benennen Sie diese sinnvoll. 5 P

L1 ○ —————

L2 ○ —————

L3 ○ —————

N ○ —————

- DS3) Bei einer symmetrischen Last in Dreieckschaltung werden folgende Spannung und Ströme gemessen: 4 P

$$\underline{U}_{12} = 400 \text{ V} \cdot e^{j30^\circ}$$

$$\underline{I}_{12} = 1,2 \text{ A} \cdot e^{j0^\circ}$$

Berechnen Sie die Leistungen P_{ges} , Q_{ges} und S_{ges} sowie den Wirkfaktor $\cos \varphi$.

Gegeben ist ein Drehstromnetz mit $\underline{U}_{1N} = 230 \text{ V} \cdot e^{j0^\circ}$ und $f = 50 \text{ Hz}$. In einer angeschlossenen symmetrischen Last in Sternschaltung werden $P_{\text{ges}} = 1000 \text{ W}$ und $Q_{\text{ges}} = 300 \text{ VA}$ umgesetzt.

- DS4) Die induktive Blindleistung soll mit parallel geschalteten Kondensatoren kompensiert werden. Bestimmen Sie die notwendige Kapazität je Kondensator. 4 P

- DS5) Die symmetrische Last wird gegen eine unsymmetrische Last in Sternschaltung mit N-Leiter ausgetauscht Die Last setzt sich aus folgenden Impedanzen zusammen: 5 P

$$\underline{Z}_1 = 50 \Omega \cdot e^{j50^\circ}$$

$$\underline{Z}_2 = 150 \Omega \cdot e^{j30^\circ}$$

$$\underline{Z}_3 = 100 \Omega \cdot e^{j40^\circ}$$

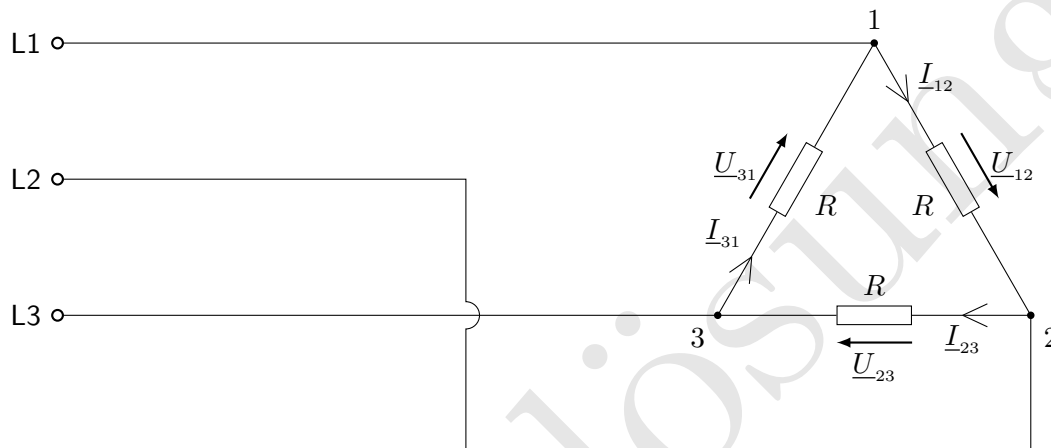
Berechnen Sie alle auftretenden Ströme nach Betrag und Phase.

Lösung

DS1) Formale Bewertung:

Es wurden alle Einheiten und gegebenenfalls Unterstriche richtig verwendet und in allen Zwischenschritten Zahlenwerte eingesetzt.

DS2) symmetrische Belastung zeichnen



DS3) Leistungen in symmetrischer Dreieckschaltung

- Wirkfaktor

$$\cos \varphi = \cos(\varphi_U - \varphi_I) = \cos(30^\circ - 0^\circ) = 0.866$$

- Leistungen

$$\begin{aligned} P_{\text{ges}} &= \sqrt{3} \cdot U_{\text{LL}} \cdot I_L \cdot \cos \varphi = 3 \cdot U_{\text{LL}} \cdot I_{\text{LL}} \cdot \cos \varphi \\ &= 3 \cdot 400 \text{ V} \cdot 1,2 \text{ A} \cdot 0,866 = 1247,1 \text{ W} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Q_{\text{ges}} &= \sqrt{3} \cdot U_{\text{LL}} \cdot I_L \cdot \sin \varphi = 3 \cdot U_{\text{LL}} \cdot I_{\text{LL}} \cdot \sin \varphi \\ &= 3 \cdot 400 \text{ V} \cdot 1,2 \text{ A} \cdot \sin(30^\circ - 0^\circ) = 720 \text{ var} \end{aligned}$$

$$S_{\text{ges}} = \sqrt{P_{\text{ges}}^2 + Q_{\text{ges}}^2} = \sqrt{(1247,1 \text{ W})^2 + (720 \text{ var})^2} = 1440 \text{ V A}$$

DS4) Kompensation auslegen

- Blindleistung je Strang

$$\begin{aligned} Q_{\text{Strang}} &= \frac{Q_{\text{ges}}}{3} = \frac{300 \text{ var}}{3} = 100 \text{ var} \\ \Rightarrow Q_C &= -100 \text{ var} \end{aligned}$$

- notwendige Kapazitäten

$$Q_C = \frac{U_{12}^2}{X_C} = -U_{12}^2 \cdot \omega \cdot C \quad \text{mit} \quad X_C = -\frac{1}{\omega \cdot C}$$

$$\Rightarrow C = -\frac{Q_C}{U_{12}^2 \cdot 2\pi f} = -\frac{-100 \text{ var}}{(230 \text{ V})^2 \cdot 2\pi \cdot 50 \text{ Hz}} = 6 \mu\text{F}$$

DS5) unsymmetrische Sternschaltung mit N-Leiter

- Leiter-Neutralleiter-Ströme

$$\underline{I}_{1N} = \frac{U_{1N}}{Z_1} = \frac{230 \text{ V} \cdot e^{j0^\circ}}{50 \Omega \cdot e^{j50^\circ}} = 4,6 \text{ A} \cdot e^{-j50^\circ} = 2,9 \text{ A} - j 3,5 \text{ A}$$

$$\underline{I}_{2N} = \frac{U_{2N}}{Z_2} = \frac{230 \text{ V} \cdot e^{j-120^\circ}}{150 \Omega \cdot e^{j30^\circ}} = 1,5 \text{ A} \cdot e^{-j150^\circ} = -1,3 \text{ A} - j 0,8 \text{ A}$$

$$\underline{I}_{3N} = \frac{U_{3N}}{Z_3} = \frac{230 \text{ V} \cdot e^{j120^\circ}}{100 \Omega \cdot e^{j40^\circ}} = 2,3 \text{ A} \cdot e^{j80^\circ} = 0,4 \text{ A} + j 2,3 \text{ A}$$

- Neutralleiterstrom über Knotenpunkt

$$\begin{aligned} \underline{I}_N &= \underline{I}_{1N} + \underline{I}_{2N} + \underline{I}_{3N} \\ &= 3,0 \text{ A} - j 3,5 \text{ A} + 0,4 \text{ A} + j 2,3 \text{ A} - 1,3 \text{ A} - j 0,8 \text{ A} = 2,1 \text{ A} - j 2 \text{ A} = 2,9 \text{ A} \cdot e^{-j44^\circ} \end{aligned}$$

7. Transformator (22 Punkte)

Für ein Netzteil soll ein einphasiger Transformator ausgelegt werden, der die Primärspannung $U_{1N} = 230 \text{ V}$ auf $U_{2N} = 11,5 \text{ V}$ und $I_{2N} = 10 \text{ A}$ bei $f_N = 50 \text{ Hz}$ heruntersetzt. Anschließend wird diese gleichgerichtet. Aufgrund der maximalen Baugröße kann der Eisenkern nur 10 cm hoch und 10 cm breit gebaut werden. Auf der Sekundärseite wird eine Spule mit $N_2 = 250$ Windungen und einem mittleren Windungsdurchmesser von $d_w = 3 \text{ cm}$ verwendet.

Aufgaben:

- TR1) Geben Sie bei allen Teilaufgaben einen Ansatz mit entsprechenden Indizes an, setzen Sie auch in Zwischenschritten Zahlenwerte ein und verwenden Sie die richtigen Einheiten und gegebenenfalls Unterstriche. *Diese Teilaufgabe erfordert keine Bearbeitung.* 4 P
- TR2) Berechnen Sie unter der Annahme eines idealen Transformators das benötigte Übersetzungsverhältnis \ddot{u} , die primäre Windungszahl N_1 , den Primärnennstrom I_N sowie die zu übertragende Scheinleistung S_N . 4 P
- TR3) Bestimmen Sie den notwendigen Eisenquerschnitt A_{Fe} , damit die zulässige magnetische Induktion von $\hat{B} = 0,5 \text{ T}$ nicht überschritten wird. 2 P
- TR4) Bestimmen Sie den auf der Sekundärseite notwendigen Leiterquerschnitt A_{Cu2} , den sekundären Wicklungswiderstand R_2 (bei 20°C , $\rho_{Cu,20} = 0,0172 \Omega \text{ mm}^2 \text{ m}^{-1}$) sowie den gesamten Wicklungswiderstand $R = R_1 + R'_2$, wenn die maximal zulässige Stromdichte der Wicklungen $S_{\text{max}} = 2 \text{ A/mm}^2$ beträgt. 4 P
- TR5) Beim Leerlaufversuch des Transformators wurden folgende Daten gemessen: 5 P

$$P_0 = 14 \text{ W} \qquad I_0 = 100 \text{ mA}$$

Berechnen Sie den Eisenverlustwiderstand R_{Fe} und die Hauptfeldinduktivität L_h

- TR6) Das Netzteil wird nun an ein Netz mit folgenden Daten angeschlossen: 3 P

$$U_1 = 180 \text{ V} \qquad f_1 = 0 \text{ Hz}$$

An die Sekundärseite wird ein Verbraucher mit $R_{\text{Last}} = 50 \Omega$ angeschlossen. Wie groß ist die am Lastwiderstand umgesetzte Wirkleistung P_{Last} im eingeschwungenen Zustand? Begründen Sie Ihre Antwort kurz.

Lösung

TR1) Formale Bewertung: Es wurden alle Einheiten und gegebenenfalls Unterstriche richtig verwendet und in allen Zwischenschritten Zahlenwerte eingesetzt.

TR2) Übersetzungsverhältnis, Nennstrom und Scheinleistung

$$\begin{aligned}\ddot{u} &= \frac{U_{1N}}{U_{2N}} = \frac{230 \text{ V}}{11,5 \text{ V}} = 20 \\ N_1 &= N_2 \cdot \ddot{u} = 250 \text{ Wdg.} \cdot 20 = 5000 \text{ Wdg.} \\ I_{1N} &= \frac{1}{\ddot{u}} \cdot I_{2N} = \frac{1}{20} \cdot 10 \text{ A} = 0,5 \text{ A} \\ S_N &= U_{2N} \cdot I_{2N} = 11,5 \text{ V} \cdot 10 \text{ A} = 115 \text{ VA}\end{aligned}$$

TR3) Eisenquerschnitt

$$\begin{aligned}U_1 &= \frac{\hat{U}_1}{\sqrt{2}} = N_1 \cdot \frac{\hat{\Phi}_1}{\sqrt{2}} \cdot 2\pi \cdot f = \sqrt{2} \cdot \pi \cdot f \cdot N_1 \cdot \hat{\Phi}_1 \\ \text{mit } \Phi &= \int B dA \Rightarrow \hat{\Phi} = \hat{B} \cdot A \\ U_1 &= 4,44 \cdot f \cdot N_1 \cdot \hat{B} \cdot A_{\text{Fe}} \\ A_{\text{Fe}} &= \frac{U_1}{4,44 \cdot f \cdot N_1 \cdot \hat{B}} = \frac{230 \text{ V}}{4,44 \cdot 50 \text{ Hz} \cdot 5000 \text{ Wdg.} \cdot 0,5 \text{ T}} = 4,14 \text{ cm}^2\end{aligned}$$

TR4) Wicklungsquerschnitt und -widerstand auf der Sekundärseite

$$\begin{aligned}A_{\text{Cu}2} &= \frac{I_{2N}}{S_{\text{max}}} = \frac{10 \text{ A}}{2 \text{ A/mm}^2} = 5 \text{ mm}^2 \\ l_2 &= 2\pi \cdot r_2 \cdot N_2 = \pi \cdot d_w \cdot N_2 = \pi \cdot 3 \text{ cm} \cdot 250 \text{ Wdg.} = 23,6 \text{ m} \\ R_2 &= \rho_{\text{Cu},20} \cdot \frac{l_2}{A_{\text{Cu}2}} = 0,0172 \Omega \text{ mm}^2/\text{m} \cdot \frac{23,6 \text{ m}}{5 \text{ mm}^2} = 0,081 \Omega \\ R &= R_1 + R'_2 \approx 2 \cdot R'_2 = 2 \cdot R_2 \cdot \ddot{u}^2 = 2 \cdot 0,081 \Omega \cdot 20^2 = 64,8 \Omega\end{aligned}$$

TR5) Eisenverluste und Hauptinduktivität

$$\begin{aligned}P_0 &= \frac{U_{1N}^2}{R_{\text{Fe}}} \Rightarrow R_{\text{Fe}} = \frac{U_{1N}^2}{P_0} = \frac{230 \text{ V}^2}{14 \text{ W}} = 3778,6 \Omega \\ I_{\text{Fe}} &= \frac{U_{1N}}{R_{\text{Fe}}} = \frac{230 \text{ V}}{3778,6 \Omega} = 60,9 \text{ mA} \\ I_\mu &= \sqrt{I_0^2 - I_{\text{Fe}}^2} = \sqrt{100 \text{ mA}^2 - 60,9 \text{ mA}^2} = 79,3 \text{ mA} \\ X_h &= \frac{U_{1N}}{I_\mu} = \frac{230 \text{ V}}{79,3 \text{ mA}} = 2899,8 \Omega \\ L_h &= \frac{X_h}{2\pi \cdot f} = \frac{2899,8 \Omega}{2\pi \cdot 50 \text{ Hz}} = 9,23 \text{ H}\end{aligned}$$

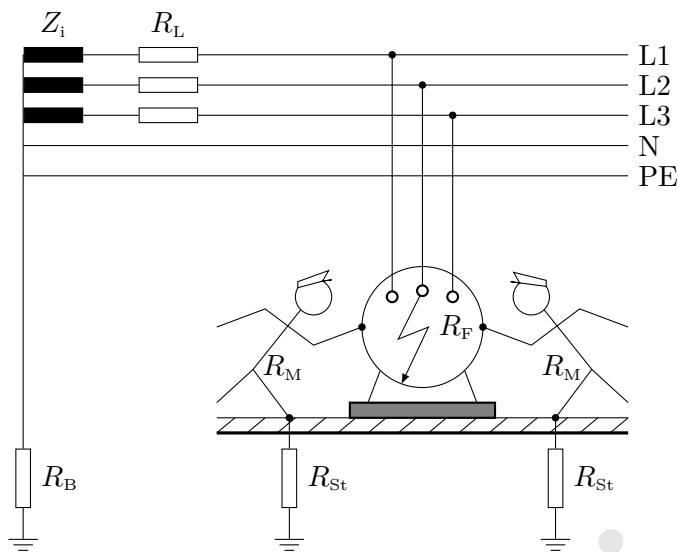
TR6) Wirkleistung am Lastwiderstand

Im eingeschwungenen Zustand wird die Hauptreaktanz $X_h(f = 0 \text{ Hz}) = 0 \Omega$, sodass der ge-

samte Gleichstrom hierüber fließt (Kurzschluss). Somit wird sekundärseitig keine Spannung induziert, der resultierende sekundärseitige Strom sowie die am Lastwiderstand umgesetzte Leistung wird null.

Musterlösung

8. Schutzmaßnahmen (22 Punkte)



$$U = 230 \text{ V}$$

$$f = 50 \text{ Hz}$$

$$R_L = 5 \Omega$$

$$R_F = 10 \Omega$$

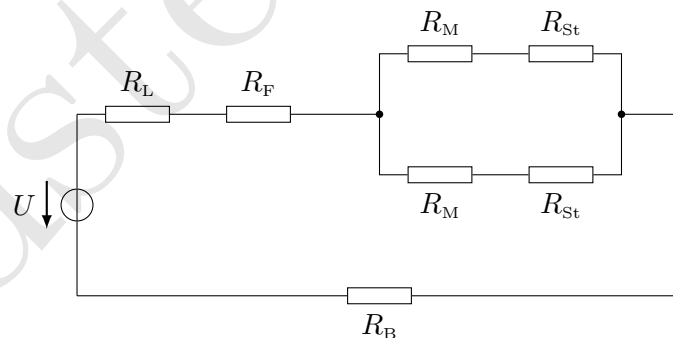
$$R_M = 3000 \Omega$$

$$R_{St} = 2500 \Omega$$

$$R_B = 4 \Omega$$

Aufgaben:

- SM1) Geben Sie bei allen Teilaufgaben einen Ansatz mit entsprechenden Indizes an, setzen Sie auch in Zwischenschritten Zahlenwerte ein und verwenden Sie die richtigen Einheiten und gegebenenfalls Unterstriche. *Diese Teilaufgabe erfordert keine Bearbeitung.* 4 P
- SM2) Tragen Sie den Fehlerstrom und die Berührspannung in das gegebene Ersatzschaltbild ein. 1 P



- SM3) Berechnen Sie den Gesamtwiderstand R_{ges} , den Fehlerstrom I_F und die Berührspannung U_B und geben Sie an, ob die Personen gefährdet sind. Begründen Sie Ihre Antwort. 7 P

Als Schutzmaßnahme soll die Maschine in einem TN-S-Netz an den Schutzleiter mit dem Widerstand R_{PE} angeschlossen werden, sodass **eine** Person im Fehlerfall geschützt wird.

- SM4) Zeichnen Sie das für diesen Fall gültige Ersatzschaltbild und bestimmen Sie den maximal zulässigen Widerstand des Schutzleiters R_{PE} . 6 P

Zuvor wurde R_{PE} mit 5Ω so ausgelegt, dass **eine** Person im Fehlerfall bei einem Fehlerstrom von $11,5 \text{ A}$ geschützt ist.

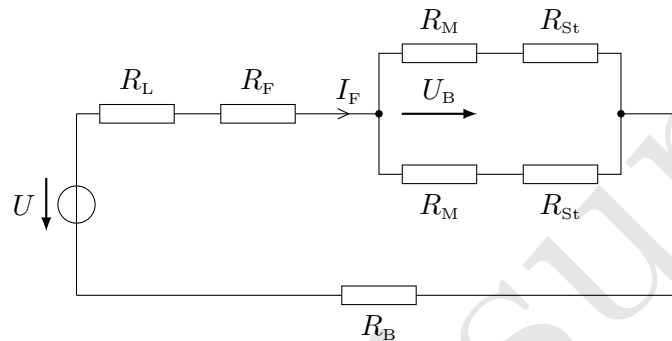
- SM5) Muss R_{PE} angepasst werden, damit auch **zwei** Personen wie oben dargestellt im Fehlerfall geschützt werden? Wenn ja, muss R_{PE} größer oder kleiner gewählt werden? Begründen Sie Ihre Antwort mit einer Rechnung. 4 P

Lösung

SM1) Formale Bewertung:

Es wurden alle Einheiten und gegebenenfalls Unterstriche richtig verwendet und in allen Zwischenschritten Zahlenwerte eingesetzt.

SM2) Fehlerstrom und Berührspannung einzeichnen



SM3) Berechnung Gesamtwiderstand, Fehlerstrom und Berührspannung

- Ersatzwiderstand

$$R_{\text{Ersatz}} = (R_M + R_{St}) \parallel (R_M + R_{St}) = \frac{(3000 \Omega + 2500 \Omega)^2}{2 \cdot (3000 \Omega + 2500 \Omega)} = 2750 \Omega$$

- Gesamtwiderstand

$$\begin{aligned} R_{\text{ges}} &= R_L + R_F + (R_M + R_{St}) \parallel (R_M + R_{St}) + R_B \\ &= R_L + R_F + R_{\text{Ersatz}} + R_B \\ &= 5 \Omega + 10 \Omega + 2750 \Omega + 4 \Omega \\ &= 2769 \Omega \end{aligned}$$

- Fehlerstrom

$$I_F = \frac{U}{R_{\text{ges}}} = \frac{230 \text{ V}}{2769 \Omega} = 83 \text{ mA}$$

- Stromteiler

$$I_{M1} = \frac{(R_M + R_{St}) \parallel (R_M + R_{St})}{R_M + R_{St}} \cdot I_F = \frac{2750 \Omega}{3000 \Omega + 2500 \Omega} \cdot 83 \text{ mA} = 41,5 \text{ mA}$$

- Berührspannung

$$U_B = I_{M1} \cdot R_M = 41,5 \text{ mA} \cdot 3000 \Omega = 124,5 \text{ V}$$

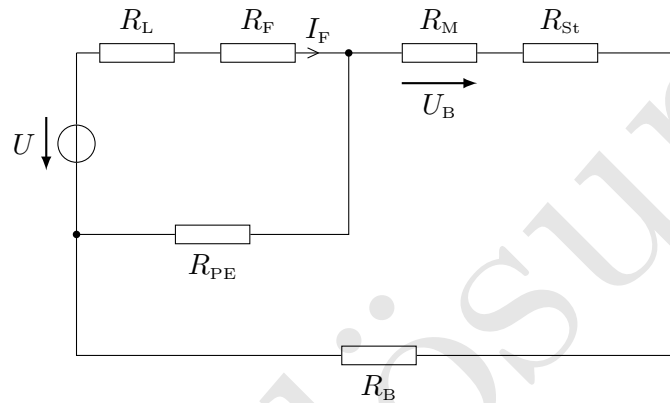
Der Mensch ist gefährdet, da

$$I_M = \frac{I_F}{2} > 17 \text{ mA}$$

oder

$$U_B > 50 \text{ V}$$

SM4) Anschließen an Schutzleiter



- Bedingung

$$I_M \leq 17 \text{ mA} \quad \text{und} \quad U_B \leq 50 \text{ V}$$

- Masche über R_M , R_{St} , R_B und R_{PE}

$$\begin{aligned} U_{PE} &= U_B + U_{R_{St}} + U_{R_B} = U_B + I_M \cdot (R_{St} + R_B) \\ &= 50 \text{ V} + 17 \text{ mA} \cdot (2500 \Omega + 4 \Omega) = 92,6 \text{ V} \end{aligned}$$

- Masche über U , R_L , R_F und R_{PE}

$$\begin{aligned} U_{PE} &= U - U_{R_L} - U_{R_F} = U - I_F \cdot (R_L + R_F) \\ \Rightarrow I_F &= \frac{U - U_{PE}}{R_L + R_F} = \frac{230 \text{ V} - 92,6 \text{ V}}{5 \Omega + 10 \Omega} = 9,16 \text{ A} \end{aligned}$$

- Knotenpunkt für I_{PE} und Bestimmung R_{PE}

$$\begin{aligned} I_{PE} &= I_F - I_M = 9,16 \text{ A} - 17 \text{ mA} = 9,14 \text{ A} \\ R_{PE} &= \frac{U_{PE}}{I_{PE}} = \frac{92,6 \text{ V}}{9,14 \text{ A}} = 10,1 \Omega \end{aligned}$$

SM5) Anpassung R_{PE} für zwei Personen

- Gesamtwiderstand

$$\begin{aligned}
 R_{\text{ges}} &= R_L + R_F + \frac{(R_M + R_{\text{St}}) \parallel ((R_M + R_{\text{St}}) + R_B) \cdot R_{\text{PE}}}{(R_M + R_{\text{St}}) \parallel ((R_M + R_{\text{St}}) + R_B) + R_{\text{PE}}} \\
 &= 5 \Omega + 10 \Omega + \frac{(2750 \Omega + 4 \Omega) \cdot 5 \Omega}{2750 \Omega + 4 \Omega + 5 \Omega} = 20 \Omega
 \end{aligned}$$

- Fehlerstrom

$$I_F = \frac{U}{R_{\text{ges}}} = \frac{230 \text{ V}}{20 \Omega} = 11,5 \text{ A}$$

- Stromteiler für Strom über Menschen

$$\begin{aligned}
 I_{\text{M1}} &= I_F \cdot \frac{R_{\text{PE}}}{(R_M + R_{\text{St}}) \parallel ((R_M + R_{\text{St}}) + R_B) + R_{\text{PE}}} \cdot \frac{(R_M + R_{\text{St}}) \parallel (R_M + R_{\text{St}})}{R_M + R_{\text{St}}} \\
 &= 11,5 \text{ A} \cdot \frac{5 \Omega}{2750 \Omega + 4 \Omega + 5 \Omega} \cdot \frac{2750 \Omega}{3000 \Omega + 2500 \Omega} = 10 \text{ mA}
 \end{aligned}$$

R_{PE} muss nicht angepasst werden, um zwei Personen zu schützen.

alternativ:

- Fehlerstrom teilt sich auf I_{PE} und $2 \cdot I_{\text{M}}$ auf.

$$\begin{aligned}
 2 \cdot I_{\text{M}} &= I_F \cdot \frac{R_{\text{PE}}}{(R_M + R_{\text{St}}) \parallel ((R_M + R_{\text{St}}) + R_B) + R_{\text{PE}}} \\
 &= 11,5 \text{ A} \cdot \frac{5 \Omega}{2750 \Omega + 4 \Omega + 5 \Omega} = 20,8 \text{ mA} \\
 \Rightarrow I_{\text{M}} &= 10,4 \text{ mA}
 \end{aligned}$$

R_{PE} muss nicht angepasst werden, um zwei Personen zu schützen.