

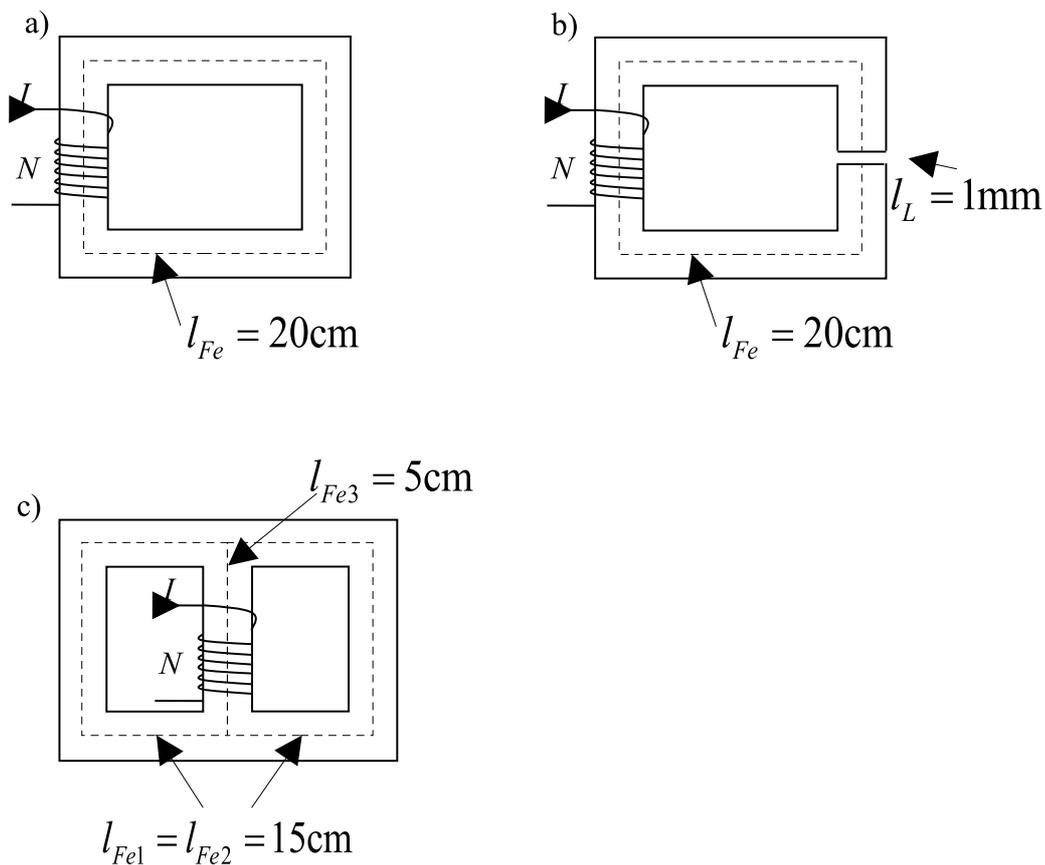
# Übung Grundlagen der Elektrotechnik B

## Themengebiet H: Magnetischer Kreis, Transformatoren

### Aufgabe 1: Magnetischer Kreis

Die gegebenen magnetischen Anordnungen tragen jeweils auf einem Schenkel des Eisenkerns eine Wicklung mit  $N = 50$  Windungen durch die ein Gleichstrom  $I = 10\text{ A}$  fließt. Für den Eisenkern gelte  $A_{\text{Fe}} = 2\text{ cm}^2$ ,  $\mu_{\text{rFe}} = 4000$ . (Der mittlere Eisenweg  $l_{\text{Fe}}$  und die Luftspatllänge  $l_L$  sind in den jeweiligen Anordnungen angegeben.)

1. Zeichnen Sie in die Anordnungen den Verlauf des magnetischen Flusses  $\phi$  ein.
2. Geben Sie für die magnetischen Kreise die elektrischen Ersatzschaltbilder an.
3. Berechnen Sie die magnetischen Widerstände (Reluktanzen), die sich ergebenen Flüsse  $\phi$ , die Feldstärke im Eisen  $h_{\text{Fe}}$  und in der Luft  $h_L$  und die Flussdichte im Eisen  $b_{\text{Fe}}$  und in der Luft  $b_L$ .



### Ergebnisse:

a)

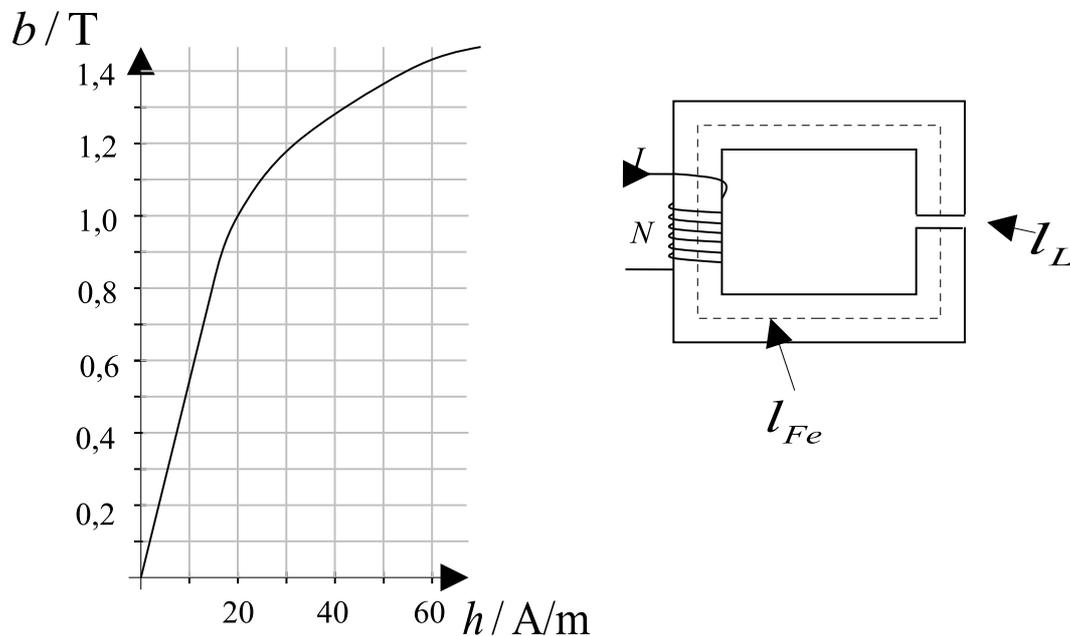
$$R_{Fe} = 199 \text{ kA/Vs}, \quad \phi = 2,51 \text{ mVs}, \quad b_{Fe} = 12,55 \text{ Vs/m}^2, \quad h_{Fe} = 2496,74 \text{ A/m}$$

b)

$$R_{Fe} = 199 \text{ kA/Vs}, \quad R_L = 3,98 \text{ MA/Vs}, \quad \phi = 0,12 \text{ mVs}, \\ b_{Fe} = b_L = 0,6 \text{ Vs/m}^2, \quad h_{Fe} = 119,37 \text{ A/m}, \quad h_L = 477 \text{ kA/m}$$

### Aufgabe 2: Magnetischer Kreis

Die gegebene magnetische Anordnung trage auf einem Schenkel des Eisenkerns eine Wicklung mit  $N = 350$  Windungen durch die ein Gleichstrom fließe. Für den Eisenkern gelte  $A_{Fe} = 16 \text{ cm}^2$ , mittlerer Eisenweg  $l_{Fe} = 40 \text{ cm}$ , Luftspaltlänge  $l_L = 0,5 \text{ mm}$ . Für das Material sei die folgende b,h-Beziehung gegeben:



Die Flussdichte im Eisenkern betrage  $b_{Fe} = 1,0 \text{ T}$ .  
Geben Sie

1. den Fluss  $\phi$  und den verketteten Fluss  $\psi$  an.
2. den notwendigen Strom  $I$  ohne Luftspalt an.
3. den notwendigen Strom  $I$  mit Luftspalt an.

### Lösung zu Aufgabe 2: Magnetischer Kreis

1.  $\phi = 1,6\text{mVs}$ ,  $\Psi = N\phi = 560\text{mVs}$
2. ohne Luftspalt:  $I = 22,86\text{mA}$
3. mit Luftspalt:  $I = 1,16\text{A}$

### Aufgabe 3: Blindleistungskompensation mit einer Drossel

Für eine Fabrikhalle sollen die Kosten zur Kompensation einer kapazitiven Blindleistung berechnet werden. Die kapazitive Blindleistung betrage  $Q = 1\text{ kVA}$ . Die Kompensation soll mit einer Drosselspule erfolgen. Die Netzspannung betrage  $U = 230\text{ V}$  ( $f = 50\text{ Hz}$ ). Für die verwendeten Materialien seien die folgenden Daten bekannt:

- maximale Flussdicht im Eisenkern  $\hat{b}_{\text{max}} = 1,4\text{ T}$
- maximale Stromdichte in Kupfer  $J_{\text{max}} = 10\text{ A/mm}^2$
- Füllfaktor  $k_{\text{Cu}} = 0,65$
- Dichte von Kupfer  $\rho_{\text{Cu}} = 8,93\text{ kg/dm}^3$
- Dichte von Eisen  $\rho_{\text{Fe}} = 7,87\text{ kg/dm}^3$
- Kilopreis Kupfer  $2,90\text{ €/kg}$
- Kilopreis Eisen  $0,90\text{ €/kg}$

Die Querschnittsfläche des Eisenkerns und die Fläche des Fensters für die Wicklung seien quadratisch und gleich groß  $A_{\text{Fe}} = A_{\text{W}}$ . Der ohmsche Widerstand der Wicklung sei vernachlässigbar.

Die Drossel werde zunächst aus hochpermeablem Kernmaterial ( $\mu_r \rightarrow \infty$ ) hergestellt.

- Berechnen Sie die benötigte Luftspalllänge  $l_{\text{L}}$ .

Die Drossel soll nun ohne Luftspalt gefertigt werden.

- Berechnen Sie die benötigte Permeabilität  $\mu_{\text{rFe}}$  des Kernmaterials.
- Schätzen Sie die Materialkosten der Drossel ab.

#### Ergebnisse:

$$l_{\text{L}} = \mu_0 A_{\text{Fe}} R_{\text{magn}} = 5,8\text{ mm}$$

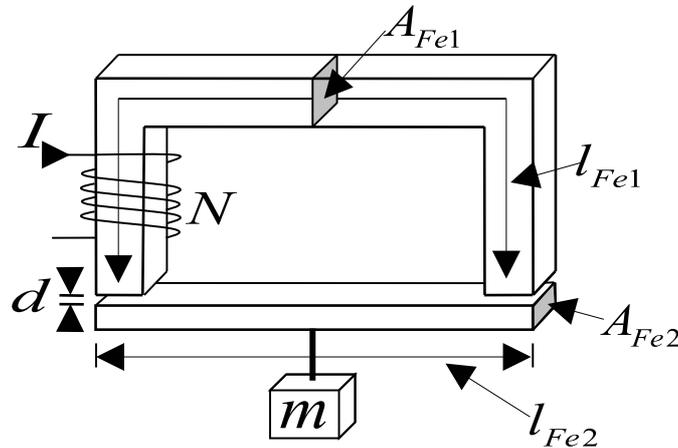
$$\mu_r = \frac{l_{\text{Fe}}}{\mu_0 A_{\text{Fe}} R_{\text{magn}}} = 36,53$$

$$\text{Kupferpreis: } 0,432\text{ kg} \cdot 2,90\text{ €/kg} = 1,25\text{ €}$$

$$\text{Eisenpreis: } 1,171\text{ kg} \cdot 0,90\text{ €/kg} = 1,05\text{ €}$$

## Aufgabe 4: Kraft und Energie im magnetischen Kreis

Eine magnetische Anordnung trage auf einem Schenkel des Eisenkerns eine Wicklung mit  $N = 50$  Windungen durch die ein Gleichstrom  $I = 10\text{A}$  fließe. An den Stoßstellen entstehe eine Fuge, die sich wie ein Luftspalt verhalte ( $d = 0,2\text{mm}$ ). Für den Eisenkern gelte ( $l_{\text{Fe}1} = 15\text{cm}$ ,  $l_{\text{Fe}2} = 7\text{cm}$ ,  $A_{\text{Fe}1} = 4\text{cm}^2$ ,  $A_{\text{Fe}2} = 2\text{cm}^2$  und  $\mu_{\text{rFe}} = 4000$ ).



1. Zeichnen Sie in die Skizze den Verlauf des magnetischen Flusses  $\phi$  ein.
2. Skizzieren Sie das elektrische Ersatzschaltbild des magnetischen Kreises.
3. Berechnen Sie die magnetische Flussdichte  $b_L$  und den magnetischen Fluss  $\phi_L$  im Luftspalt.
4. Stellen Sie den magnetischen Fluss  $\phi_L$  in Abhängigkeit der Luftspalllänge  $d$  graphisch dar.
5. Berechnen Sie die magnetische Energie im Eisen und im Luftspalt.
6. Welche Masse  $m$  kann die Anordnung tragen?

### Ergebnisse:

3.  $\phi_L = \phi = 0,532\text{mVs}$     $b_L = 1,33\text{T}$
4.  $\phi(d) = \frac{\mu_0 A_{\text{Fe}} \cdot N \cdot i}{\mu_0 A_{\text{Fe}} R_{\text{Fe}} + 2d}$
5.  $W_L = 112,62\text{mJ}$ ,    $W_{\text{Fe}} = 20,41\text{mJ}$
6.  $m = \frac{F}{g} = 57,4\text{kg}$

## Aufgabe 5: Idealer Transformator

Gegeben sei ein idealer 5kVA Einphasentransformator 230V/110V ( $f = 50\text{Hz}$ )

1. Geben Sie das Übersetzungsverhältnis an
2. Der Transformator werde mit Nennleistung betrieben. Berechnen Sie den Primär- und Sekundärstrom.

3. Der Transformator gebe bei Nennspannung auf der Sekundärseite eine Leistung von  $P_2 = 3,2 \text{ kW}$  bei einem Leistungsfaktor von  $\cos \varphi = 0,8$  (induktiv) ab. Berechnen Sie den Primär- und Sekundärstrom.

**Ergebnisse:**

1.  $\alpha = 2,1$
2.  $I_{1N} = 21,74 \text{ A}$   $I_{2N} = 45,45 \text{ A}$
3.  $I_2 = 36,36 \text{ A}$   $I_1 = 17,31 \text{ A}$

**Aufgabe 6: Idealer Transformator**

Man benötigt beim elektrischen Schweißen auf der Sekundärseite eines Transformators bei einer Spannung von  $25,3 \text{ V}$  einen Strom von  $500 \text{ A}$ . Die Primärseite des Transformators sei an das  $230 \text{ V}$ -Netz angeschlossen und als verlustfrei anzunehmen.

1. Welcher Strom fließt auf der Primärseite des Transformators?
2. Ist es sinnvoll, als Schweißtransformator einen idealen Transformator anzustreben?

**Ergebnisse:**

1.  $I_1 = 55 \text{ A}$
2. Idealer Transformator ist nicht anzustreben, wegen des Kurzschlusses der Sekundärseite

**Aufgabe 7: Verlust und Streufreier Transformator**

Gegeben sei ein idealer Transformator mit einer primärseitigen Nennspannung von  $U_{1N} = 2300 \text{ V}$  ( $f = 50 \text{ Hz}$ ) und einer sekundärseitigen Nennspannung  $U_{2N} = 230 \text{ V}$ . Die Windungszahl der Primärseite sei  $N_1 = 4800$ .

1. Berechnen Sie den Hauptfluss  $\phi_m(t)$ .
2. Berechnen Sie die benötigte Windungszahl  $N_2$  der Primärseite.

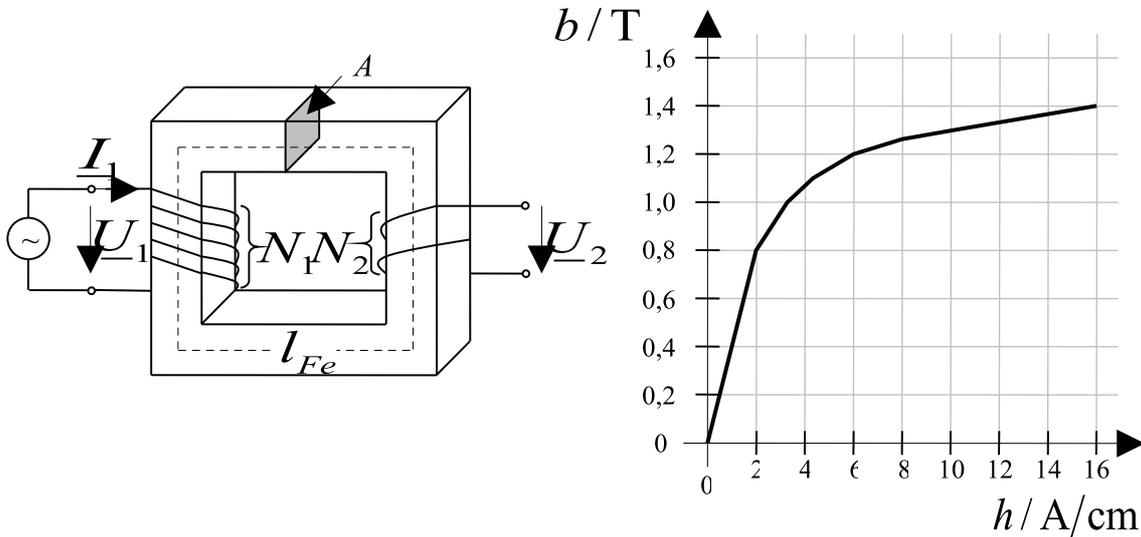
**Ergebnisse:**

1.  $\phi_m(t) = -2,16 \cdot 10^{-3} \text{ Vs} \cdot \cos(314,16 \text{ ts}^{-1})$
2.  $N_2 = 480$

Bemerkung: Hier ist ein sonst idealer Transformator, jedoch ohne Vernachlässigung der Hauptinduktivität gemeint, da es ohne Hauptinduktivität natürlich auch keinen Hauptfluss gibt.

## Aufgabe 8: Magnetisierungsstrom

Der abgebildete Transformator soll die Spannung  $U_1 = 230\text{ V}$  ( $f = 50\text{ Hz}$ ) auf  $U_2 = 48\text{ V}$  herabsetzen. Der Eisenquerschnitt des verwendeten Materials betrage  $A_{\text{Fe}} = 6\text{ cm}^2$ , der mittlere Umfang  $l_{\text{Fe}} = 30\text{ cm}$ . Von dem Eisen sei die unten dargestellte Magnetisierungskennlinie bekannt.



1. Welche Windungszahlen  $N_1$  und  $N_2$  sind vorzusehen, damit der Scheitelwert der magnetischen Flussdichte im Kern  $\hat{b} = 0,8\text{ T}$  beträgt? (Für die Berechnung können die Wicklungen als magnetisch ideal gekoppelt angenommen und die Wicklungswiderstände vernachlässigt werden.)
2. Welchen Magnetisierungsstrom  $I_\mu$  nimmt der Transformator im Leerlauf auf, wenn die Eisenverluste vernachlässigt werden? (Die sekundärseite sei unbelastet.)
3. Um welchen Faktor steigt der Scheitelwert  $\hat{I}_\mu$  des aufgenommenen Magnetisierungsstromes, wenn die anliegende Spannung bei unveränderter Frequenz von  $U_1 = 230\text{ V}$  auf  $U_1 = 400\text{ V}$  erhöht wird?

### Ergebnisse:

1.  $N_1 = 2157, \quad N_2 = 451$
2.  $I_\mu = \frac{\hat{I}_\mu}{\sqrt{2}} = 19,67\text{ mA}$
3.  $\frac{\hat{I}_\mu}{I_\mu} = \frac{222,53\text{ mA}}{27,82\text{ mA}} = 8$

## Aufgabe 9: T-Ersatzschaltung

Der in Abbildung 1 angegebene Transformator soll durch die äquivalente Schaltung in Abbildung 2 mit ungekoppelten Spulen und einem idealen Transformator ersetzt werden. Geben seien die Werte  $L_{11}, L_{22}$

und  $L_m$ .

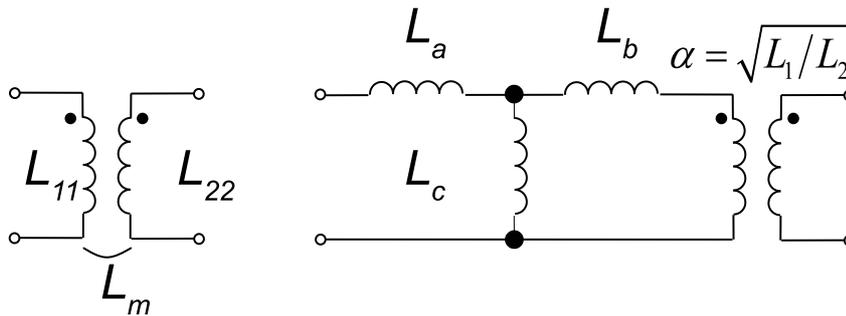


Abbildung 1

Abbildung 2

Berechnen Sie  $L_a$ ,  $L_b$  und  $L_c$ .

**Ergebnisse:**

### Aufgabe 10: Einschaltstromstoss

Gegeben sei ein leerlaufender Einphasentransformator. Zum Zeitpunkt  $t = 0\text{s}$  wird die Spannung  $u_n = \hat{U}_n \sin(\omega t + \alpha)$  zu geschaltet. Remanenz und Eisenverluste können vernachlässigt werden. Die Selbstinduktivität  $L_{11}$ , der Widerstand  $R_1$  und die Windungszahl  $N_1$  seien gegeben.

1. Berechnen Sie den zeitlichen Verlauf des Einschaltstroms  $i_1(t)$  und des Flusses  $\phi(t)$ .
2. Es sei  $R_1 \ll \omega L_{11}$ . Interpretieren Sie das Ergebnis für  $\phi(t)$ , wenn im Spannungsnulldurchgang ( $\alpha = 0$ ) geschaltet wird.

**Ergebnisse:**

1.  $i(t) = \frac{k}{\omega^2 \tau + \frac{1}{\omega}} \left[ [\cos(\alpha)\omega\tau - \sin(\alpha)]e^{-t/\tau} \sin(\alpha) [\cos(\omega t) + \omega\tau \sin(\omega t)] + \cos(\alpha) [-\omega\tau \cos(\omega t) + \sin(\omega t)] \right]$  mit  $\tau = \frac{L_{11}}{R_1}$  und  $k = \frac{1}{L_{11}} \cdot \hat{U}_1$
2.  $\Phi(t) = L_{11} \cdot i(t)$   
 $i(t) \approx \frac{\hat{U}_1}{L_{11}} \cdot \frac{1}{\omega} [e^{-t/\tau} - \cos(\omega t)]$

### Aufgabe 11: Kurzschluss-/Leerlaufversuch

Gegeben sei ein 6MVA-Einphasentransformator 5kV/100kV ( $f = 50\text{Hz}$ ) mit folgenden Daten:

- wirksamer Kernquerschnitt  $A_{Fe} = 0,187\text{m}^2$
- Scheitelwert der Flussdichte  $\hat{b} = 1,5\text{T}$

Im Leerlauf werde an  $U_{1N} = 5\text{kV}$  die Leerlaufleistung  $P_0 = 8,8\text{kW}$  aufgenommen, dabei fließe der Leerlaufstrom  $I_0 = 2,6\text{A}$ .

1. Berechnen Sie die Nennströme und das Übersetzungsverhältnis.

2. Berechnen Sie die primäre und die sekundäre Windungszahl.
3. Geben Sie die Eisenverluste und die Daten für die Leerlaufersatzschaltung an. Welche Werte haben Magnetisierungsstrom und Eisenverluststrom?

### Ergebnisse:

1.  $I_{1N} = 1200 \text{ A}$ ,  $I_{2N} = 60 \text{ A}$ ,  $\alpha = 0,05$
2.  $N_1 = 80$ ,  $N_2 = 1605$
3.  $S_0 = 13 \text{ kVA}$ ,  $R_{Fe} = 2841 \Omega$ ,  $I_{Fe} = 1,76 \text{ A}$ ,  $L'_m = 8,32 \text{ H}$ ,  $I_\mu = 1,91 \text{ A}$

## Aufgabe 12: Lufttransformator

An einem Lufttransformator seien zur Bestimmung der ohmschen Wicklungswiderstände  $R_1$  und  $R_2$ , der Wicklungsinduktivitäten  $L_{11}$  und  $L_{22}$  sowie der Hauptinduktivitäten  $L_m$  die folgenden Messwerte aufgenommen worden.

Leerlaufversuche:

Offener Sekundärkreis:

Bei offenem Sekundärkreis nehme die Primärwicklung bei der Spannung  $U_1 = 100 \text{ V}$ ,  $f = 50 \text{ Hz}$  den Strom  $I_1 = 1,5 \text{ A}$  und die Wirkleistung  $P_1 = 22,5 \text{ W}$  auf.

Offener Primärkreis:

Bei offenem Primärkreis nehme die Sekundärwicklung bei der Spannung  $U_2 = 100 \text{ V}$ ,  $f = 50 \text{ Hz}$  der Strom  $I_2 = 3 \text{ A}$  und die Wirkleistung  $P_2 = 45 \text{ W}$  auf.

Werden beide Wicklungen gegensinnig in Reihe geschaltet, so fließe bei der Spannung  $U = 100 \text{ V}$ ,  $f = 50 \text{ Hz}$  der Strom  $I = 2,7 \text{ A}$ .

Wie groß sind  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $L_{11}$ ,  $L_{22}$  und  $L_m$ ?

### Ergebnisse:

$$R_1 = \frac{P_1}{I_1^2} = 10 \Omega \quad L_{11} = \frac{Q_1}{\omega I_1^2} \approx 209,8 \text{ mH} \quad R_2 = \frac{45 \text{ W}}{(3 \text{ A})^2} = 5 \Omega \quad L_{22} = \frac{Q_2}{\omega I_2^2} \approx 104,9 \text{ mH} \quad L_m = \frac{1}{2}(L_{11} + L_{22} - L') = 103,45 \text{ mH}$$