

## 21. Übungsblatt

---

### Aufgabe 1

a)

$$\begin{aligned}
 Z_{AB} &= Z_C + Z_{LR} \\
 &= \frac{i\omega C}{+ i\omega L + R} \\
 &= \frac{i\omega L + R + i\omega C(i\omega L R)}{i\omega C(i\omega L + R)} \\
 &= \frac{R - \omega^2 LCR + i\omega L}{i\omega CR - \omega^2 LC}
 \end{aligned}$$

Für die reelle Impedanz:

$$\begin{aligned}
 \text{Im}(Z_{AB}) &= \frac{\omega L(-\omega^2 LC) - (R - \omega^2 LCR) \cdot \omega CR}{(\omega CR)^2 + (\omega^2 LC)^2} \stackrel{!}{=} 0 \\
 \Rightarrow 0 &= \omega L(-\omega^2 LC) - (R - \omega^2 LCR) \cdot \omega CR \\
 &= -\omega^3 L^2 C - \omega CR^2 + \omega^3 LC^2 R^2 \\
 \Rightarrow 0 &= -\omega^2 L^2 C - CR^2 + \omega^2 LC^2 R^2 \\
 \Leftrightarrow CR^2 &= -\omega^2 L^2 C + \omega^2 LC^2 R^2 \\
 \Rightarrow \omega^2 &= \frac{CR^2}{L^2 C^2 R^2 - L^2 C} \\
 \Rightarrow \omega &= \sqrt{\frac{R^2}{L^2 CR^2 - L^2}}
 \end{aligned}$$

b) Die an der LCR-Schaltung abfallende Spannung  $U_{AB}$  ist bestimmt durch

$$U_{AB} = \frac{Z_{AB}}{R_i + Z_{AB}} U_0$$

Dann lautet die elektrische Leistung der LCR-Schaltung:

$$\begin{aligned}
 P &= \frac{\Delta U^2}{Z_{AB}} \\
 &= \frac{Z_{AB}^2}{(R_i + Z_{AB})^2} \frac{1}{Z_{AB}} U_0^2 \\
 &= \frac{Z_{AB}}{(R_i + Z_{AB})^2} U_0^2
 \end{aligned}$$

Diese wird maximal für

$$\begin{aligned}
 d_{Z_{AB}} P &= U \frac{(R_i + Z_{AB})^2 - Z_{AB} \cdot 2 \cdot (R_i + Z_{AB})}{(R_i + Z_{AB})^4} \stackrel{!}{=} 0 \\
 \Leftrightarrow 0 &= R_i + Z_{AB} - 2Z_{AB} \\
 \Rightarrow Z_{AB} &= R_i
 \end{aligned}$$

c)

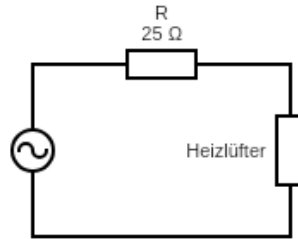
$$\begin{aligned}
R_i &= \frac{R - \omega^2 LCR + i\omega L}{i\omega CR - \omega^2 LC} \\
Z_{AB} \in \mathbb{R} &\Rightarrow = \frac{(R - \omega^2 LCR)(-\omega^2 LC) + \omega^2 LCR}{(\omega CR)^2 + (\omega^2 LC)^2} \\
&= \frac{\omega^4 L^2 C^2 R - \omega^2 LCR + \omega^2 LCR}{(\omega CR)^2 + (\omega^2 LC)^2} \\
&= \frac{\omega^4 L^2 C^2 R}{(\omega CR)^2 + (\omega^2 LC)^2} \\
&= \frac{\omega^2 L^2 R}{R^2 + \omega^2 L^2} \\
\Rightarrow 0 &= \frac{\omega^2 L^2 R}{R^2 + \omega^2 L^2} - R_i \\
\Leftrightarrow 0 &= \omega^2 L^2 R - R_i R^2 - R_i \omega^2 L^2 \\
\Leftrightarrow 0 &= R^2 - \frac{\omega^2 L^2}{R_i} R + \omega^2 L^2
\end{aligned}$$

Mit der pq-Formel erhalten wir eine Lösung:

$$R = \frac{\omega^2 L^2}{2R_i} \pm \sqrt{\left(\frac{\omega^2 L^2}{2R_i}\right)^2 - \omega^2 L^2}$$

## Aufgabe 2

a) Der Aufbau sieht entsprechend aus:



Für die Betriebsleistung muss ein Strom  $I$  fließen:

$$P_H = U_H \cdot I \Rightarrow I = \frac{P_H}{U_H} \approx 7.8261 \text{ A}$$

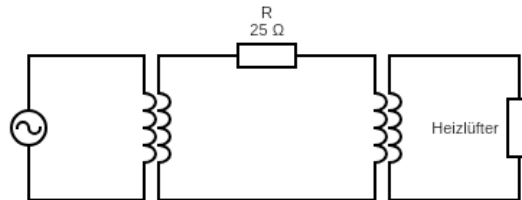
Da dieser Strom auch durch den Widerstand fließt, wird an diesem die Arbeit geleistet:

$$P_R = U_R \cdot I = R \cdot I^2 = 1531.2 \text{ W}$$

Gesamtleistung und Wirkungsgrad lauten somit

$$P_G = P_H + P_R = 3331.2 \text{ W} \Rightarrow \eta = \frac{P_H}{P_G} \approx 0.54$$

b) Mit den Transformatoren sieht der Aufbau wie folgt aus:



Aus dem Windungszahlverhältnis 9 : 1 folgt das Stromverhältnis

$$I_R : I_H = 1 : 9 \Rightarrow I_R = \frac{I_H}{9} \approx 0.87 \text{ A}$$

Damit muss am Widerstand die Leistung  $P'_R$  geleistet werden:

$$P'_R = R \cdot I_R^2 = 18.904 \text{ W}$$

Gesamtleistung und Wirkungsgrad lauten somit

$$P'_G = P_H + P'_R = 1818.9 \text{ W} \Rightarrow \eta' = \frac{P_H}{P'_G} \approx 0.99$$

### Aufgabe 3

a) Da die Leitung einen Widerstand besitzt, verrichtet der Strom an diesem Arbeit durch Aufheizen des Kabels.

$$P = U \cdot I = I^2 \cdot R$$

Dieser ist proportional zum Quadrat der Stromstärke  $I$ , d.h. diese sollte minimiert werden. Dafür muss die Spannung  $U$  angehoben werden.

b)

$$P = I^2 \cdot R = 500^2 \text{ A}^2 \cdot 0.2 \text{ k}\Omega = 5 \cdot 10^4 \text{ W}$$

### Aufgabe 4

a) Mit der 4. Maxwellgleichung wissen wir, dass

$$\oint_{\partial A} \vec{B} \cdot d\vec{s} = \mu_0(I + I_V)$$

und diese Gleichung auch für alle Flächen erfüllt sein muss.

Wenn wir als uns eine Fläche denken, wo der Leiter komplett durch die Fläche durchstößt, also kein Verschiebungsstrom existiert, so muss gelten:

$$\oint_{\partial A} \vec{B} \cdot d\vec{s} = \mu_0 I.$$

Genauso kann man aber auch eine Fläche wählen, die, am Leiter vorbei, durch den Raum des Kondensators verläuft. Durch diese Fläche fließt dann kein Strom, sondern nur ein Verschiebungsstrom. Da wir aber den Rand gleich lassen, können wir für  $I_V$  schreiben:

$$\oint_{\partial A} \vec{B} \cdot d\vec{s} = \mu_0 I = \mu_0 I_V \Rightarrow I_V = I = 2 \text{ A}$$

b) Das elektrische Feld des Plattenkondensators ist gegeben durch

$$E(t) = \frac{\sigma(t)}{\epsilon_0}$$

mit  $\sigma$  als Flächenladungsdichte  $\frac{Q}{A}$ .

Dann lautet die Ableitung des  $\vec{E}$ -Feldes nach der Zeit:

$$\begin{aligned} \partial_t E(t) &= \partial_t \frac{\sigma}{\epsilon_0} \\ &= \partial_t \frac{Q}{A \cdot \epsilon_0} \\ &= \frac{I}{A \cdot \epsilon_0} \\ &= \frac{2 \text{ A}}{\epsilon_0} \end{aligned}$$

c) Der Verschiebungsstrom  $\tilde{I}_V$ , der durch die Fläche  $A'$  fließt, lässt sich dann bestimmen:

$$\begin{aligned} \tilde{I}_V &= \epsilon_0 \partial_t \int_{A'} \vec{E} \cdot d\vec{A}' \quad \vec{E} \text{ homogen} \\ &= \epsilon_0 \partial_t E \cdot A' \\ &= \epsilon_0 A' \frac{I}{\epsilon_0 A} \\ &= \frac{A'}{A} I \\ &= \frac{I}{4} \end{aligned}$$

d) Aus der 4. Maxwell-Gleichung folgt dann das Magnetfeld am Rand der Fläche  $A'$ :

$$\oint_{A'} \vec{B} \cdot d\vec{s} = \mu_0(I + I_V) = \mu_0 I_V = \mu_0 \frac{I}{4}$$

## Aufgabe 5

a)

1. Mit Gaußschem Satz

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0} \Rightarrow \int_V \vec{\nabla} \cdot \vec{E} dV = \int_V \frac{\rho}{\epsilon_0} dV \Rightarrow \oint_{\partial V} \vec{E} d\vec{A} = \int_V \frac{\rho}{\epsilon_0} dV = \frac{q_{\text{enq}}}{\epsilon_0}$$

2. Ebenfalls mit Gaußschem Satz

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \Rightarrow \int_V \vec{\nabla} \cdot \vec{B} dV = 0 \Rightarrow \oint_{\partial V} \vec{B} d\vec{A} = 0$$

3. Mit Satz von Stokes

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\partial_t \vec{B} \Rightarrow \int_A \vec{\nabla} \times \vec{E} d\vec{A} = \int_A -\partial_t \vec{B} d\vec{A} \Rightarrow \oint_{\partial A} \vec{E} d\vec{r} = -\partial_t \int_A \vec{B} d\vec{A} = -\partial_t \phi$$

4. Mit Satz von Stokes

$$\vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu_0 \vec{j} + \mu_0 \epsilon_0 \partial_t \vec{E} \Rightarrow \int_A \vec{\nabla} \times \vec{B} \cdot d\vec{A} = \oint_{\partial A} \vec{B} \cdot d\vec{r} = \mu_0 \int_A \vec{j} \cdot d\vec{A} + \mu_0 \epsilon_0 \int_A \partial_t \vec{E} \cdot d\vec{A} = \mu_0 I_{\text{enq}} + \mu_0 \epsilon_0 \int_A \partial_t \vec{E} \cdot d\vec{A}$$

b) Aus der 4. Maxwell-Gleichung erhalten wir:

$$\begin{aligned} \vec{\nabla} \times \vec{B} &= \mu_0 \vec{j} + \mu_0 \epsilon_0 \partial_t \vec{E} \\ \Rightarrow \underbrace{\vec{\nabla} \cdot (\vec{\nabla} \times \vec{B})}_{=0} &= \mu_0 \vec{\nabla} \cdot \vec{j} + \mu_0 \epsilon_0 \vec{\nabla} \cdot (\partial_t \vec{E}) \\ \Rightarrow \vec{\nabla} \cdot \dot{\vec{E}} &= -\frac{\vec{\nabla} \cdot \vec{j}}{\epsilon_0} \end{aligned} \quad (5.1)$$

Ausgehend von (5.1) und der Kontinuitätsgleichung lässt sich dann zeigen:

$$\begin{aligned} \vec{\nabla} \cdot \vec{E}(t) &= \vec{\nabla} \cdot \vec{E}(0) + \int_0^t \vec{\nabla} \cdot \dot{\vec{E}} dt \\ (5.1) \Rightarrow &= \frac{\rho(0)}{\epsilon_0} - \int_0^t \frac{\vec{\nabla} \cdot \vec{j}}{\epsilon_0} dt \\ (\text{Kontinuität}) \Rightarrow &= \frac{\rho(0)}{\epsilon_0} + \int_0^t \frac{\partial_t \rho}{\epsilon_0} dt \\ &= \frac{\rho(0)}{\epsilon_0} + \left. \frac{\rho(t)}{\epsilon_0} \right|_0^t \\ &= \frac{\rho(0)}{\epsilon_0} + \left. \frac{\rho(t)}{\epsilon_0} \right|_0^t \\ &= \frac{\rho(0)}{\epsilon_0} + \frac{\rho(t)}{\epsilon_0} - \frac{\rho(0)}{\epsilon_0} \\ &= \frac{\rho(t)}{\epsilon_0} \end{aligned}$$

Mit der 2. und 3. Maxwellgleichung lässt sich zeigen:

$$\begin{aligned} \vec{\nabla} \cdot \vec{B}(t) &= \vec{\nabla} \cdot \vec{B}(0) + \int_0^t \vec{\nabla} \cdot \dot{\vec{B}}(t) dt \\ &= \vec{\nabla} \cdot \vec{B}(0) - \int_0^t \vec{\nabla} \cdot (\vec{\nabla} \times \vec{E}(t)) dt \\ &= \vec{\nabla} \cdot \vec{B}(0) \\ &= 0 \end{aligned}$$