Fachgebiet Leistungselektronik und Elektrische Antriebstechnik
Prof. Dr.-Ing. Joachim Böcker

Musterlösung Grundlagen der Elektrotechnik B

07.04.2010

Version vom 6. Mai 2010

Aufgabe 1: Ausgleichsvorgang (20 Punkte)

1. **Spannung vor Schalten in S1**
   $i_L(t=0^-)=0$, Induktivität ist über den Widerstand R_2 entladen
2. **Spannung nach Schalten in S1**
   $i_L(t=0^+)=0$, Strom an der Induktivität kann sich nicht sprunghaft ändern
3. **Abklingen des Ausgleichsvorgangs in S1**
   $i_L(t\to\infty)=\frac{U_0}{R_1}$, Stationärer Zustand: Es fällt keine Spannung an der Induktivität ab.
4. **Aufladevorgang (S1): Aufstellen der Differentialgleichung**

   Bauteilgleichungen:
   $$u_{R_1}(t)=R_1\cdot i_{R_1}(t)$$
   $$u_L(t)=L\cdot \dot{i}_L(t)$$
   Maschengleichung:
   $$U_0=u_{R_1}(t)+u_L(t)$$
   Für den Strom gilt:
   $$i_{R_1}(t)=i_L(t)=i(t)$$
   Einsetzen und Umformen:
   $$\begin{aligned}U_0&=R_1\cdot i_{R_1}(t)+u_L(t)\\&=R_1\cdot i_L(t)+L\dot{i}_L(t)\end{aligned}$$
   $$\frac{U_0}{R_1}=i_L(t)+\frac{L}{R_1}\dot{i}_L(t)\quad\text{(inhomogene DGL 1. Ordnung)}$$
5. **Aufladevorgang (S1): Lösen der Differentialgleichung**

   Lösung der homogenen DGL
   $$i_L(t)+\frac{L}{R_1}\dot{i}_L(t)=0$$
   Exponentialansatz: $i_{Lh}(t)=I_{Lh0}e^{-\frac{t}{\tau_1}}$
   $$\Rightarrow\frac{L}{R_1}\cdot\left(-\frac{1}{\tau_1}\right)\cdot I_{Lh0}e^{-\frac{t}{\tau_1}}+I_{Lh0}e^{-\frac{t}{\tau_1}}=0$$
   $$\Rightarrow\frac{L}{R_1}\left(-\frac{1}{\tau_1}\right)+1=0\qquad\Rightarrow\tau_1=\frac{L}{R_1}$$
   $$\Rightarrow i_{Lh}=I_{Lh0}e^{-\frac{R_1}{L}t}$$
   Partikuläre Lösung der inhomogenen DGL:
   $$i_{Lp}=i_L(t\to\infty)=i_L(t\to\infty)+\frac{L}{R_1}\cdot\underbrace{\dot{i}_L(t\to\infty)}_{=0}=\frac{U_0}{R_1}$$

Gesamtlösung der DGL:

$$i_L(t) = i_{Lp} + i_{Lh} = \frac{U_0}{R_1} + I_{Lh0} e^{-\frac{R_1}{L}t}$$

Bestimmung der Konstanten I_{Lh0} über Anfangsbed. $i_L(t=0) = 0$:

$$0 = \frac{U_0}{R_1} + I_{Lh0} e^0 \quad \Rightarrow I_{Lh0} = -\frac{U_0}{R_1}$$

$$\Rightarrow i_L(t) = \frac{U_0}{R_1}\left(1 - e^{-\frac{R_1}{L}t}\right)$$

6. **Verhältnis der Zeitkonstanten für Auflade- und Entladevorgang**
   In Schalterposition 2 fließt der Strom über R_2 und L.

$$\Rightarrow \tau_2 = \frac{L}{R_2} \Rightarrow \frac{\tau_1}{\tau_2} = \frac{L \cdot R_2}{R_1 \cdot L} = \frac{1{,}5 \cdot L \cdot R_1}{R_1 \cdot L} = 1{,}5$$

7. **Entladevorgang (S2): Lösen der Differentialgleichung**
   Endwert des Aufladevorganges:

$$i_L(t = \tau_1^-) = \frac{U_0}{R_1}\left(1 - e^{-\frac{R_1}{L}t}\right) = \frac{U_0}{R_1}\left(1 - e^{-1}\right) = 0{,}632 \cdot \frac{U_0}{R_1}$$

   Spannungsverlauf $i_L(t > \tau_1)$ während des Entladevorganges: Direktes Aufstellen der DGL mit Hilfe folgender Überlegungen:

   - Exponentieller Stromabfall von $i_L(t)$ (analog zum exponentiell steigenden Stromverlauf während des Aufladevorganges)
   - Zeitkonstante: $\tau_2 = \frac{L}{R_2}$
   - Endwert des Aufladevorganges $i_L(t = \tau_1^-)$ entspricht dem Anfangswert des Entladevorganges $i_L(t = \tau_1^+)$, da sich der Strom in der Induktivität nicht sprunghaft ändern kann.

$$\Rightarrow i_L(t > \tau_1) = 0{,}632 \cdot \frac{U_0}{R_1} e^{-\frac{(t-\tau_1)}{\tau_2}}$$

   Endwert des Endladevorganges:

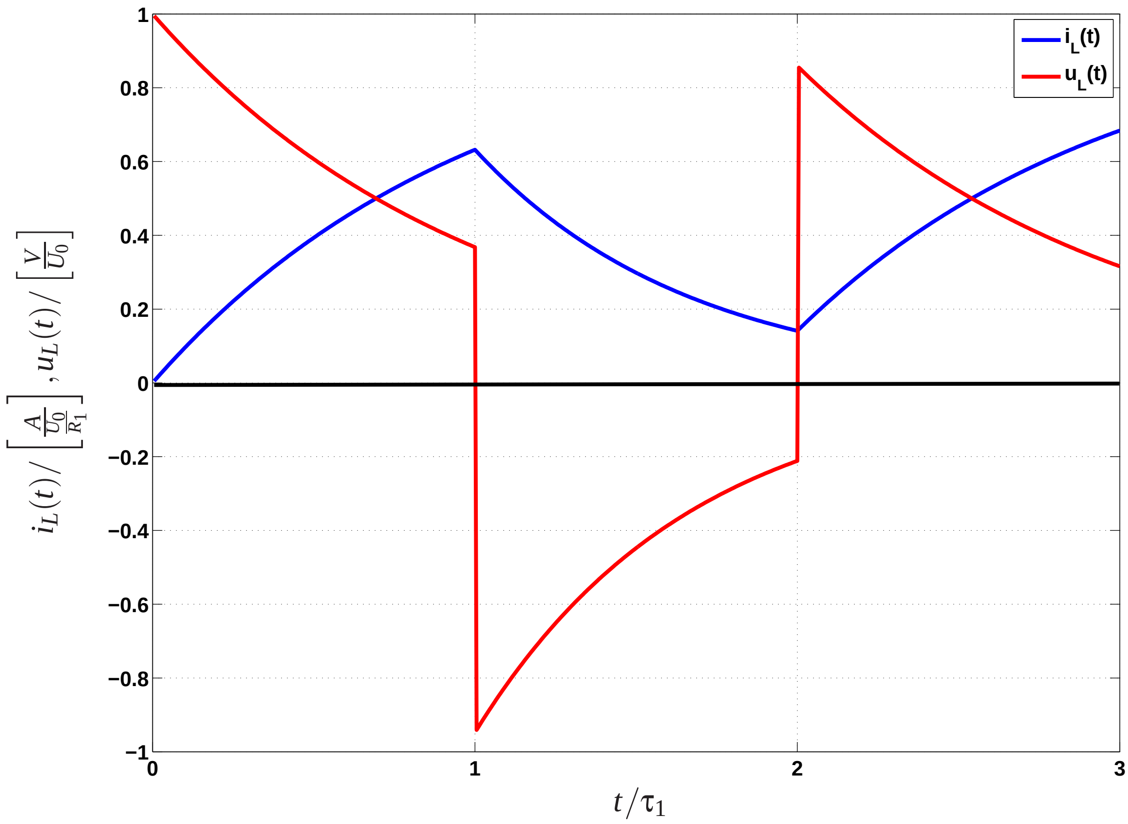
$$\Rightarrow i_L(t = 2\tau_1) = 0{,}632 \cdot \frac{U_0}{R_1} \cdot e^{-1{,}5} = 0{,}141 \cdot \frac{U_0}{R_1}$$

8. **Strom- und Spannungsverläufe**

   Stromverläufe $i_L(t)$:

$$i_L(0 \le t \le \tau_1) = \frac{U_0}{R_1}\left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_1}}\right) \Rightarrow I_1 = i_L(t = \tau_1) = 0{,}632 \cdot \frac{U_0}{R_1}$$

$$i_L(\tau_1 \le t \le 2\tau_1) = I_1 \cdot e^{-\frac{t-\tau_1}{\tau_2}} \Rightarrow I_2 = i_L(t = 2\tau_1) = 0{,}141 \cdot \frac{U_0}{R_1}$$



$$i_L(2\tau_1 \leq t \leq 3\tau_1) = I_2 + (\frac{U_0}{R_1} - I_2) \cdot (1 - e^{-\frac{t-2\tau_1}{\tau_1}}) \Rightarrow I_3 = i_L(t = 3\tau_1) = 0{,}684 \cdot \frac{U_0}{R_1}$$

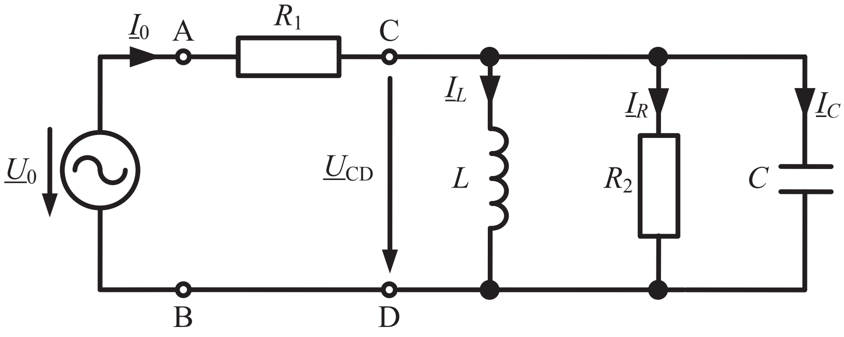
Spannungsverläufe $u_L(t)$:

$$u_L(0 \leq t < \tau_1) = U_0 \cdot e^{-\frac{t}{\tau_1}} \Rightarrow U_1 = u_L(t = \tau_1^-) = 0{,}368 \cdot U_0$$

$$u_L(\tau_1 \leq t < 2\tau_1) = -I_1 \cdot R_2 \cdot e^{-\frac{t-\tau_1}{\tau_2}} \Rightarrow U_2 = u_L(t = 2\tau_1^-) = -0{,}632 \cdot \frac{U_0}{R_1} \cdot R_2 \cdot e^{-1{,}5} = -0{,}211 \cdot U_0$$

$$u_L(2\tau_1 \leq t < 3\tau_1) = (U_0 - I_2 \cdot R_1) \cdot e^{-\frac{t-2\tau_1}{\tau_1}} \Rightarrow U_3 = u_L(t = 3\tau_1^-) = 0{,}859 \cdot U_0 \cdot e^{-1} = 0{,}316 \cdot U_0$$

Aufgabe 2: Komplexe Wechselstromrechnung, Blindleistungskompensation (20 Punkte)



1.

$$\underline{Y}_{CD} = \frac{1}{R_2} + \frac{1}{j\omega L} + j\omega C = \frac{1}{R_2} + j(\omega C - \frac{1}{\omega L})$$

$$\underline{Z}_{AB} = R_1 + \underline{Z}_{CD} = R_1 + \frac{1}{\underline{Y}_{CD}} = R_1 + \frac{1}{\frac{1}{R_2} + j(\omega C - \frac{1}{\omega L})}$$

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

2.

$$\underline{Z}_{CD} = 151{,}397 + j260{,}609\ \Omega$$

$$\underline{Z}_{AB} = 551{,}397 + j260{,}609\ \Omega$$

3.

$$\underline{U}_{CD} = \frac{\underline{Z}_{CD}}{\underline{Z}_{AB}}\underline{U}_0 = 93{,}617 + j64{,}459\ \mathrm{V}$$

$$\underline{I}_C = \underline{U}_{CD} j\omega C = -0{,}02 + j0{,}029\ \mathrm{A}$$

$$\underline{I}_L = \frac{\underline{U}_{CD}}{j\omega L} = 0{,}205 - j0{,}298\ \mathrm{A}$$

$$\underline{I}_{R_2} = \frac{\underline{U}_{CD}}{R_2} = 0{,}156 + j0{,}107\ \mathrm{A}$$

$$\underline{I}_0 = \underline{I}_C + \underline{I}_L + \underline{I}_{R_2} = 0{,}341 - j0{,}161\ \mathrm{A}$$

4.

$$\varphi_{\underline{U}_0} = 0$$

$$\varphi_{\underline{I}_0} = \arctan\frac{\mathrm{Im}(\underline{I}_0)}{\mathrm{Re}(\underline{I}_0)} = -0{,}442$$

$$\varphi = \varphi_{\underline{U}_0} - \varphi_{\underline{I}_0} = 0{,}442$$

5.

$$P_0 = |\underline{U}_0|\,|\underline{I}_0|\cos(\varphi) = 78{,}42\ \mathrm{W}$$

$$Q_0 = |\underline{U}_0|\,|\underline{I}_0|\sin(\varphi) = 37{,}064\ \mathrm{VA}$$

$$\underline{S}_0 = P_0 + jQ_0 = 78{,}42 + j37{,}064\ \mathrm{VA} = 86{,}738e^{j0{,}842}\ \mathrm{VA}$$

oder

$$\underline{S}_0 = \underline{U}_0 \cdot \underline{I}_0^* = 78{,}42 + j37{,}064\ \mathrm{VA} = 86{,}738e^{j0{,}842}\ \mathrm{VA}$$

6. Da die Spannung dem Strom vorauseilt (Induktive) und die Leistungsfaktor sei

$$\cos\varphi = \frac{P_0}{S_0} = \frac{78{,}42\mathrm{W}}{86{,}738\mathrm{VA}} = 0{,}904 < \cos\varphi' = 0{,}93,$$

is ein Kondensator dafür zu wählen.

Vor der Kompensation:

$$P_0 = 78{,}42\ \mathrm{W},\ Q_0 = 37{,}064\ \mathrm{VA}$$

Nach der kompensation:

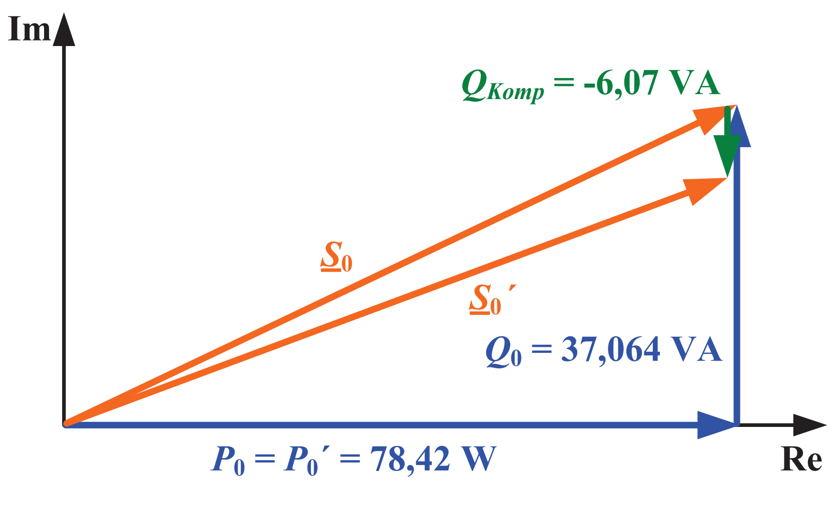
$$\varphi' = \arccos 0{,}93 = 0{,}376$$

$$P_0' = P_0 = 78{,}42\ \mathrm{W},\ Q_0' = P_0' \tan\varphi' = 30{,}994\ \mathrm{VA}$$

$$Q_{Komp} = Q_0' - Q_0 = -6{,}07\ \mathrm{VA}$$

$$C_{Komp} = \frac{-Q_{Komp}}{\omega U_0^2} = 365{,}3\ \mathrm{nF}$$

7.



Aufgabe 3: Übertragungsfunktionen 3 (22 Punkte)

1. a) $\underline{u} = \underline{Z}\,\underline{i} = (R + j\omega L)\,\underline{i}$

$$\Rightarrow \underline{H_1}(j\omega) = \frac{\underline{i}}{\underline{u}} = \frac{1}{R + j\omega L} = \frac{1}{R}\frac{1}{1 + j\omega T_1} \quad \text{mit} \quad T_1 = \frac{L}{R}$$

b) Tiefpassverhalten

2. a) $\underline{u} = \underline{Z}\,\underline{i} = \left(R + \frac{1}{j\omega C}\right)\underline{i}$

$$\Rightarrow \underline{H_2}(j\omega) = \frac{\underline{i}}{\underline{u}} = \frac{1}{R + \frac{1}{j\omega C}} = \frac{j\omega C}{1 + j\omega RC} = \frac{1}{R}\frac{j\omega T_2}{1 + j\omega T_2} \quad \text{mit} \quad T_2 = RC$$

b) Tiefpassverhalten

3. a) $\underline{u} = \underline{Z}\,\underline{i} = \left(R + j\omega L + \frac{1}{j\omega C}\right)\underline{i}$

$$\Rightarrow \quad \underline{H_3}(j\omega) = \frac{\underline{i}}{\underline{u}} = \frac{1}{R + j\omega L + \frac{1}{j\omega C}} = \frac{j\omega C}{1 + j\omega RC - \omega^2 LC} = \frac{1}{R}\frac{j\omega RC}{1 + j\omega RC - \omega^2 LC}$$

Koeffizientenvergleich mit

$$\underline{H_3}(j\Omega) = \frac{1}{R}\frac{\dots}{1 + j2d\Omega - \Omega^2}$$

liefert:

$$2d\Omega = \omega RC \text{ und } \Omega^2 = \omega^2 LC$$

Man erhält:

$$\Omega = \omega\sqrt{LC} = \frac{\omega}{\omega_0} \quad \Rightarrow \quad \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

$$d = \frac{\omega RC}{2\Omega} = \frac{1}{2}\omega_0 RC = \frac{1}{2}\frac{RC}{\sqrt{LC}} = \frac{R}{2}\sqrt{\frac{C}{L}}$$

$$\underline{H_3}(j\Omega) = \frac{1}{R}\frac{j2d\Omega}{1 + j2d\Omega - \Omega^2}$$

b) Bandpassverhalten

4. Die Übertragungsfunktion beschreibt die Abhängigkeit zwischen einem Strom und einer Spannung und hat deshalb die Einheit $\left[\frac{1}{\Omega}\right] = \left[\frac{\text{A}}{\text{V}}\right]$.

5. Für $\underline{z_2} \neq 0$ gilt:

$$\left|\frac{\underline{z_1}}{\underline{z_2}}\right| = \frac{|\underline{z_1}|}{|\underline{z_2}|}$$

$$\left|\underline{H_4}(j\Omega)\right| = \sqrt{\frac{(2d\Omega)^2}{(1-\Omega^2)^2 + (2d\Omega)^2}} = \sqrt{\frac{4d^2\Omega^2}{(1-\Omega^2)^2 + 4d^2\Omega^2}}$$

6. $$\underline{H_4}(j\Omega) = \frac{j2d\Omega}{(1-\Omega^2)+j2d\Omega}\,\frac{(1-\Omega^2)-j2d\Omega}{(1-\Omega^2)-j2d\Omega} = \frac{4d^2\Omega^2 + j2d\Omega(1-\Omega^2)}{(1-\Omega^2)^2+4d^2\Omega^2}$$

$$\angle\underline{H_4}(j\Omega) = \arctan\left(\frac{2d\Omega(1-\Omega^2)}{4d^2\Omega^2}\right) = \arctan\left(\frac{1-\Omega^2}{2d\Omega}\right)$$

7. $$\left|\underline{H_4}(j\Omega)\right| = \sqrt{\frac{4d^2\Omega^2}{(1-\Omega^2)^2+4d^2\Omega^2}} = \sqrt{\frac{1}{1+\frac{(1-\Omega^2)^2}{4d^2\Omega^2}}} = \sqrt{\frac{1}{1+\left(\frac{1}{2d\Omega}-\frac{\Omega^2}{2d\Omega}\right)^2}}$$

$\Omega << 1$:

$$\lim_{\Omega\to 0}\left|\underline{H_4}(j\Omega)\right| = \lim_{\Omega\to 0}\sqrt{\frac{1}{1+\left(\frac{1}{2d\Omega}-\frac{\Omega^2}{2d\Omega}\right)^2}} \approx \frac{1}{\frac{1}{2d}\frac{1}{\Omega}}$$

$$\Rightarrow A(\Omega) = 20\lg(2d\Omega) = 20\lg(2d) + 20\lg(\Omega)$$

$$\lim_{\Omega\to 0}\angle\underline{H_4}(j\Omega) = \arctan(\infty) = \frac{\pi}{2}$$

$\Omega = 1$:

$$\left|\underline{H_4}(j\Omega)\right| = \sqrt{\frac{1}{1+\left(\frac{1}{2d}-\frac{1}{2d}\right)^2}} = 1$$

Geradennäherung: $A(\Omega) \approx 20\lg(2d)$

$$\angle\underline{H_4}(j\Omega) = \arctan\left(\frac{1-1}{2d}\right) = 0$$

$\Omega >> 1$:

$$\lim_{\Omega\to\infty}\left|\underline{H_4}(j\Omega)\right| = \lim_{\Omega\to\infty}\sqrt{\frac{1}{1+\left(\frac{1}{2d\Omega}-\frac{\Omega^2}{2d\Omega}\right)^2}} \approx \frac{1}{\frac{\Omega}{2d}}$$

$$\Rightarrow A(\Omega) = 20\lg(\frac{2d}{\Omega}) = 20\lg(2d) - 20\lg(\Omega)$$

$$\lim_{\Omega\to\infty}\angle\underline{H_4}(j\Omega) = \arctan(-\infty) = -\frac{\pi}{2}$$

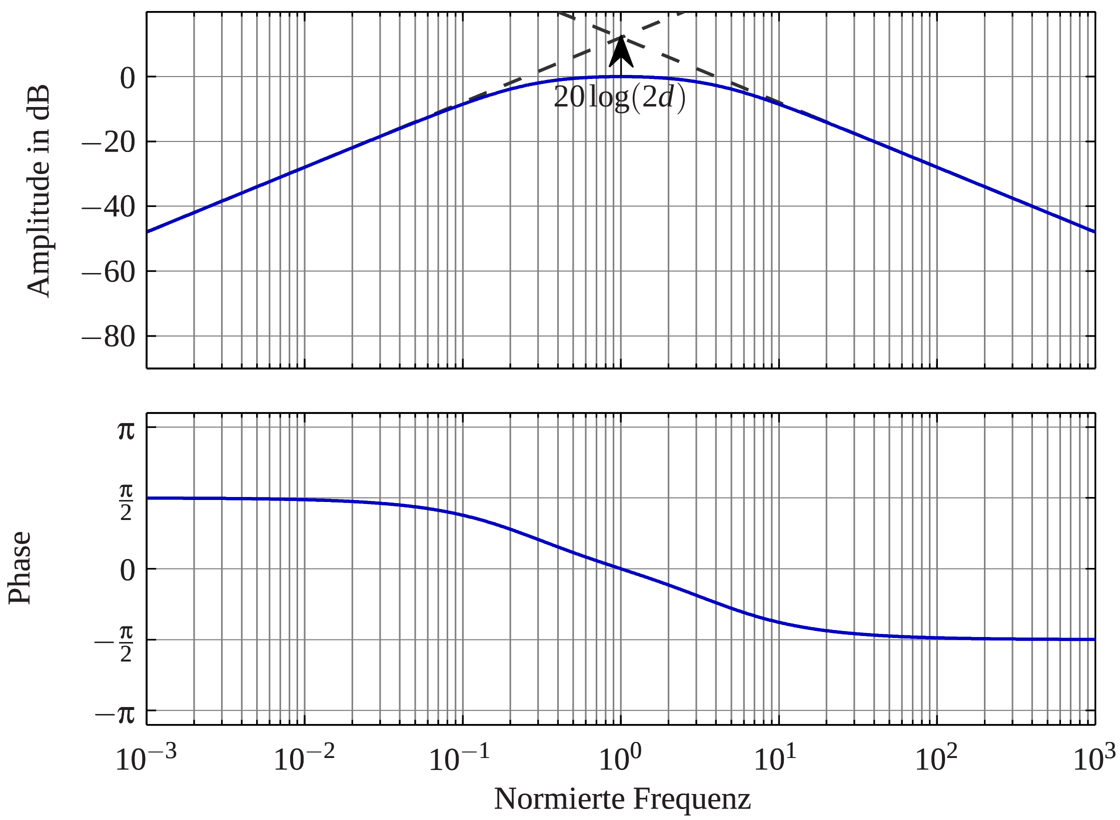


Abbildung 3.1: Bode-Diagramm der Übertragungsfunktion $\underline{H}_4(j\Omega)$

Aufgabe 4: Gleichstromsteller **(30 Punkte)**

1. Der Effektivwert berechnet sich wie folgt:

$$
\begin{aligned}
I &= \sqrt{\frac{1}{T_s}\int_0^{T_s} i^2(t)\mathrm{d}t} \\
I &= \sqrt{\frac{1}{100\mu s}\int_0^{60\mu s}\left(\frac{5A}{60\mu s}t+10A\right)^2 \mathrm{d}t} \\
I &= \sqrt{\frac{1}{100\mu s}\int_0^{60\mu s}\left(\frac{25A^2}{60\mu s}t^2+\frac{100A^2}{60\mu s}t+100A\right)\mathrm{d}t} \\
I &= \sqrt{\frac{1}{100\mu s}\left(\frac{1}{3}\frac{25A^2}{60\mu s}t^3+\frac{50A^2}{60\mu s}t^2+100At\right)\Big|_0^{60\mu s}} \\
I &= \sqrt{\frac{1}{100\mu s}\left(\frac{1}{3}\frac{25A^2}{60\mu s}(60\mu s)^3+\frac{50A^2}{60\mu s}(60\mu s)^2+100A60\mu s\right)} \\
I &= \sqrt{\frac{1}{100\mu s}(500A^2\mu s+3000A^2\mu s+6000A^2\mu s)} \\
I &= \sqrt{95A^2} \\
I &= 9{,}75A
\end{aligned}
$$

2. Der Strom $i(t)$ und die Spannung $u(t)$ werden am Transistor gemessen.
   Bei der Schaltungstopologie handelt es sich um eine Hochsetzsteller.

3. Die Größen lassen sich aus dem Diagramm ablesen oder berechnen.

$$
\begin{aligned}
T_s &= 100\mu s \\
f_s &= \frac{1}{T_s} = 10kHz \\
T_e &= 60\mu s \\
T_a &= T_s - T_e = 40\mu s \\
D &= \frac{T_e}{T_s} = 0{,}6 \\
U_2 &= 120V \\
U_1 &= U_2(1-D) = 48V
\end{aligned}
$$

4. Die Induktivtät der Drossel berechnet sich aus der der Maschengleichung für den eingeschalteten Transistor:

$$
\begin{aligned}
U_1 - U_L &= 0 \\
U_1 = U_L &= L\frac{\mathrm{d}i_L(t)}{\mathrm{d}t} \\
\Rightarrow L &= \frac{U_1 \Delta t}{\Delta i} \\
L &= \frac{48\mathrm{V}60\mathrm{\mu s}}{5\mathrm{A}} \\
L &= 576\mathrm{\mu H}
\end{aligned}
$$

5. Der maßstäbliche Stromverlauf ist in der Abbildung **??** zu finden.

6. Der Mittelwert des Diodenstromes ergibt sich aus:

$$
\begin{aligned}
\bar{i}_D &= \frac{1}{T_s}\int_0^{T_s} i_D(t)\mathrm{d}t \\
\bar{i}_D &= \frac{1}{100\mathrm{\mu s}}\int_0^{40\mathrm{\mu s}} \left(-\frac{5\mathrm{A}}{40\mathrm{\mu s}}t + 15\mathrm{A}\right)\mathrm{d}t \\
\bar{i}_D &= \frac{1}{100\mathrm{\mu s}}\left(-\frac{5\mathrm{A}}{2\;40\mathrm{\mu s}}t^2 + 15\mathrm{A}\;t\right)\Bigg|_0^{40\mathrm{\mu s}} \\
\bar{i}_D &= \frac{1}{100\mathrm{\mu s}}\left(-\frac{5\mathrm{A}}{2\;40\mathrm{\mu s}}(40\mathrm{\mu s})^2 + 15\mathrm{A}\;40\mathrm{\mu s}\right) \\
\bar{i}_D &= \frac{1}{100\mathrm{\mu s}}\left(-100\mathrm{A}^2\mathrm{\mu s} + 600\mathrm{A}^2\mathrm{\mu s}\right) \\
\bar{i}_D &= 5\mathrm{A}
\end{aligned}
$$

7. Der Lastwiderstand R kann aus der Ausgangsspannung U_2 und dem Mittelwert des Diodenstromes $\bar{I}_D$ berechnet werden.

$$
\begin{aligned}
R &= \frac{U_2}{I_2} \\
R &= \frac{U_2}{\bar{i}_D} \\
R &= \frac{120\mathrm{V}}{5\mathrm{A}} \\
R &= 24\Omega
\end{aligned}
$$

8. Der zeitliche Verlauf der Leistung $p_L(t)$ ist in **??** dargestellt.

9. Die Schaltung befinde sich an der Lückgrenze. Für den Spulenstrom gilt hierbei: $i_L(T_S) = i_D(T_S) = 0$.

$$
\begin{aligned}
\bar{i}_D &= \frac{1}{T_s}\int_0^{T_s} i_D(t)\mathrm{d}t \\
\bar{i}_D &= \frac{1}{100\mu s}\int_0^{40\mu s}\left(-\frac{5A}{40\mu s}t + 5A\right)\mathrm{d}t \\
\bar{i}_D &= \frac{1}{100\mu s}\left(-\frac{5A}{2\;40\mu s}t^2 + 5At\right)\Big|_0^{40\mu s} \\
\bar{i}_D &= \frac{1}{100\mu s}\left(-\frac{5A}{240\mu s}(40\mu s)^2 + 5A\;40\mu s\right) \\
\bar{i}_D &= \frac{1}{100\mu s}(-100A^2\mu s + 200A^2\mu s) \\
\bar{i}_D &= 1A \\
\Rightarrow R &= \frac{120V}{1A} \\
R &= 120\Omega
\end{aligned}
$$

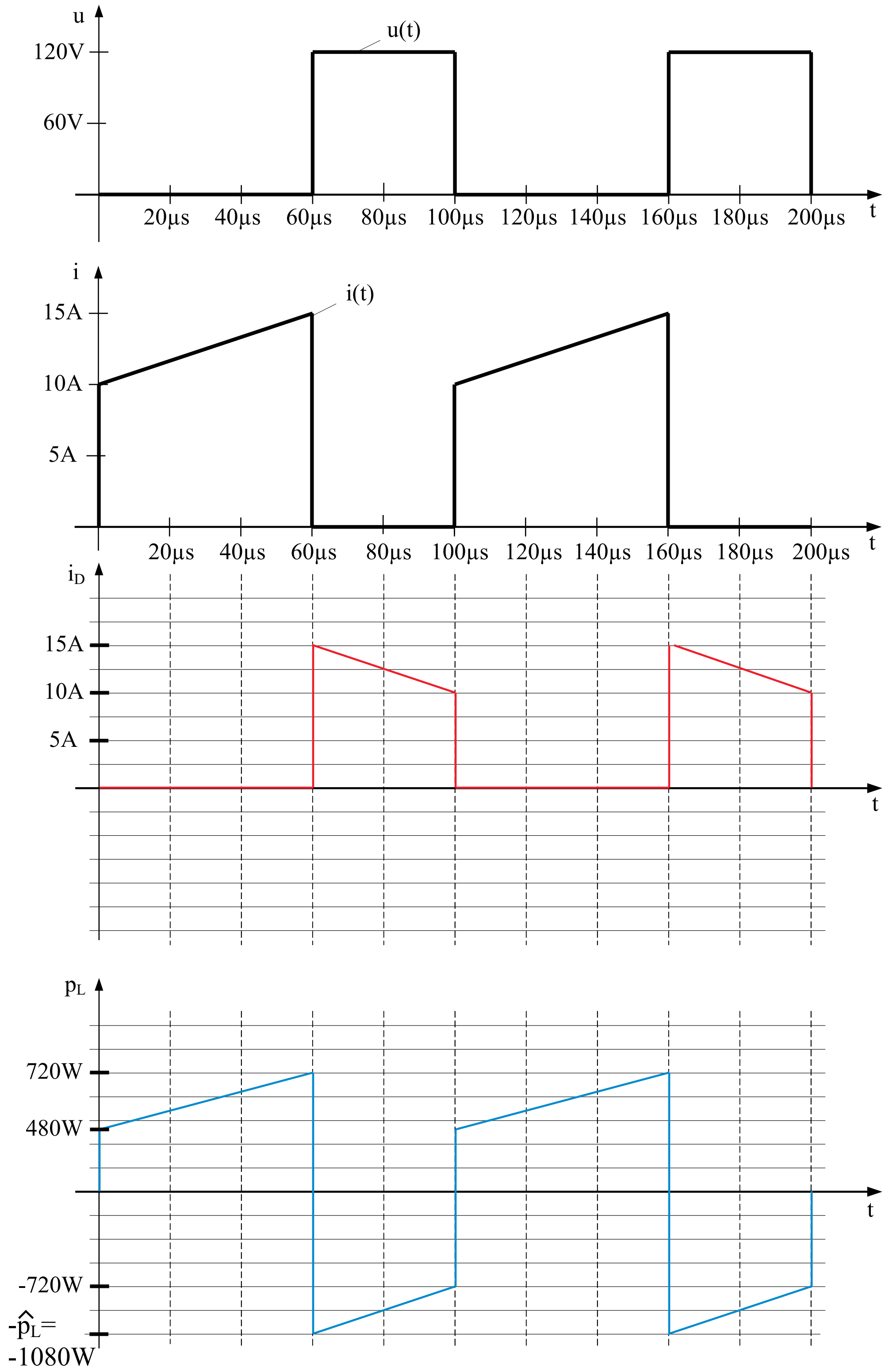
10.

$$
\begin{aligned}
\Delta i &= \frac{D\;T_s\;U_1}{L} = \frac{0{,}2\;100\mu s\;48V}{576\mu H} \\
\Delta i &= 1{,}67A
\end{aligned}
$$

oder

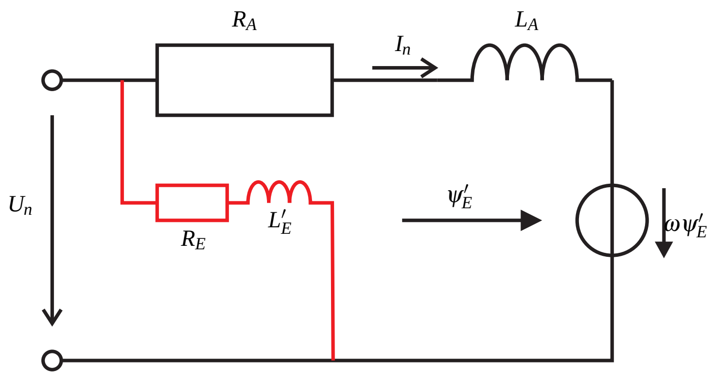
$$
\begin{aligned}
\Delta i &= \frac{D(1-D)\;T_s\;U_2}{L} = \frac{0{,}2(1-0{,}2)\;100\mu s\;60V}{576\mu H} \\
\Delta i &= 1{,}67A
\end{aligned}
$$

beachte die Ausgangsspannung ist in diesem Fall nicht $U_2 \neq 120V$, sondern $U_2 = \frac{1}{1-D}U_1 = 60V$


u
u(t)
120V
60V
20µs 40µs 60µs 80µs 100µs 120µs 140µs 160µs 180µs 200µs
t
i
i(t)
15A
10A
5A
20µs 40µs 60µs 80µs 100µs 120µs 140µs 160µs 180µs 200µs
t
i_D
15A
10A
5A
t
p_L
720W
480W
t
-720W
$-\hat{p}_L=$
-1080W

Aufgabe 5: Gleichstrommaschine **(18 Punkte)**

1. Ersatzschaltbild (rot gilt für Aufg.4)



2. Ersatzschaltbild-Parameter

$$\omega_0 = n_0 \frac{\pi}{30} = 314\,16\,\mathrm{s}^{-1}$$
$$\omega_n = n_n \frac{\pi}{30} = 157{,}08\,\mathrm{s}^{-1}$$
$$\psi'_E = \frac{U_n}{\omega_0} = 76{,}4\,\mathrm{mVs}$$
$$R_A = \frac{U_n - \omega_n \psi'_E}{I_n} = 0{,}6\,\Omega$$
$$L_A = \tau_T R_A = 6\,\mathrm{mH}$$

3. Drehmoment im Arbeitspunkt: $T_n = 1{,}53\,\mathrm{Nm}$

4. Auslegung des Erregerkreises:

   a) $R_E = \frac{U_n}{I_{E,n}} = 48\,\Omega$

   b) $L_E = \tau_E * R_E = 48\,\mathrm{mH}$; $\quad L'_E = \frac{\psi'_E}{In}$

   c) $N_E = c_m \frac{L_E}{L'_E}$