

Lösung zu Aufgabe 1

12 Punkte

$$1) \quad J_{\text{ges}} = \left(m_T + k_S \cdot \rho \cdot \pi \cdot \left(\frac{d_S}{2} \right)^2 \cdot l_S \right) \cdot \left(\frac{d_R + d_S}{2} \right)^2 = 4,67 \cdot 10^6 \text{ kg m}^2$$

$$2) \quad n_R = \frac{v_T}{\pi \cdot d_R} = 5,73 \text{ min}^{-1}$$

$$i = \frac{n_R}{n_M} = \frac{1}{258,3}$$

$$3) \quad J_M = i^2 \cdot J_{\text{ges}} = 137,18 \text{ kg m}^2 \text{ (oder } 152 \text{ kg.m}^2)$$

$$4) \quad M_M = J_M \cdot \frac{\Delta\omega}{t_B} = J_M \cdot \frac{2\pi \cdot n_M}{t_B} = 2126 \text{ Nm (oder } 2325 \text{ N.m)}$$

$$5) \quad W_V = 2\pi^2 \cdot J_M \cdot n_M^2 = 16,47 \cdot 10^5 \text{ Ws (oder } 18,01 \cdot 10^5 \text{ Ws)}$$

$$P_{V,\text{av}} = \frac{W_{V,\text{av}}}{t_B} = 16,47 \cdot 10^4 \text{ W (oder } 1,14 \cdot 10^5 \text{ W)}$$

- 6) Hochlauf über Frequenzumrichter. Im Schiffshebewerk Niederfinow wurde z. B. ein Leonardsatz verbaut (rotierender Umformer aus Asynchronmaschine und Gleichstrommaschine auf gemeinsamer Welle als „Gleichrichter“ sowie einer Gleichstrommaschine und Synchronmaschine auf gemeinsamer Welle als „Wechselrichter“: Der Hochlauf lässt sich akustisch gut feststellen, da die beiden Umformersätze nacheinander hochgefahren werden und zuletzt die Antriebsmaschinen zugeschaltet werden). Das neue Hebewerk erhält statische Umrichter auf leistungselektronischer Basis.

Lösung zu Aufgabe 2

12 Punkte

1) Drehfeldleistung und Rotorverluste

(2 Punkte)

$$P_{N,\text{mech}} = P_N = (1 - s_N) \cdot P_D$$

$$P_{V2} = s_N \cdot P_D$$

$$s_N = 1 - \frac{p \cdot n_N}{f_1} = \frac{n_0 - n_N}{n_0} = 0,013 = 1,33\%$$

$$P_{V2} = P_N \cdot \frac{s_N}{1 - s_N} = 81 \text{ kW}$$

$$P_D = P_{N,\text{mech}} + P_{V2} = \frac{P_N}{1 - s_N} = 6,081 \text{ MW}$$

2) P_1 und P_{V1}

(2 Punkte)

$$P_1 = U_N \cdot I_N \cdot \sqrt{3} \cdot \cos \varphi_N = 3 \text{ kV} \cdot 1,4 \text{ kA} \cdot \sqrt{3} \cdot 0,85 = 6,183 \text{ MW}$$

$$P_1 = P_{V1} + P_{N,\text{mech}} + P_{V2} \Leftrightarrow$$

$$P_D = P_1 - P_{V1} = P_{N,\text{mech}} + P_{V2}$$

$$P_{V1} = P_1 - P_D = 102 \text{ kW} (83 \text{ kW})$$

3) Statorwiderstand und Statorinduktivität:

(2 Punkte)

$$R_1 = \frac{P_{V1}}{3 \cdot I_{1N}^2} = \frac{102 \text{ kW}}{3 \cdot (1,4 \text{ kA})^2} = 17,3 \text{ m}\Omega \quad (13,6 \text{ m}\Omega)$$

Wegen $R_1 \cdot I_1 \approx 24 \text{ V} \ll U_N$ ist Näherung zulässig: $L_1 = \frac{U_N}{\omega_1 \cdot \sqrt{3} \cdot I_0} = 18,4 \text{ mH}$

4) Ortskurve

(2 Punkte)

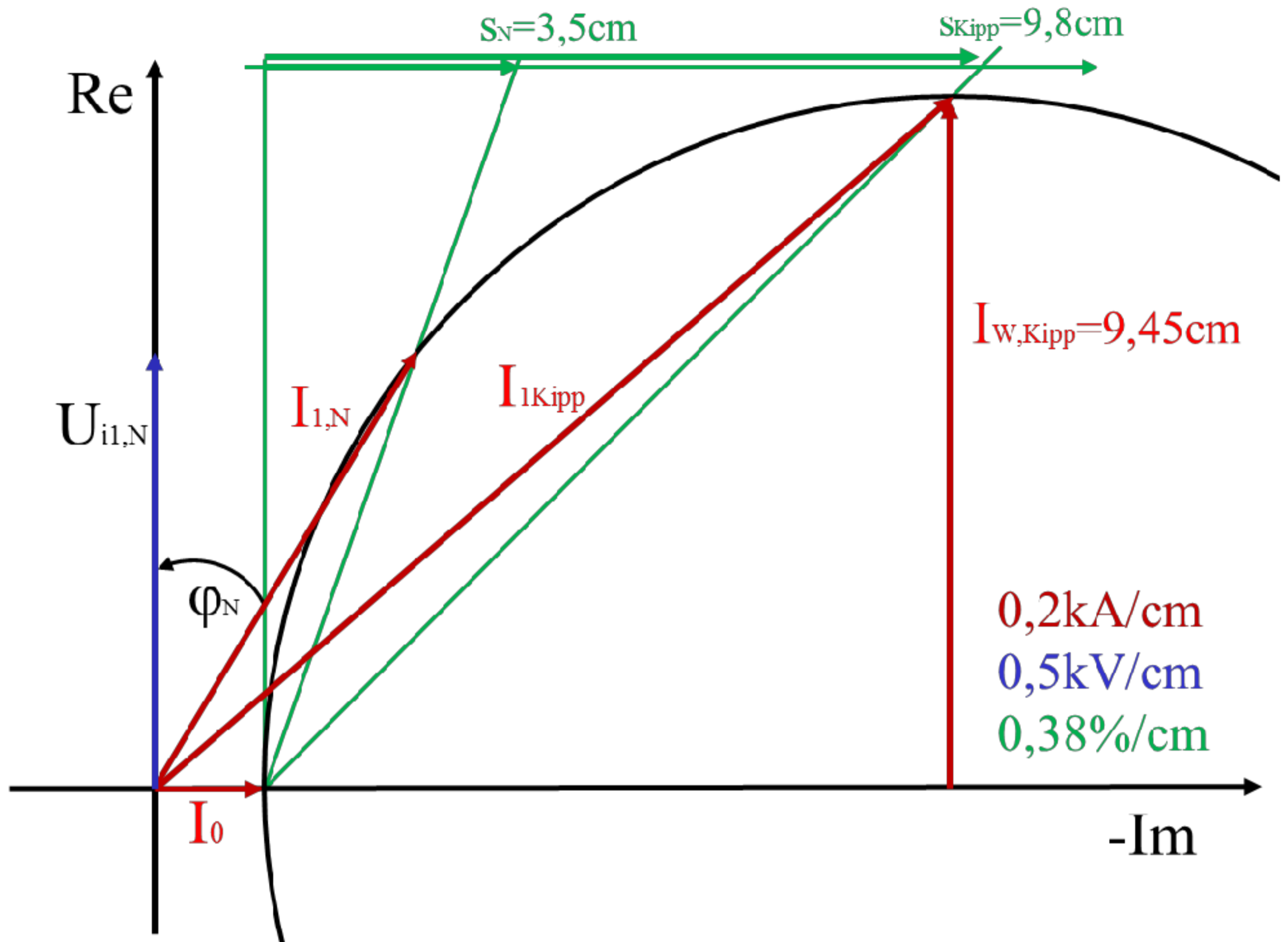
$$\varphi_N = \arccos(0,85) = 31,8^\circ$$

Ablesen des Kipp-Schlupfes:

$$s_{\text{Kipp}} = \frac{s_N}{s_{N,\text{cm}}} \cdot s_{\text{Kipp,cm}} = \frac{1,33\%}{3,5\text{cm}} \cdot 9,8\text{cm} = 3,72\%$$

Streuung (nicht gefragt):

$$\sigma = \frac{I_{10}}{I_D + I_{10}} = 0,0735$$



5) Rotorkippfrequenz:

(1 Punkt)

$$f_{2Kipp} = s_{Kipp} \cdot f_N = 0,037 \cdot 50 \text{ Hz} = 1,85 \text{ Hz}$$

6) Stoß-Drehmoment:

(2 Punkte)

$$\frac{M_N}{M_{Kipp}} = \frac{I_{W,1,N}}{I_{W,Kipp}} = \frac{6\text{cm}}{9,45\text{cm}} = 0,635$$

$$M_N = \frac{P_N}{2\pi n_N} = 38,7\text{kNm}$$

$$M_{Kipp} = \frac{M_N}{0,635} = 60,9\text{kNm} > M_{\max} = 50\text{kNm}$$

Alternative Rechnung:

$$M_{Kipp} = \frac{3}{2} p \cdot \left(\frac{U_{1N} / \sqrt{3}}{2\pi \cdot f_{1N}} \right)^2 \cdot \frac{(1-\sigma)}{L_1 \cdot \sigma} = \frac{3 \cdot 2 \cdot \left(\frac{3000 \text{ V}}{\sqrt{3}} \right)^2}{2 \cdot (2\pi \cdot 50\text{Hz})^2} \cdot \frac{(1-0,0735)}{18,4\text{mH} \cdot 0,0735}$$

$$M_{Kipp} = 62,47 \text{ kNm} > M_{\max} = 50\text{kNm}$$

→ Ja, die Maschine kann kurzzeitig das Drehmoment liefern.

7) Anfahren mit Kippmoment:

(2 Punkte)

Statorfrequenz:

$$f_1 = p n + f_2 = f_{2\text{kipp}} = 1,8 \text{ Hz}$$

Induzierte Spannung:

$$U_{i1} = s_{\text{Kipp}} \cdot U_N = 0,036 \cdot 3000 \text{ V} = 108 \text{ V}$$

Bestimmung des Kippstroms $I_{1\text{Kipp}}$ (Ablesen über Ortskurve ist einfacher):

$$\underline{I}_{1\text{Kipp}} = \frac{U_N}{\sqrt{3} \cdot X_1 \cdot \frac{\sigma}{1-\sigma} \cdot (1+j)} - jI_0 = \frac{3000 \text{ V} \cdot (1-j)}{\sqrt{3} \cdot 0,471 \Omega \cdot 2} - j300 \text{ A} = 1839 \text{ A} - j2139 \text{ A}$$

Gesamtspannung:

$$\underline{U}_1 = U_{i1} + \underline{I}_{1\text{Kipp}} \cdot R_1 = (139,4 - j31,4) \text{ V}$$

$$U_1 = 143 \text{ V}$$

Lösung zu Aufgabe 3:

12 Punkte

1) Leistungsbilanz:

$$P_{\text{el}} - P_{\text{mech}} = P_v$$

$$P_v = 48 \text{ V} \cdot 26,7 \text{ A} - 1000 \text{ W} = 281,6 \text{ W}$$

$$P_v = P_{\text{reib}} + P_{\text{cu,a}}$$

$$\frac{P_{\text{reib}}}{P_{\text{mech}}} = \frac{I_{a0}}{I_{aN} - I_{a0}} =$$

$$P_{\text{reib}} = 230,4 \text{ W} = 2\pi \cdot n \cdot M_{\text{reib}}$$

$$M_{\text{reib}} = \frac{230,4}{2 \cdot \pi \cdot 3000} \cdot 60 = 0,733 \text{ N.m}$$

$$R_a \cdot I_a^2 = P_{\text{cu,a}} = P_v - P_{\text{reib}} = 94,1 \text{ W}$$

$$R_a = 0,072 \Omega$$

Oder:

$$P_{\text{mech,N}} = U_i \cdot (I_{aN} - I_{a0})$$

$$P_{\text{Reib}} = U_i \cdot I_{a0}$$

2) reale Leerlauf Drehzahl: (Maschensatz):

$$k\phi = \frac{M_i}{I_{aN}} \cdot 2\pi$$

$$M_i - M_{\text{Reib}} = M_N$$

$$\frac{k\phi(I_{aN} - I_{a0})}{2\pi} = M_N$$

$$k\phi = 0,92 \text{ V.s}$$

$$\text{Oder } k\phi = \frac{M_R}{I_{a0}} \cdot 2\pi$$

$$U_{i0} = U_a - R_a \cdot I_{a0} = k\phi \cdot n_0$$

$$n_0 = 3106 \text{ min}^{-1} \text{ (oder } 3104 \text{ min}^{-1} \text{ mit } R_a=0,08)$$

3) Ankerspannung bei $n=0$ und $M=5 \text{ N.m}$:

$$M_{an} = \frac{k\phi}{2\pi} (I_a - I_{a0}) = \frac{k\phi}{2\pi} \left(\frac{U_a}{R_a} - I_{a0} \right)$$

$$\text{(Oder } M_i = M_r + M_{an} = 5 \text{ N.m} + 0,73 \text{ N.m} = 5,73 \text{ N.m)}$$

$$M_i = \frac{k\phi}{2\pi} I_{an}$$

$$I_{a, n=0} = 39,13 \text{ A,}$$

$$U_{a, n=0} = R_a \cdot I_{a, n=0} = 2,81 \text{ V (oder } 3,18 \text{ V mit } R_a=0,08)$$

$$a = 0,068 \text{ (oder } 0,066)$$

4) $I_a \cdot n = 26,7 \text{ A} \cdot 4500 \text{ min}^{-1}$

$$I_a = 24,03 \text{ A}$$

$$\text{Maschensatz: } U_{aN} - R_a \cdot I_a = k\phi \cdot n_{\max}$$

$$k\phi_4 = 0,55 \text{ V.s}$$

5) Ankerspannung?

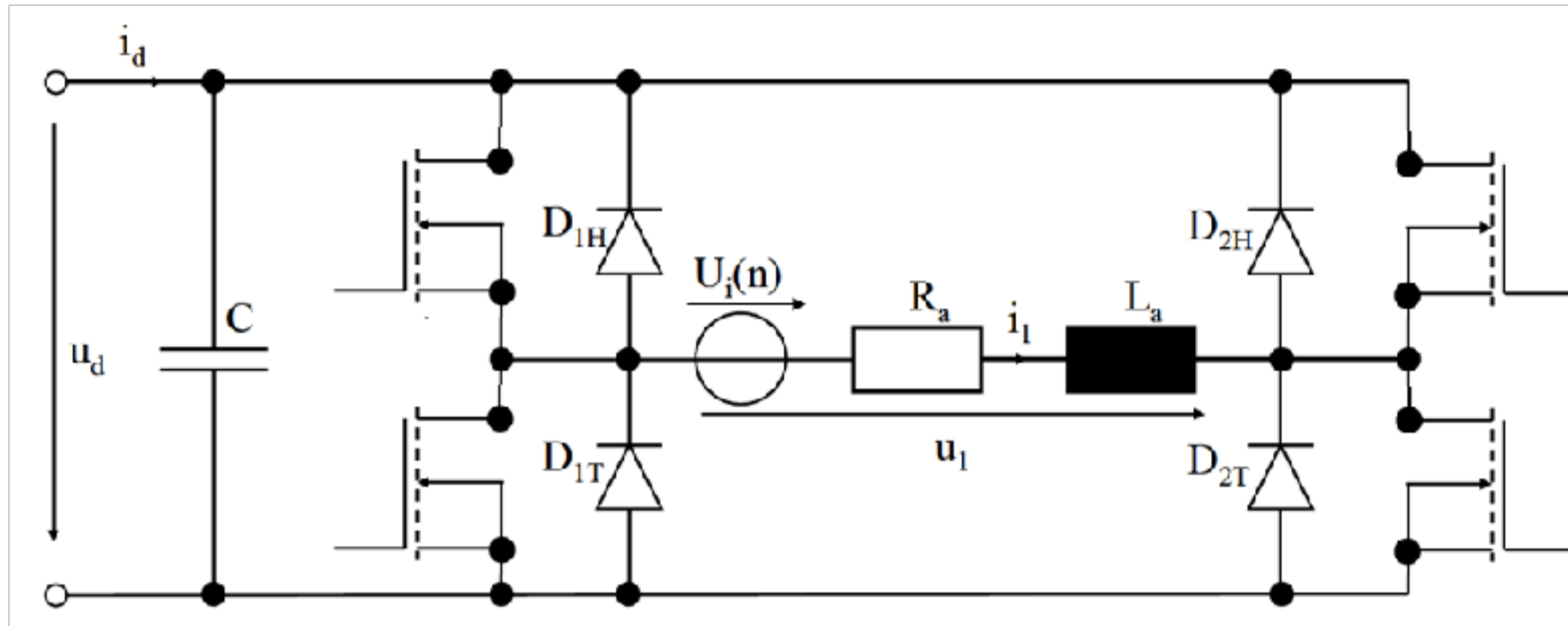
$$U_a = \frac{T_E}{T_s} \cdot U_{zk} = T_E \cdot f_s \cdot U_{zk} = 32,64 \text{ V}$$

Lösung zu Aufgabe 4

11 Punkte

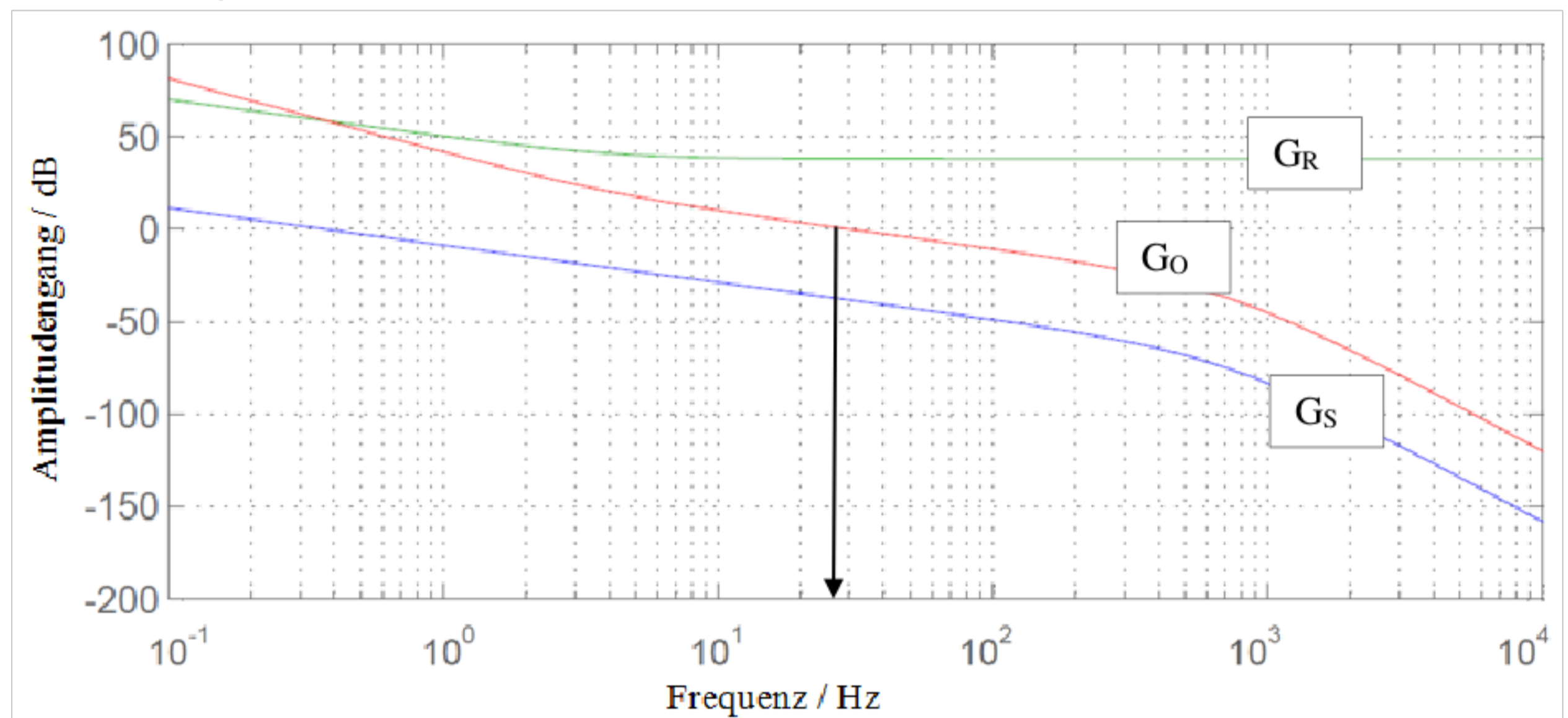
1. Totzeitglied: $G(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = e^{-sT} \approx \frac{1}{1+s \cdot T}$ (1 Punkt)

2. Aufgrund der parasitären Inversdiode im MOSFET sind antiparallele Dioden hier nicht zwingend notwendig. (1 Punkt)



(1 Punkt für ESB 4QS und GM; 1 Punkt für richtige Kennzeichnungen) (2 Punkte)

3. Bodediagramm



G_S , G_R und G_O richtig: (1 Punkt)

Durchtrittsfrequenz $f_D = \text{ca. } 25 \dots 30 \text{ Hz}$ (1 Punkt)

4. Voraussetzung für die Kaskadenregelung: $T_m \gg T_a$ (Elektromechanische Zeitkonstante \gg Ankerzeitkonstante) (1 Punkt)

5. Kippdrehmoment im Feldschwächbereich I: (1 Punkt)

$$M_{\text{Kipp}} \sim \frac{1}{f_1^2}$$

$$\frac{M_{\text{Kipp}}}{M_{\text{Kipp,N}}} = \left(\frac{U_1}{U_{1N}} \cdot \frac{f_{1N}}{f_1} \right)^2$$

6. Drehmoment und Näherung: (3 Punkte)

$$s_{\text{Kipp}} = \frac{f_{2\text{Kipp}}}{f_1} = 0,28$$

$$M = \frac{2M_{\text{Kipp}}}{\frac{s}{s_{\text{Kipp}}} + \frac{s_{\text{Kipp}}}{s}} = 14,83\text{Nm} \quad (1 \text{ Punkt})$$

Näherung : $s \ll s_{\text{Kipp}}$ (1 Punkt)

$$\tilde{M} = \frac{2M_{\text{Kipp}}}{s_{\text{Kipp}}} s = 15\text{Nm}$$

$$\frac{\tilde{M}}{M} = 1,011 \Rightarrow 1,1\% \quad (1 \text{ Punkt})$$