Aufgabe 1:

1. Die Seilmasse ist bei mittlerer Höhe ausgeglichen und muss nicht berücksichtigt werden. Also ergibt sich:

   $$m_A = m_K + \frac{m_P}{2} = 4{,}1\ \mathrm{t}$$

2. Die nicht ausgeglichenen Massen bestehen aus der (variablen) Seilmasse, die beim Anfahren vom Fußpunkt maximal wird, und der vom Mittel abweichenden Passagiermasse.

   $$\Delta m_{max} = h \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot \rho + \frac{m_P}{2} = 1{,}1\ \mathrm{t}$$

   $$P_{max} = v \cdot \Delta m_{max} \cdot g = 64{,}75\ \mathrm{kW}$$

3. $M_{stat} = \Delta m_{max} \cdot g \cdot D/2 = 2{,}7\ \mathrm{kNm}$

4. $n_{stat} = \dfrac{v}{\pi \cdot D} = 3{,}82\ \mathrm{s}^{-1} = 229\ \mathrm{min}^{-1}$

5. $a = r \cdot t \qquad v = \dfrac{r \cdot t^2}{2}$

   Aus Symmetriegründen muss nach Erreichen von $v/2 = 3\ \mathrm{m\ s^{-1}}$ wieder gebremst werden. Also:

   $$t_B = \sqrt{\frac{2 \cdot v/2}{r}} = 2{,}45\ \mathrm{s}$$

   $$a_{max} = r \cdot t_B = 2{,}45\ \mathrm{m\ s^{-2}}$$

6. $m_A = 4{,}1\ \mathrm{t} \qquad m_{Seil} = h \cdot \dfrac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot \rho = 0{,}5\ \mathrm{t} \qquad m_K + m_P = 4{,}7\ \mathrm{t}$

   $$m_{ges} = m_A + m_{Seil} + m_K + m_P = 9{,}3\ \mathrm{t}$$

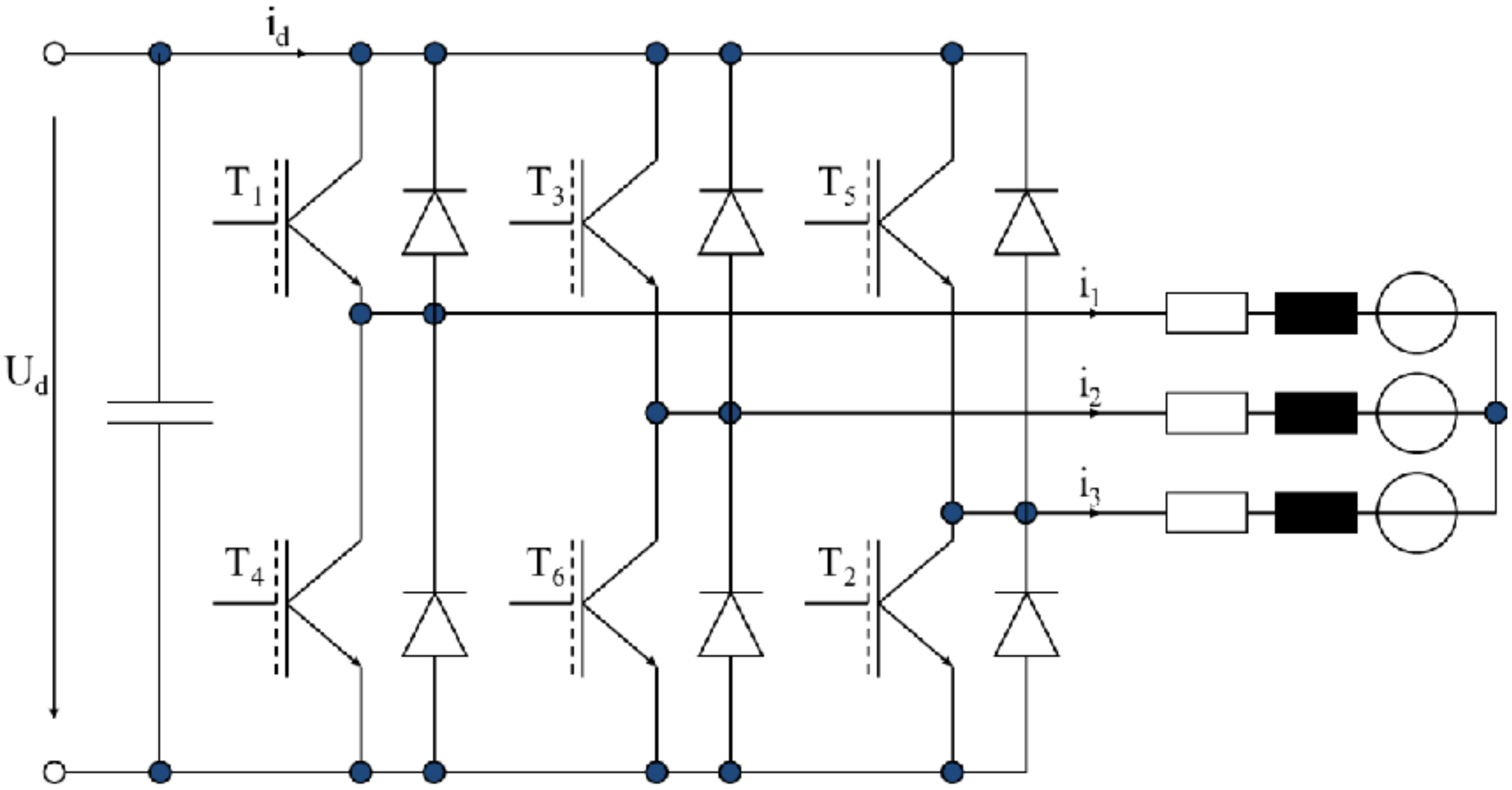
   $$J_{ges} = m_{ges} \cdot \left(\frac{D}{2}\right)^2 = 581\ \mathrm{kg\ m^2}$$

7. $M_{dyn,\max} = J_{ges} \cdot \dot{\omega} = J_{ges} \cdot \dfrac{a_{\max}}{D/2} = 5691{,}47\ Nm$

8. Auswahlkriterien: z. B.: Verschleiß (d. h. keine Gleichstrommaschine), Generatorbetrieb über längere Zeit (d. h. rückspeisefähiger Umrichter), Feldschwächung nicht notwendig, geringe Überlastfähigkeit, Kosten:
   Asynchron- oder PM-Synchronmaschine mit rückspeisefähigem Frequenzumrichter

Aufgabe 2:

1.



Bei Raumzeigermodulation bzw. überlagerter 3. Harmonischer ergibt sich aus der Nennbetriebsspannung:

$$U_{1N} = \frac{U_d}{\sqrt{2}} = 530\ \mathrm{V}$$

2. p = 2 (offensichtlich aus $n_N = 1500\ \mathrm{min}^{-1}$ und $f_{1N} = 51\ \mathrm{Hz}$)

$$I_{1N} = \frac{P_N}{\sqrt{3} \cdot U_{1N} \cdot \cos\varphi_N \cdot \eta_N} = \frac{P_N}{\sqrt{3} \cdot U_{1N} \cdot \cos\varphi_N \cdot \frac{p \cdot n_N}{f_{1N}}} = 118\ \mathrm{A}$$

3. Konstruktion: $\underline{I}_{1N} = I_{1N} \cdot e^{-j\arccos(\cos\varphi_N)} = 118\ \mathrm{A} \cdot e^{-j32°}$ nach Betrag und Phase einzeichen;

   Kreisradius $I_{WKipp} = I_{1N} \cdot \cos\varphi_N \cdot \frac{M_{Kipp,N}}{M_N} = 221\ \mathrm{A}$; Bemessungsschlupf:

$$s_N = 1 - \frac{p \cdot n_N}{f_{1N}} = 1{,}96\ \%$$

z. B. 50 A/cm:

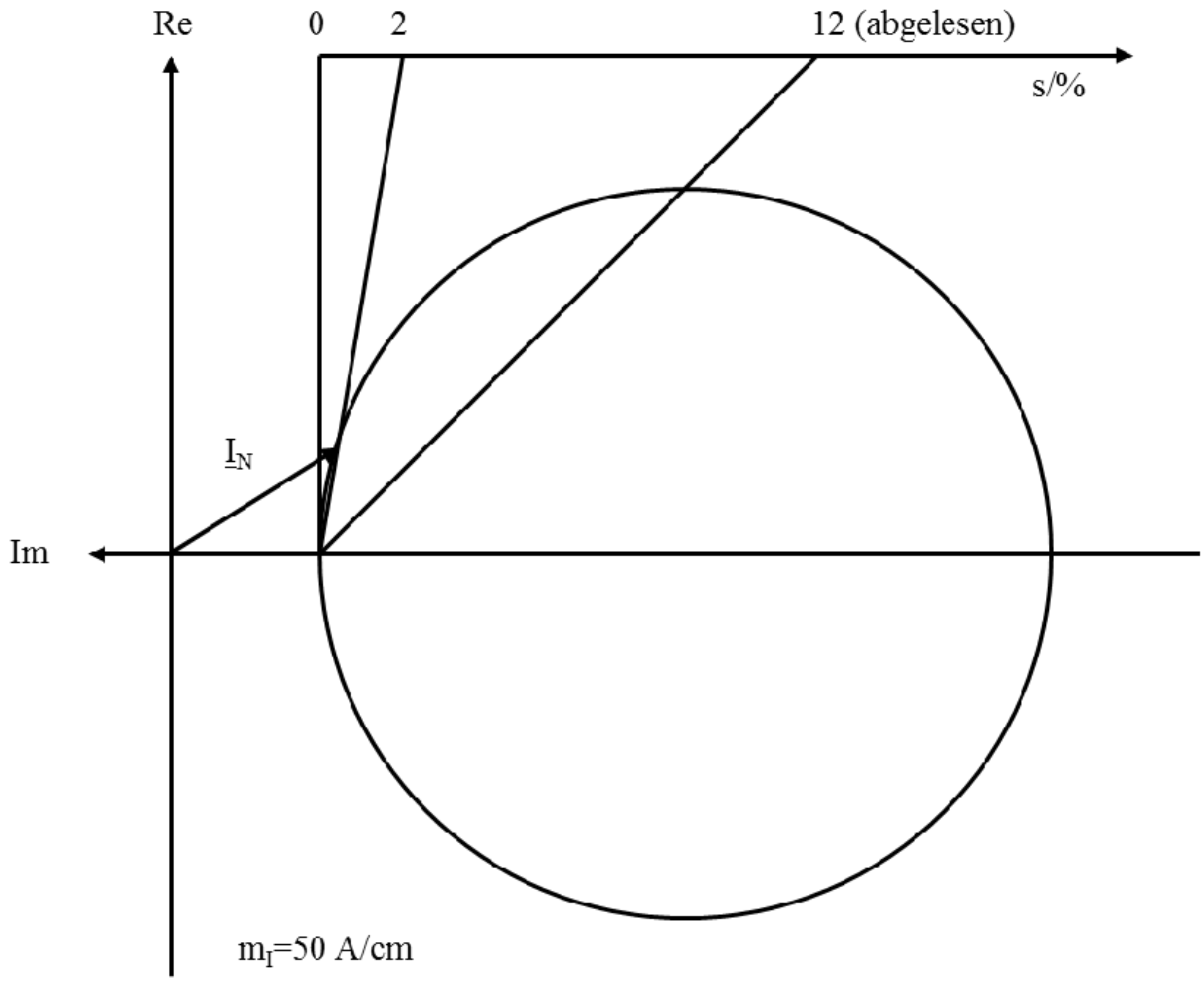


Abbildung 1: Beispiel

4. $s_{Kipp} = 2\,\% \cdot 6\text{ cm}/1\text{ cm} = 12\,\%$
5. $f_{Kipp} = s_{Kipp} \cdot f_{1N} = 6{,}12\, s^{-1}$ (Abgelesen)

$f_{Kipp} = s_{Kipp} \cdot f_{1N} = 4{,}15 s^{-1}$ (Berechnet)

$$f_{1,Brems} = f_{Kipp} + p \cdot n_{\max} = 139{,}5\ Hz \text{ (mit Abgelesenem Wert)}$$

$$f_{1,Brems} = f_{Kipp} + p \cdot n_{\max} = 137{,}5\ Hz \text{ (mit berechnetem Wert)}$$

$$M_{max,Brems} = \left(\frac{f_{1N}}{f_{1,Brems}}\right)^2 \cdot \frac{M_{Kipp,N}}{M_N} \cdot \frac{P_N}{2\pi \cdot n_N} = 168\text{ Nm (mit abgelesenem Wert)}$$

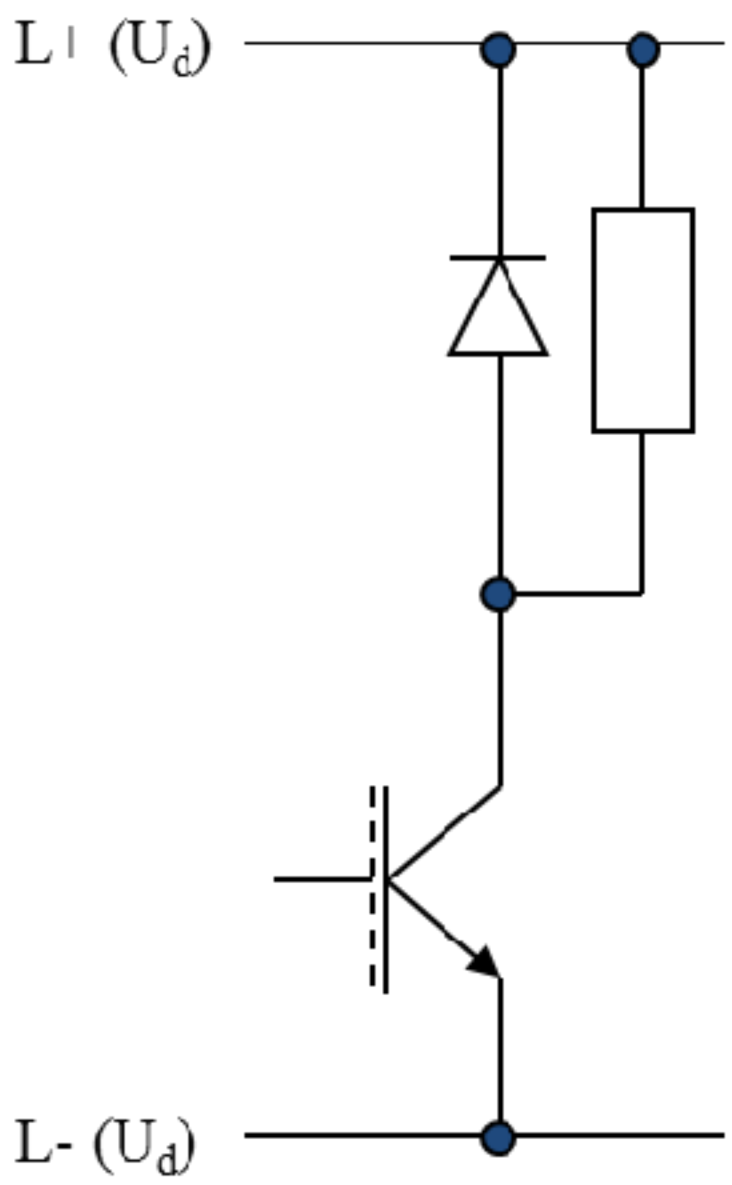
6. $M_{max}' = \left(\frac{U_{max}}{U_N}\right)^2 \cdot M_{max,Brems} = 242\text{ Nm}$

$$\Delta P_{max} = \left(\frac{U_{max}}{U_N}\right)^2 - 1 = 44\,\%$$

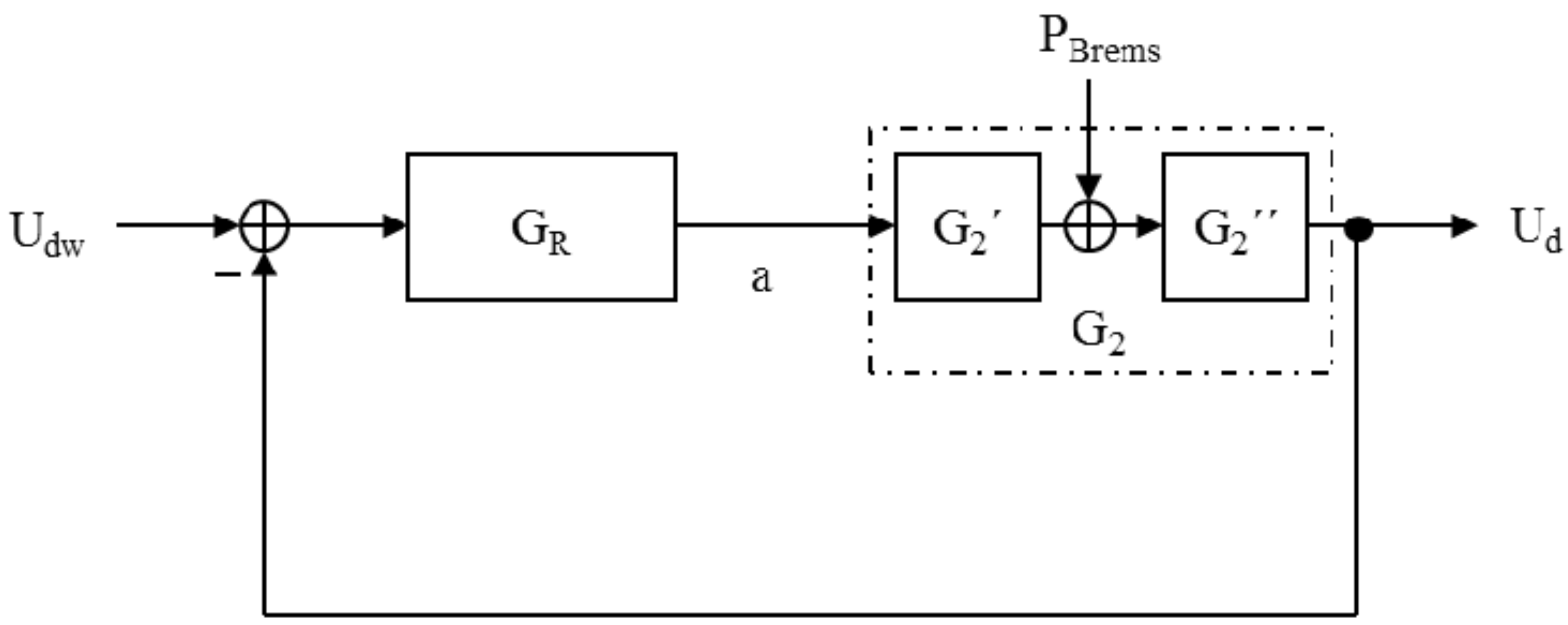
7. Skalierungsfaktor für das Diagramm: $m_I = \frac{\Psi_{1\max}}{\Psi_{1N}} = \frac{\frac{900\ \mathrm{V}}{139{,}5\ \mathrm{Hz}}}{\frac{750\ \mathrm{V}}{51\ \mathrm{Hz}}} \cdot m_{I,N} = 22\ \frac{\mathrm{A}}{\mathrm{cm}}$

   im Maximalpunkt: $I_{WKipp} = 7{,}6\,\mathrm{cm} \cdot \frac{22\ \mathrm{A}}{\mathrm{cm}} = 167\ \mathrm{A} > 118\ \mathrm{A}$, d. h. oberhalb des thermischen Dauerstroms => nur Kurzzeitbetrieb möglich

8. Bremschopper



9. Stellgröße: Schaltzustand bzw. Aussteuergrad des Transistors
Regelgröße: Spannung am DC-Kreis
Störgröße: Bremsleistung bzw. bei näherungsweise konstantem U_d Bremsstrom



Streckenmodell des Kondensators (nicht gefragt):

- konstanter Strom bzw. konstante Leistung am Zwischenkreiskondensator erhöht die Kondensatorspannung nach du/dt = p/i.

Bei eingeschaltetem Transistor:

- zusätzlich RC-Glied zum Abbau der Spannung.

mögliche Regler: am besten Zweipunkt-Hystereseregler, evtl. auch PI mit PWM

Aufgabe 3:

1. $$R_a = \frac{U_{aN} \cdot I_{aN} - P_N}{I_{aN}^2} = 1{,}19\,\Omega$$

$$T_a = \frac{L_a}{R_a} = 12{,}7\text{ ms}$$

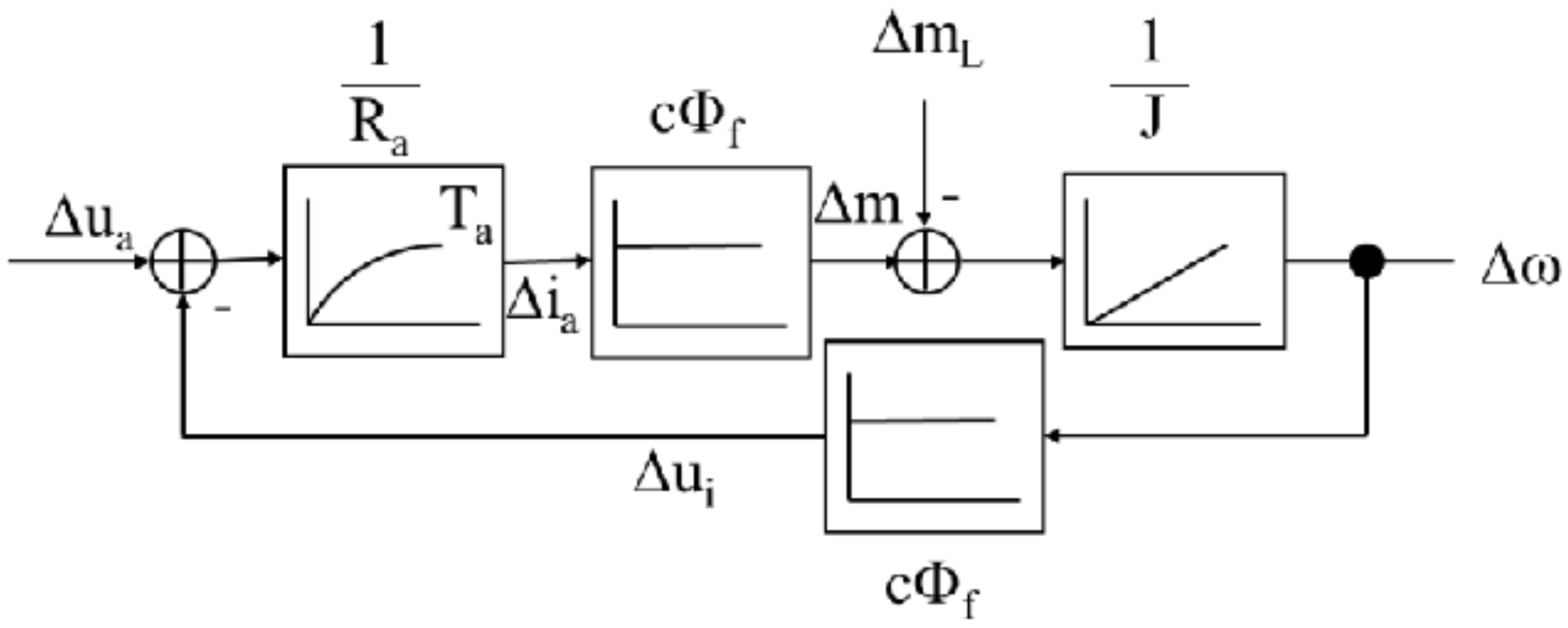
$$M_N = \frac{P_N}{2\pi \cdot n_N} = 19{,}1\text{ Nm}$$

$$c\phi = \frac{M_N}{I_{aN}} = \frac{P_N}{2\pi \cdot n_N \cdot I_{aN}} = 1{,}47Vs$$

$$T_m = \frac{R \cdot J}{(c\phi)^2} = 127ms >> T_a$$

Eine Kaskadenregelung ist sinnvoll, da $T_m >> T_a$ (Faktor 10) .

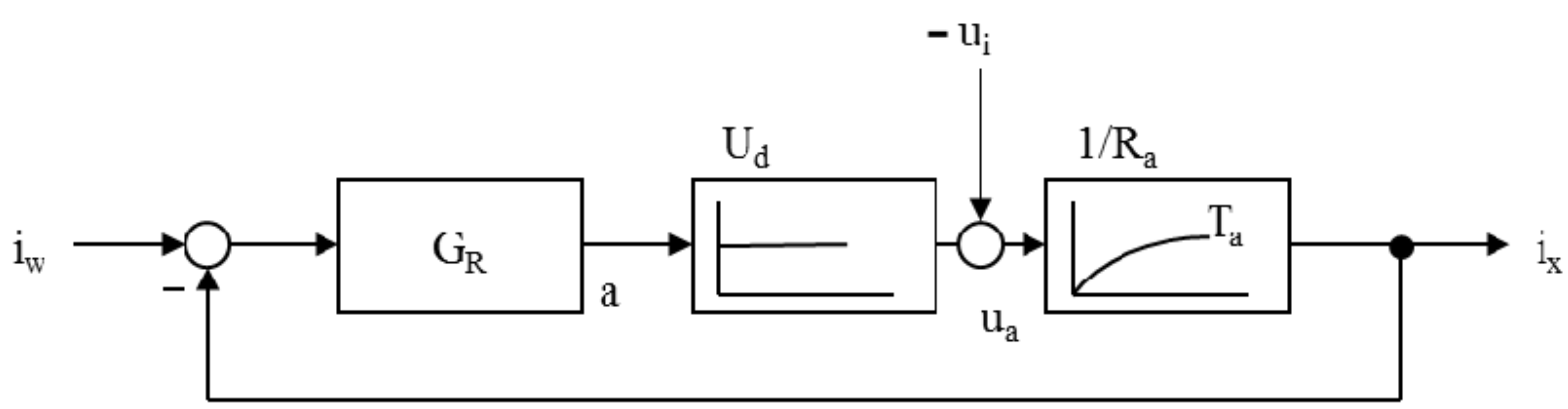
2.



$$\Delta I_a = (\Delta U_a - \Delta U_i) \cdot \frac{1}{R_a \cdot (1 + sT_a)} = \left(\Delta U_a - \frac{\Delta I_a \cdot (c\Phi_f)^2}{s \cdot J} \right) \cdot \frac{1}{R_a \cdot (1 + sT_a)}$$

$$\frac{\Delta I_a}{\Delta U_a} = \frac{s \cdot J}{R_a \cdot (1 + sT_a) \cdot s \cdot J + (c\Phi_f)^2} = \frac{1}{R_a} \cdot \frac{s \cdot T_m}{s^2 \cdot T_a \cdot T_m + s \cdot T_m + 1}$$

3.



Mögliche Reglertypen: P oder PI

Ein P-Regler erzeugt eine bleibende Regelabweichung bezüglich des Ankerstroms. Da aber übergeordnet die Drehzahl geregelt wird, ist eine (kleine) Regelabweichung des Stromes (in der inneren Kaskade) nicht kritisch. Ein P-Regler für den Ankerstrom wäre also ausreichend.

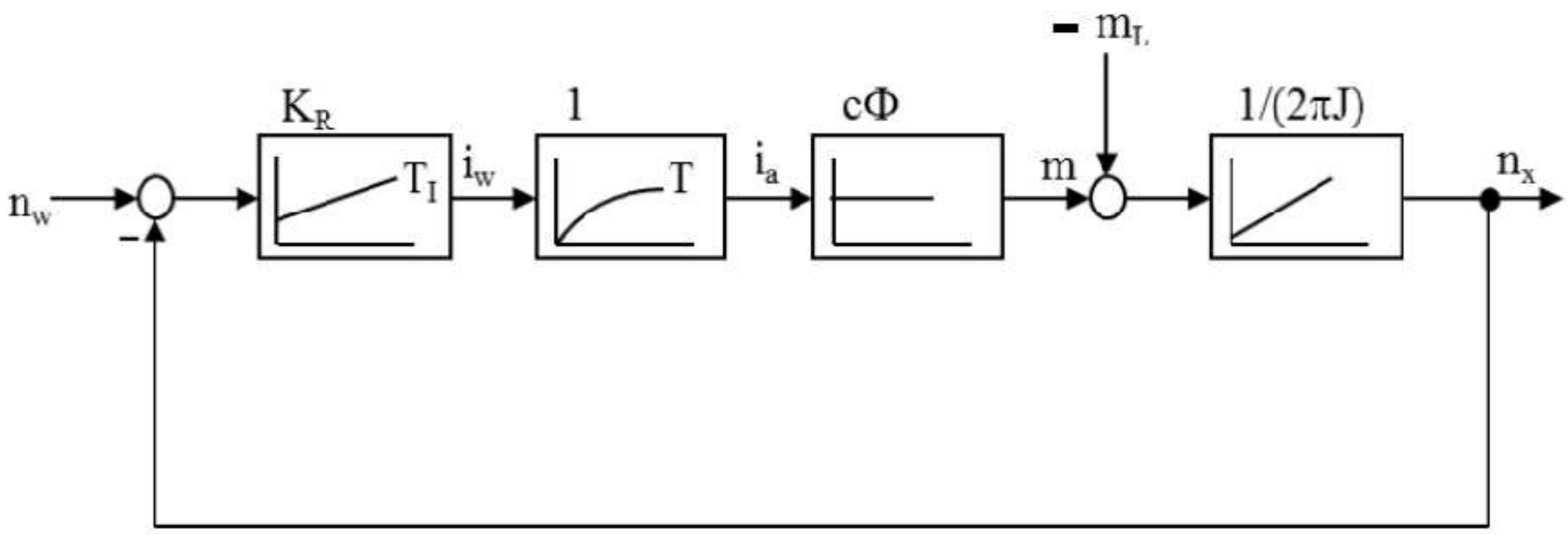
Ein PI-Regler für den Strom ist etwas aufwändiger, aber ebenfalls gut zu dimensionieren.

4. $G_o = \frac{K_R \cdot U_d}{R_a} \cdot \frac{1}{1+sT_a}$

$$G = \frac{\dfrac{1}{1+\dfrac{R_a}{K_R \cdot U_d}}}{1+s\cdot\left(\dfrac{T_a}{\dfrac{K_R \cdot U_d}{R_a}+1}\right)} \overset{!}{=} \frac{1}{1+sT}$$

$$\Rightarrow T \overset{!}{=} \left[\frac{T_a}{\dfrac{K_R \cdot U_d}{R_a}+1}\right] \Leftrightarrow K_R = \frac{(T_a - T)}{T}\cdot\frac{R_a}{U_d} = \frac{(12{,}7ms - 3ms)}{3ms}\cdot\frac{1{,}19\Omega}{1} = 3{,}84\left.\frac{1}{A}\right|_{U_d=1}$$

5.



6. z. B. symmetrisches Optimum

$$G_o = \frac{K_R \cdot (1+sT_I)}{sT_I}\cdot\frac{1}{(1+sT)}\cdot\frac{c\Phi}{s\cdot 2\pi J}$$

z. B.: $T_\Sigma = T = 3ms$

Wahl von $a=2$ für das Einschwingverhalten:

$T_I = a^2 \cdot T_\Sigma = 4 \cdot 3ms = 12ms$

$$K_R = \frac{1}{a \cdot V_s \cdot T_\Sigma} = \frac{2\pi J}{a \cdot c\Phi \cdot T_\Sigma} = \frac{2\pi \cdot 0{,}23kgm^2}{2 \cdot 1{,}47Vs \cdot 0{,}003s} = 163{,}8As$$

Wahl von $a=4$: $T_I = 48ms$ und $K_R = 81{,}9As$

7.

$$G_{Stör} = -\frac{1}{\pi J}\cdot\frac{s4T^2\cdot(1+sT)}{s^3\cdot 8\cdot T^3 + s^2\cdot 8\cdot T^2 + s\cdot 4\cdot T + 1}$$

$$= -1{,}38\cdot\frac{s\cdot 0{,}012sek\cdot(1+s\cdot 0{,}003sek)}{s^3\cdot 0{,}22\cdot 10^{-6}sek + s^2\cdot 0{,}72\cdot 10^{-6}sek + s\cdot 0{,}012sek + 1}$$

→stabil, da G_o stabil ist (offener Regelkreis des Stör- und Führungsverhaltens ist gleich)

8. Es ist mit einem Schwingen der Drehzahl zu rechnen, da das symmetrische Optimum nicht mehr erfüllt ist ($K_R \sim J$). Da im offenen Regelkreis G_o das Trägheitsmoment J im Nenner ist, wird durch Erhöhung von J die Durchtrittsfrequenz von G_o gesenkt, so dass auch die Phasenreserve kleiner wird.