



Elektrische Antriebstechnik

12.09.2014

Name:					Matrikelnummer:																								
<table border="1"> <tr> <td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td> </tr> </table>																				<table border="1"> <tr> <td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td> </tr> </table>									
Vorname:																													
<table border="1"> <tr> <td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td> </tr> </table>																													
Studiengang:					<input type="checkbox"/> Fachprüfung <input type="checkbox"/> Leistungsnachweis																								
Aufgabe:	1	2	3	4	Gesamt		Note																						
(Punkte)	(16)	(14)	(11)	(15)	(56)																								

Bearbeitungszeit: 120 Minuten

Zugelassene Hilfsmittel:

- eine selbsterstellte, handgeschriebene Formelsammlung (1 Blatt DIN A4, beidseitig beschrieben, keine Kopien oder Ausdrucke)
- ein nichtprogrammierbarer Taschenrechner ohne grafikfähiges Display
- Zeichenmaterialien (Zirkel, Geodreieck, Lineal, Stifte...)

Bitte beachten Sie:

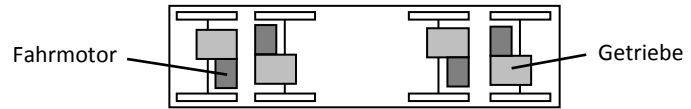
- Bitte Studenausweis mit Lichtbild bereitlegen!
- Bitte beschriften Sie jeden Klausurbogen mit Ihrem Namen und Ihrer Matrikelnummer. Benutzen Sie für jede Aufgabe einen neuen Klausurbogen. Verwenden Sie keine Bleistifte und keine roten Stifte.
- Bei Zahlenrechnungen sind die Maßeinheiten in jedem Schritt mitzuführen. Nichtbeachtung führt zu Punktabzug.
- Alle Lösungswege sind nachvollziehbar zu dokumentieren! Die Angabe eines Endergebnisses ohne erkennbaren Lösungsweg wird nicht gewertet.

Viel Erfolg!

Aufgabe 1: Antrieb einer Lokomotive
(16 Punkte)

Eine vierachsige Elektrolokomotive wird von vier Fahrmotoren angetrieben. Jede Achse ist dabei mit einem Fahrmotor über ein Getriebe mechanisch gekoppelt. Folgende Daten der Lokomotive sind bekannt:

v_{\max} in km/h	160
i_G	11,34
a_{\max} in m/s^2	0,9

Tabelle 1.1: Daten der Lokomotive

Abbildung 1.1: Antriebsstrang der Lokomotive

Weiterhin sind noch die Masse der Lokomotive (ohne Räder) $m_{\text{Lok}} = 80.000 \text{ kg}$, die Masse eines Rades $m_{\text{Rad}} = 300 \text{ kg}$ sowie der Radradius $r_{\text{Rad}} = 0,6 \text{ m}$ bekannt. Die eingesetzten Getriebe können als verlustfrei angenommen werden.

- 1.1 Nennen Sie zwei Parameter, die sich bei Fahrzeugen auf die Widerstandskraft auswirken und die durch konstruktive Maßnahmen beeinflusst bzw. minimiert werden können!
- 1.2 Die Lokomotive ist zunächst unbespannt unterwegs. Berechnen Sie die maximale Winkelgeschwindigkeit $\omega_{1\max}$ der Fahrmotoren sowie den translatorischen Anteil der kinetischen Energie W_{trans} , der bei maximaler Geschwindigkeit v_{\max} in der Lokomotive gespeichert ist.
- 1.3 Wie groß ist der Beitrag der rotierenden Räder zur kinetischen Energie $W_{\text{rot, Rad}}$ bei maximaler Geschwindigkeit v_{\max} ? Die geometrische Form des Rades kann dabei als Scheibe (Vollzylinder) betrachtet werden.
- 1.4 Nehmen Sie an, dass der in den Fahrmotoren gespeicherte, rotatorische Anteil der kinetischen Energie $W_{\text{rot, Mot}}$ genauso groß ist wie der der Räder $W_{\text{rot, Rad}}$. Wie groß ist dann das Massenträgheitsmoment J_1 eines Fahrmotors?
- 1.5 Die Trägheiten der Lokomotive und der Räder sollen in ihrer Wirkung auf die Fahrmotoren so umgerechnet werden, dass diese durch ein einziges Massenträgheitsmoment ersetzt werden, welches mit der Motordrehzahl rotiert. Wie groß ist dieses Ersatz-Massenträgheitsmoment J_2' für einen der vier Fahrmotoren? Nehmen Sie an, dass eine gleichmäßige Aufteilung dieses Massenträgheitsmoments auf alle Fahrmotoren gegeben ist.
- 1.6 Wie groß ist das Drehmoment $T_{1\max}$, das ein Fahrmotor maximal abgeben kann? Vernachlässigen Sie bis auf die Beschleunigungskräfte alle weiteren Widerstandskräfte.
- 1.7 Bei einer Fahrt mit Zugbespannung bei einer Geschwindigkeit von 148 km/h muss jeder der vier Fahrmotoren seine maximale Leistung von $P_{\max} = 700 \text{ kW}$ aufbringen. Wie groß sind in diesem Betriebspunkt das Motordrehmoment T_1 und die Motorwinkelgeschwindigkeit ω_1 ?
- 1.8 Bei welcher Winkelgeschwindigkeit ω_{1N} gehen die Motoren in den Flussschwäcbereich über und welches Drehmoment $T_{1\text{grenz}}$ können Sie bei Maximalgeschwindigkeit abgeben? Skizzieren Sie den Betriebsbereich eines Fahrmotors in Abbildung 1.2.

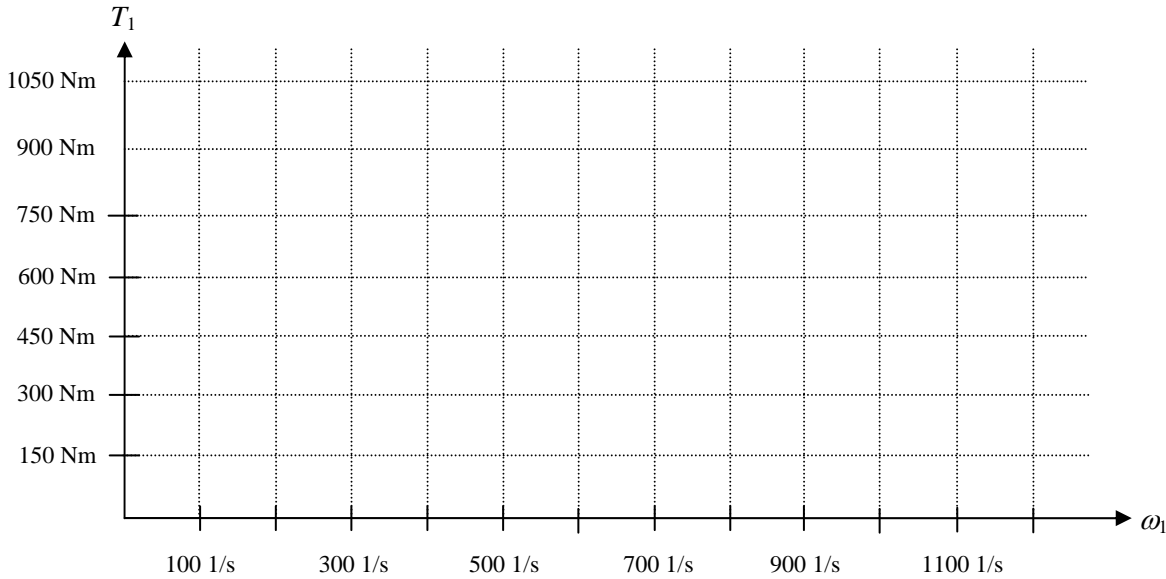


Abbildung 1.2: Drehzahl-Drehmoment-Diagramm für einen Fahrmotor

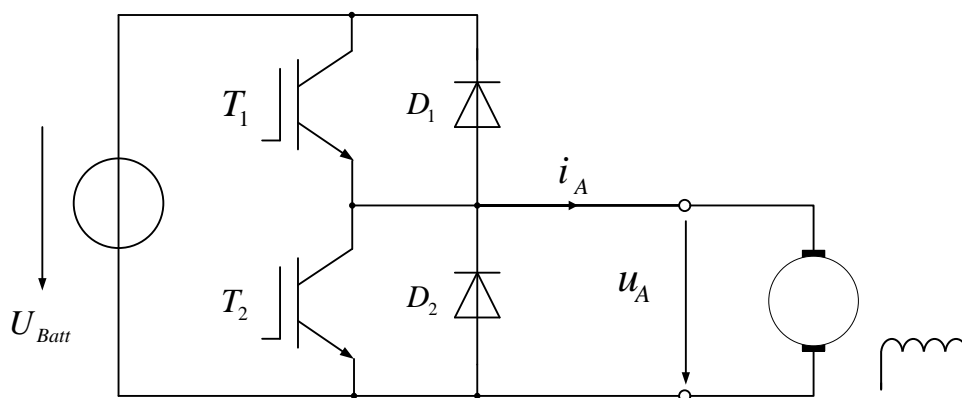
Aufgabe 2: Gleichstrommaschine
(14 Punkte)

Eine fremderregte Gleichstrommaschine hat folgende Daten.

Ankernennspannung U_{AN}	220 V
Bemessungsdrehmoment T_N	64 Nm
Ankerwicklungswiderstand R_A	0,182 Ω
Ankerinduktivität L_A	0,12 mH
Leerlaufdrehzahl n_0	1650 min^{-1}

- 2.1 Wie groß ist der Ankerstrom I_{AN} bei Belastung mit Bemessungsdrehmoment T_N ?
- 2.2 Welche Drehzahl n stellt sich bei halber Ankernennspannung und Belastung mit Bemessungsdrehmoment T_N ein?
- 2.3 Neben der fremderregten Gleichstrommaschine gibt es noch weitere Ausführungsformen dieses Maschinentyps. Nennen Sie zwei weitere Arten von Gleichstrommaschinen bzw. ihrer Schaltungsarten und geben Sie für jede Ausführungsart jeweils eine charakteristische Eigenschaft an.

Nun wird der Motor gemäß Abbildung 2.1 durch einen Transistorsteller aus einer Gleichspannungsquelle $U_{Batt} = 250 \text{ V}$ gespeist. **Der Transistorsteller wird als verlustfrei angenommen und alle ohmschen Widerstände werden vernachlässigt.** Die Schaltfrequenz des Transistorstellers beträgt 10 kHz.


Abbildung 2.1: Gleichstrommaschine mit Transistor-Steller

- 2.4 Erläutern Sie mit einer einfachen Skizze, in welchen Quadranten der Motor bezüglich des Drehmoments T und der Drehzahl n betrieben werden kann.

- 2.5** Welches Tastverhältnis D muss am Transistorsteller eingestellt werden, damit der Mittelwert der Spannung u_A der halben Ankernennspannung U_{AN} entspricht? Die Gleichstrommaschine wird weiterhin mit Bemessungsdrehmoment T_N belastet. Ermitteln Sie mit Hilfe des mittleren Ankerstroms $\bar{i}_A = I_{AN}$ und der Ankerinduktivität L_A den oberen und unteren Maximalwert i_{A0} und i_{Au} des Ankerstroms.
- 2.6** Zeichnen Sie den Verlauf des Ankerstroms i_A sowie des Mittelwerts \bar{i}_A über zwei Schaltperioden in das Zeitdiagramm in Abbildung 2.2 ein. Ergänzen Sie zusätzlich noch den Verlauf der Schaltzustände der Transistoren T_1 und T_2 .

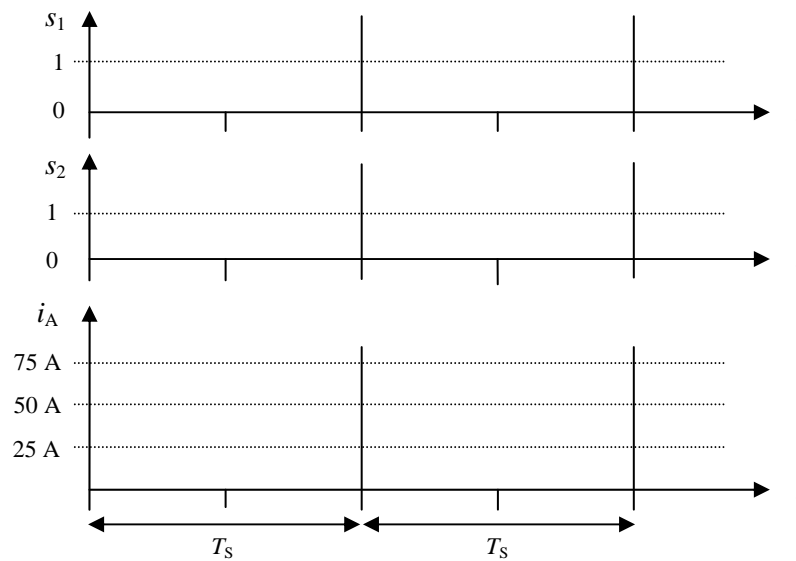


Abbildung 2.2: Zeitdiagramme

- 2.7** Die Gleichstrommaschine werde nun vom Transistorsteller mit Ankernennspannung U_{AN} versorgt. Auf welchen Wert muss der Erregerfluss ψ_E' abgesenkt werden, damit sich bei Ankernennstrom I_{AN} eine Drehzahl von $n = 1800 \frac{1}{\text{min}}$ einstellt? Welches Lastdrehmoment T_L muss dabei an der Motorwelle wirken, damit sich der geforderte Arbeitspunkt ($I_A = I_{AN}$; $n = 1800 \text{ min}^{-1}$) einstellt?

Aufgabe 3: Asynchronmaschine

(11 Punkte)

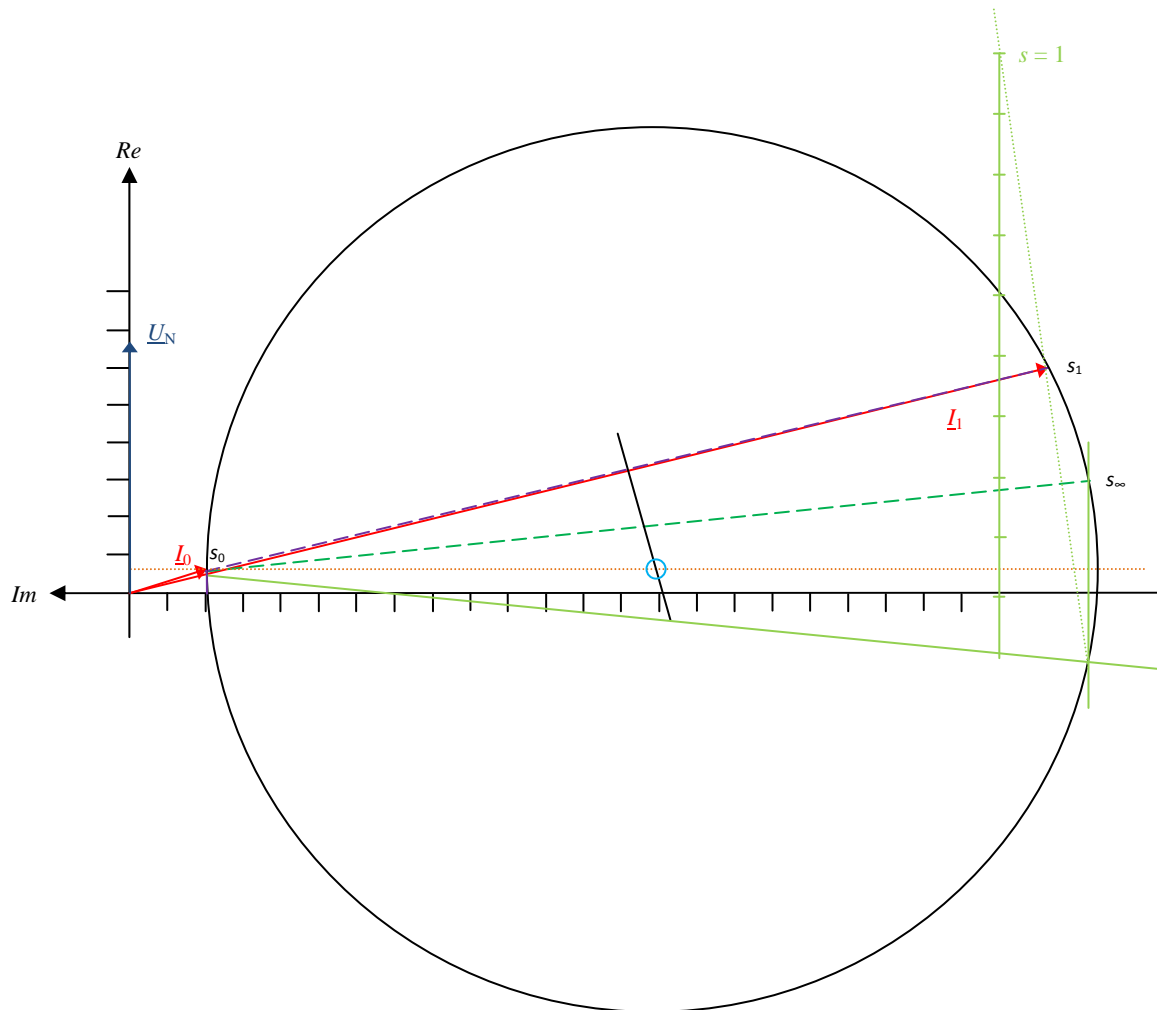
Gegeben ist eine in Stern geschaltete Asynchronmaschine mit den folgenden Daten:

$$s_N = 0,035$$

$$\eta_N = 0,822$$

$$p = 1$$

Desweiteren ist die Stromortskurve der Asynchronmaschine bei Betrieb mit Nennfrequenz gegeben. Die Achsen sind im 0,5 cm Raster skaliert.



Die zu verwendenden Maßstäbe sind wie folgt festgelegt:

Strommaßstab: $m_I = 2 \frac{A}{mm}$

Leistungsmaßstab: $m_P = 1320 \frac{W}{mm}$

Drehmomentmaßstab: $m_T = 4,2 \frac{Nm}{mm}$

- 3.1 Konstruieren Sie zunächst mit Hilfe der gegebenen Daten den Stromzeiger \underline{I}_N (bitte keinen roten Stift verwenden) in die vorgezeichnete Stromortskurve. Welchen Wert hat der Nennstrom und welcher Phasenverschiebungswinkel φ_N liegt im Nennpunkt vor? Wie groß ist das Nenndrehmoment T_N ? Ermitteln Sie diese Werte graphisch.
- 3.2 Ermitteln Sie aus obiger Stromortskurve die elektrische Nennleistung P_{elN} . Berechnen Sie mit Hilfe dieses Wertes die mechanische Nennleistung P_{mN} .
- 3.3 Mit welcher Drehzahl n_N rotiert die Asynchronmaschine im Bemessungspunkt?
- 3.4 Wie groß ist die Frequenz f_N des speisenden Drehstromnetzes?
- 3.5 Berechnen Sie den Wert der verketteten Spannung U_N , mit der die Asynchronmaschine versorgt wird.
- 3.6 Die Asynchronmaschine durchläuft während ihres Hochlaufs auf Nenndrehzahl den sogenannten Kippunkt. Wie groß ist die Drehzahl n_K im Kippunkt? Ermitteln Sie diesen Wert graphisch.

Aufgabe 4: Synchronmaschine

(15 Punkte)

In einem Kraftwerk wird ein Synchrongenerator eingesetzt. Die Maschine ist in der Schaltungsgruppe Stern geschaltet und wird übererregt betrieben. Für die Berechnungen kann die Maschine als verlustlos angenommen werden. Folgende Betriebs- und Maschinendaten sind bekannt:

Kippdrehmoment	T_K	250 kNm
Polpaarzahl	p	2
Netzfrequenz	f_N	50 Hz
Netzspannung	U_N	10 kV
Wirkleistung (Verbraucherzählpeilsystem)	P	-28 MW
Blindleistung (Verbraucherzählpeilsystem)	Q	-7 MVA

Tabelle 4.1: Bekannte Betriebsdaten des Synchrongenerators

- 4.1 Durch welche Größen kann die Blindleistungsabgabe und die Wirkleistungsabgabe einer Synchronmaschine beeinflusst werden? Erläutern Sie den Wirkungszusammenhang in Stichworten oder in ganzen Sätzen (bitte keine Formeln angeben).
- 4.2 Berechnen Sie mit Hilfe der gegebenen Daten die Scheinleistung S des Synchrongenerators. Wie groß ist der Strangstrom I_S und welchen Wert hat der Phasenverschiebungswinkel φ ?
- 4.3 Wie groß ist das antreibende Drehmoment T ? Ermitteln Sie den Lastwinkel ϑ . Beachten Sie, dass die Synchronmaschine als Generator arbeitet und übererregt betrieben wird!
- 4.4 Berechnen Sie den Kurzschlussstrom I_k . Zeichnen Sie das Zeigerdiagramm der Synchronmaschine für den gegebenen Betriebspunkt. Beginnen Sie zunächst mit der Konstruktion der Spannungszeiger \underline{U}_S und \underline{U}_P , auch wenn die Länge von \underline{U}_P noch nicht bekannt ist. Konstruieren Sie im nächsten Schritt die Stromzeiger \underline{I}_S und \underline{I}_k und ergänzen Sie den Stromzeiger \underline{I}_{k0} . Welcher Wert ergibt sich für \underline{I}_{k0} ? Verwenden Sie die folgenden Maßstäbe: $1000 \text{ V} \hat{=} 1 \text{ cm}$ und $500 \text{ A} \hat{=} 1 \text{ cm}$.
- 4.5 Berechnen Sie die Synchronreaktanz X_S der Synchronmaschine. Wie groß ist die Polradspannung U_P in dem betrachteten Betriebspunkt? Komplettieren Sie das Zeigerdiagramm aus Aufgabe (4.4) mit den Spannungszeigern \underline{U}_P und $\Delta\underline{U} = \underline{U}_S - \underline{U}_P$.
- 4.6 Die Wirkleistungsabgabe wird nun schrittweise auf null reduziert. Der Erregerstrom I_E sowie die Drehzahl n bleiben unverändert. Wie groß ist nun der Strangstrom I_S' und welcher Phasenverschiebungswinkel φ' besteht zwischen der Strangspannung und dem Strangstrom?

Lösung**Aufgabe 1)** Antrieb einer Lokomotive

- 1.1) Wirksame Querschnittfläche des Fahrzeugs A_F , Luftwiderstandsbeiwert c_W , Rollwiderstandsbeiwert c_r , Leermasse des Fahrzeugs m
[1 Punkt]

- 1.2) Maximale Winkelgeschwindigkeit des Motors und kinetische Energie bei maximaler Geschwindigkeit:

$$\omega_1 = i_G \cdot \omega_2 = i_G \cdot \frac{v}{r_{\text{Rad}}}$$

$$\omega_{1\text{max}} = i_G \cdot \omega_2 = i_G \cdot \frac{v_{\text{max}}}{r_{\text{Rad}}} = 11,34 \cdot \frac{\frac{160\text{m}}{3,6\text{ s}}}{0,6\text{ m}} = \underline{\underline{840,0 \frac{1}{\text{s}}}}$$

$$W_{\text{trans}} = \frac{1}{2} m \cdot v_{\text{max}}^2 = \frac{1}{2} \cdot (8 \cdot 300\text{ kg} + 80.000\text{ kg}) \cdot \left(44,44 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2 = \underline{\underline{81,366\text{ MJ}}}$$

[2 Punkte]

- 1.3) Rotatorische Energie, die in den Rädern bei Maximalgeschwindigkeit gespeichert ist:

$$\omega_{2\text{max}} = \frac{\omega_{1\text{max}}}{i_G} = \frac{840 \frac{1}{\text{s}}}{11,34} = 70,074 \frac{1}{\text{s}}$$

$$W_{\text{rot,Rad}} = 8 \cdot \frac{1}{2} J_{\text{Rad}} \omega_{2\text{max}}^2 = 4 \cdot \frac{1}{2} m_{\text{Rad}} r_{\text{Rad}}^2 \omega_{2\text{max}}^2 = 2 \cdot 300\text{ kg} \cdot (0,6\text{ m})^2 \left(70,074 \frac{1}{\text{s}}\right)^2 = \underline{\underline{1,185\text{ MJ}}}$$

[2 Punkte]

- 1.4) Massenträgheitsmoment des Motors:

$$W_{\text{rot,Mot}} = W_{\text{rot,Rad}}$$

$$4 \cdot \frac{1}{2} J_1 \omega_1^2 = 8 \cdot \frac{1}{2} J_{\text{Rad}} \omega_2^2$$

$$2 J_1 \omega_1^2 = 4 \cdot \frac{1}{2} m_{\text{Rad}} r_{\text{Rad}}^2 \omega_2^2$$

$$J_1 = \frac{m_{\text{Rad}} r_{\text{Rad}}^2 \omega_2^2}{\omega_1^2} = \frac{m_{\text{Rad}} r_{\text{Rad}}^2}{i_G^2} = \frac{2 \cdot 300\text{ kg} \cdot (0,6\text{ m})^2}{11,34^2} = \underline{\underline{0,84\text{ kgm}^2}}$$

[3 Punkte]

- 1.5) Wirksames Massenträgheitsmoment pro Fahrmotor:

$$J_2 = m_{\text{Lok}} \cdot r_{\text{Rad}}^2 + 8 \cdot \frac{1}{2} \cdot m_{\text{Rad}} \cdot r_{\text{Rad}}^2 = 29232 \text{ kgm}^2$$

$$J_2' = \frac{J_2}{4i_G^2} = \frac{29232 \text{ kgm}^2}{4 \cdot 11,34^2} = 56,83 \text{ kgm}^2$$

[2 Punkte]

- 1.6) Maximales Motordrehmoment:

$$T_{1\text{max}} = \frac{1}{4} \frac{T_{2\text{max}}}{i_G} = \frac{m \cdot a_{\text{max}} \cdot r_{\text{Rad}}}{4i_G} = \frac{(80.000 \text{ kg} + 8 \cdot 300 \text{ kg}) \cdot 0,9 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 0,6 \text{ m}}{4 \cdot 11,34} = \underline{\underline{980,95 \text{ Nm}}}$$

$$\text{Alternative Lösung: } T_{1\text{max}} = (J_1 + J_2') \alpha_{1\text{max}} = (J_1 + J_2') \frac{a_{\text{max}}}{r_{\text{Rad}}} i_G = 980,97 \text{ Nm}$$

[1 Punkt]

- 1.7) Maximale Leistung, Grenzdaten für Betriebsbereich des Motors:

$$P_{\text{max}} = T_1 \omega_1 \rightarrow T_1 = \frac{P_{\text{max}}}{\omega_1} = \frac{700 \text{ kW}}{\frac{v_{148}}{r_{\text{Rad}}} i_G} = \frac{700 \text{ kW} \cdot 0,6 \text{ m}}{\frac{148 \text{ m}}{3,6 \text{ s}} \cdot 11,34} = \underline{\underline{900,9 \text{ Nm}}}$$

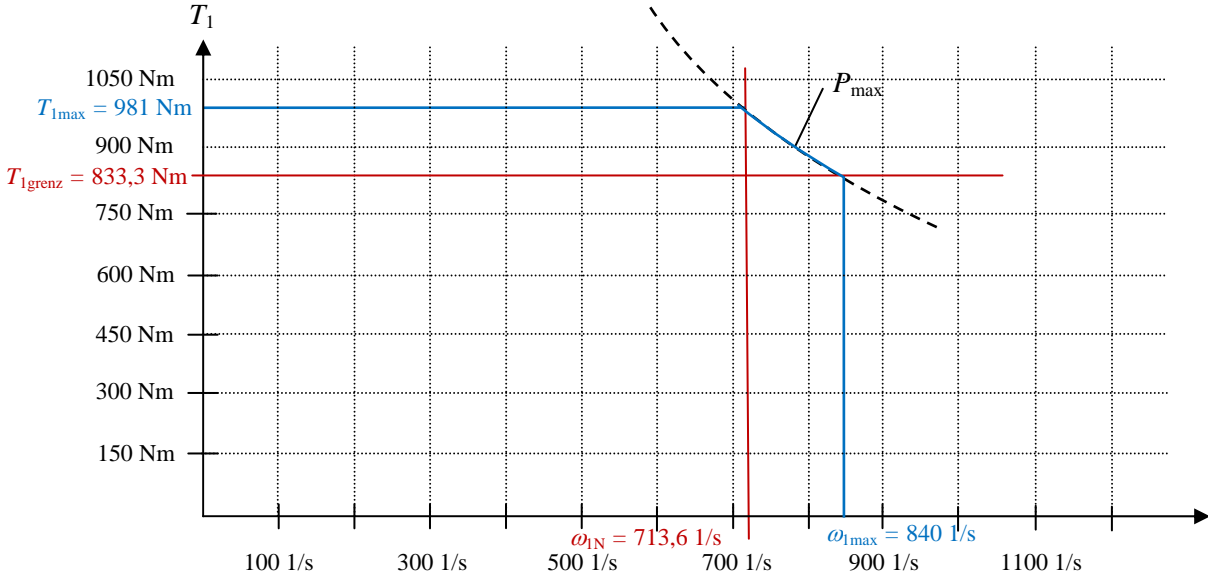
$$\omega_1 = \frac{v_{148}}{r_{\text{Rad}}} i_G = \frac{148 \text{ m}}{3,6 \text{ s}} \cdot 0,6 \text{ m} \cdot 11,34 = \underline{\underline{777 \frac{1}{\text{s}}}}$$

[1 Punkt]

- 1.8) Betriebsbereich eines Fahrmotors:

$$T_{1\text{grenz}} = \frac{P_{\text{max}}}{\omega_{1\text{max}}} = \frac{700 \text{ kW}}{840 \frac{1}{\text{s}}} = \underline{\underline{833,33 \text{ Nm}}}$$

$$\omega_{1\text{N}} = \frac{P_{\text{max}}}{T_{1\text{max}}} = \frac{700 \text{ kW}}{980,95 \text{ Nm}} = \underline{\underline{713,59 \frac{1}{\text{s}}}} \quad (\text{ab hier Übergang Flussschwächung})$$



[4 Punkte]

Aufgabe 2) Gleichstrommaschine

2.1) Ankernennstrom:

$$\psi'_{EN} = \frac{u_{AN}}{\omega_0} = \frac{220 \text{ V}}{\frac{1650}{60} 2\pi \frac{1}{s}} = \underline{\underline{1,273 \text{ Vs}}}$$

$$I_{AN} = \frac{T_N}{\psi'_{EN}} = \frac{64 \text{ Nm}}{1,273 \text{ Vs}} = \underline{\underline{50,27 \text{ A}}}$$

[2 Punkte]

2.2) Drehzahl bei halber Ankernennspannung:

$$\frac{U_{AN}}{2} = R_A I_{AN} + \omega \cdot \psi'_{EN} \rightarrow \omega = \frac{\frac{U_{AN}}{2} - R_A I_{AN}}{\psi'_{EN}} = \frac{110 \text{ V} - 0,182 \Omega \cdot 50,27 \text{ A}}{1,273 \text{ Vs}} = 79,22 \frac{1}{s} \rightarrow n = \underline{\underline{756 \frac{1}{\text{min}}}}$$

[1 Punkt]

2.3) Weitere Arten von Gleichstrommaschinen:

- Permanenterrregte Gleichstrommaschine:

=> magnetischer Fluss nicht veränderbar / kein Flusswächbetrieb möglich

=> Gefahr der Entmagnetisierung durch hohe Ströme

- Reihenschluss-Gleichstrommaschine:

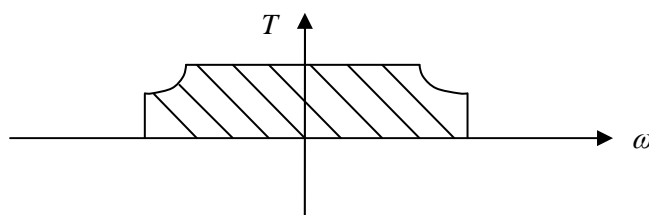
=> hohes Anlaufdrehmoment

=> Gefahr des Durchgehens bei Entlastung der Maschine

[2 Punkte]

2.4) Betriebsbereiche der Gleichstrommaschine mit Transistorsteller:

Ankerstrom kann in beide Richtungen fließen; Ankerspannung kann nur positive Werte annehmen => Betrieb nur im ersten und zweiten Quadranten möglich


[2 Punkte]

2.5) Tastverhältnis für halbe Ankernennspannung und Stromrippl:

$$D = \frac{U_A}{U_{\text{Batt}}} = \frac{110 \text{ V}}{250 \text{ V}} = \underline{\underline{0,44}}$$

$$i_{\text{Ao}} = i_{\text{Au}} + \frac{U_{\text{Batt}} - R_A I_{\text{AN}} - U_i}{L_A} \frac{D}{f_S} = i_{\text{Au}} + \frac{250 \text{ V} - 0,182 \Omega \cdot 50,27 \text{ A} - 1,273 \text{ Vs} \cdot 79,22 \frac{1}{\text{s}}}{0,00012 \text{ H}} \cdot \frac{0,44}{10.000 \text{ Hz}} = i_{\text{Au}} + 51,33 \text{ A}$$

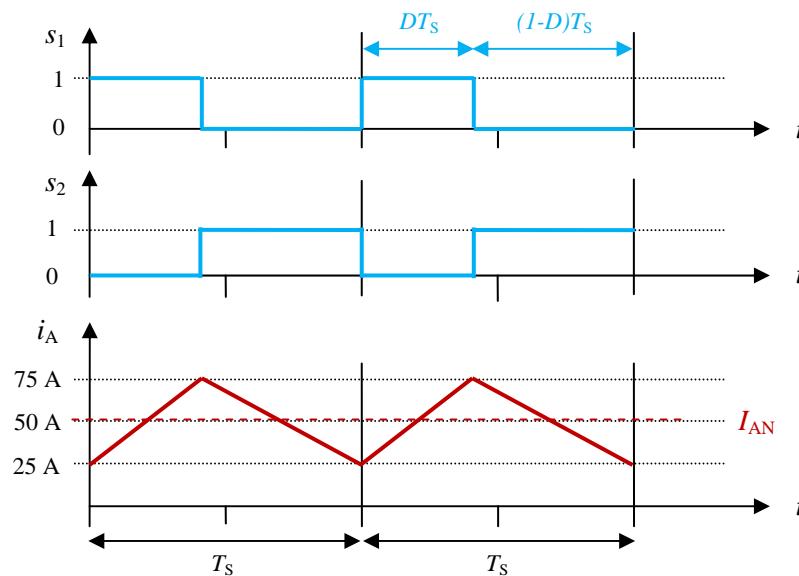
$$\Delta i_A = i_{\text{Ao}} - i_{\text{Au}} = 51,33 \text{ A}$$

$$i_{\text{Au}} = I_{\text{AN}} - 0,5 \Delta i_A = 50,27 \text{ A} - 0,5 \cdot 51,33 \text{ A} = \underline{\underline{24,60 \text{ A}}}$$

$$i_{\text{Ao}} = I_{\text{AN}} + 0,5 \Delta i_A = 50,27 \text{ A} + 0,5 \cdot 51,33 \text{ A} = \underline{\underline{75,94 \text{ A}}}$$

[3 Punkte]

2.6) Verlauf von Ankerstrom und Schaltfunktion der Transistoren:



[2 Punkte]

2.7) Reduzierter Erregerfluss und zugehöriges Lastdrehmoment:

$$U_{\text{AN}} = R_A I_{\text{AN}} + \omega \cdot \psi'_E \rightarrow \psi'_E = \frac{U_{\text{AN}} - R_A I_{\text{AN}}}{\omega} = \frac{220 \text{ V} - 0,182 \Omega \cdot 50,27 \text{ A}}{\frac{1800}{60} \cdot 2\pi \frac{1}{\text{s}}} = \underline{\underline{1,118 \text{ Vs}}}$$

$$T_{\text{max}} = \psi'_E \cdot I_{\text{AN}} = 1,118 \text{ Vs} \cdot 50,27 \text{ A} = \underline{\underline{56,23 \text{ Nm}}}$$

[2 Punkte]

Aufgabe 3) Asynchronmaschine

3.1) Konstruktion des Nennstromzeigers:

Mit Hilfe des Nennschlupfes und der vorgezeichneten Schlupfgeraden kann der Endpunkt des Stromzeigers ermittelt werden.

$$I_N = 29,8 \text{ mm} \cdot 2 \frac{\text{A}}{\text{mm}} = \underline{\underline{59,6 \text{ A}}}$$

$$\varphi_N = 30^\circ$$

$$T_N = 22,0 \text{ mm} \cdot 4,2 \frac{\text{Nm}}{\text{mm}} = \underline{\underline{92,4 \text{ Nm}}}$$

[3 Punkte]

3.2) Elektrische und mechanische Nennleistung:

$$P_{eIN} = 26 \text{ mm} \cdot 1320 \frac{\text{W}}{\text{mm}} = \underline{\underline{34,38 \text{ kW}}} \quad P_{mN} = n_N \cdot P_{eIN} = \underline{\underline{28,26 \text{ kW}}}$$

[2 Punkte]

3.3) Nenndrehzahl:

$$n_N = \frac{P_{mN}}{2\pi \cdot T_N} = \frac{28,26 \text{ kW}}{2\pi \cdot 92,4 \text{ Nm}} = 48,68 \frac{1}{\text{s}} \Rightarrow n_N = \underline{\underline{2920 \frac{1}{\text{min}}}}$$

[1 Punkt]

3.4) Netzfrequenz:

$$\omega_{RSN} = \frac{1}{p} (1 - s_N) \omega_S$$

$$n_N = \frac{1}{p} (1 - s_N) f_N \rightarrow f_N = \frac{n_N p}{1 - s_N} = \frac{48,68 \frac{1}{\text{s}} \cdot 1}{1 - 0,035} = 50,45 \text{ Hz} \approx \underline{\underline{50 \text{ Hz}}}$$

[1 Punkt]

3.5) Netzspannung:

$$P_{eIN} = 3 \cdot U_{N,\text{Strang}} \cdot I_N \cdot \cos(\varphi_N)$$

$$U_{N,\text{Strang}} = \frac{P_{eIN}}{3 \cdot I_N \cdot \cos(\varphi_N)} = \frac{34,38 \text{ kW}}{3 \cdot 59,6 \text{ A} \cdot \cos(30^\circ)} = 222,0 \text{ V} \approx 220 \text{ V}$$

$$U_N = \sqrt{3} U_{N,\text{Strang}} = \sqrt{3} \cdot 220 \text{ V} = \underline{\underline{380 \text{ V}}}$$

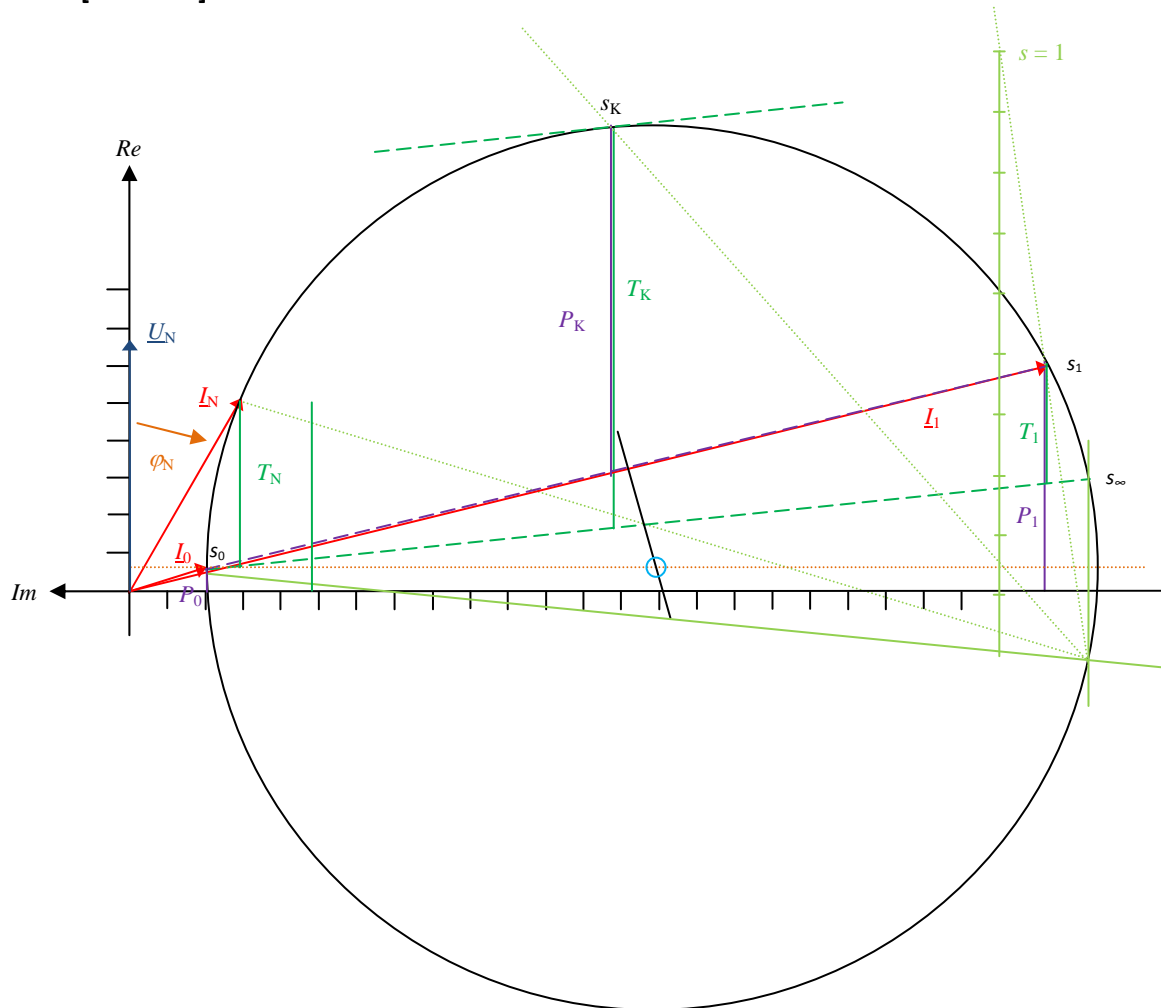
[2 Punkte]

3.6) Drehzahl im Kippunkt:

$$n_K = \frac{P_{mK}}{2\pi \cdot T_K} = \frac{59,5 \text{ kW}}{2\pi \cdot 222,18 \text{ Nm}} = \underline{\underline{2557,3 \frac{1}{\text{min}}}}$$

Oder alternativ: $n_K = 60 \frac{1}{p} (1 - s_K) f_N = 60(1 - 0,155)50\text{Hz} = \underline{\underline{2535 \frac{1}{\text{min}}}}$

[2 Punkte]



Aufgabe 4) Synchronmaschine

4.1) Theoriefrage:

Die **Blindleistungsabgabe** wird über den Erregerstrom eingestellt bzw. gesteuert.

Die **Wirkleistungsabgabe** ergibt sich durch die an der Motorwelle mechanisch eingebrachte Leistung (Produkt aus antreibendem Drehmoment und der Drehzahl).

[2 Punkte]

4.2) Scheinleistung, Strangstrom und Phasenverschiebungswinkel:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} = \sqrt{(-28 \text{ MW})^2 + (-7 \text{ MVA})^2} = \underline{\underline{28,86 \text{ MVA}}}$$

$$I_S = \frac{S}{\sqrt{3}U_N} = \frac{28,86 \text{ MVA}}{\sqrt{3} \cdot 10.000 \text{ V}} = \underline{\underline{1,67 \text{ kA}}}$$

$$P = S \cdot \cos(\varphi) \rightarrow \varphi = \arccos\left(\frac{P}{S}\right) \cdot \text{sign}\left(\frac{Q}{S}\right) = \arccos\left(\frac{-28 \text{ MW}}{28,86 \text{ MVA}}\right) (-1) = \underline{\underline{-165,98^\circ}}$$

[3 Punkte]

4.3) Drehmoment und Lastwinkel:

$$T = \frac{P_m}{\omega_m} = \frac{-28 \text{ MVA}}{2\pi \cdot 50 \text{ Hz}/2} = \underline{\underline{-178,25 \text{ kNm}}}$$

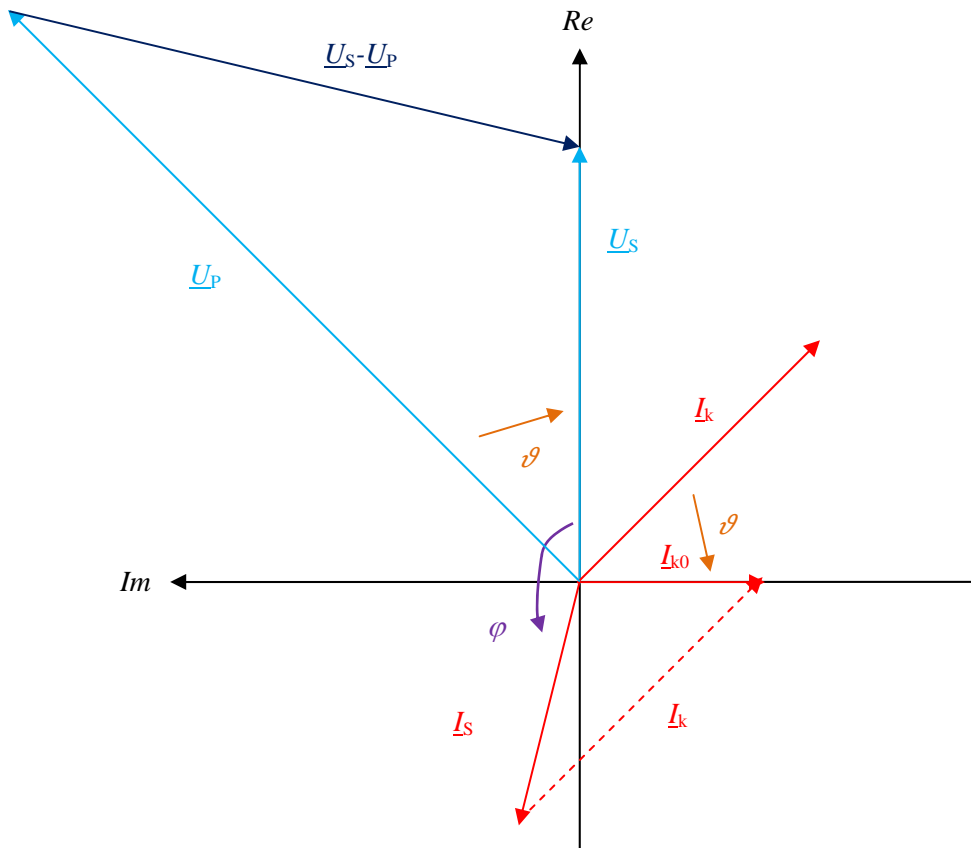
$$\vartheta = \arccos\left(\frac{T}{T_k}\right) = \arccos\left(\frac{-178,25 \text{ kNm}}{250 \text{ kNm}}\right) = \underline{\underline{-45,48^\circ}}$$

[2 Punkte]

4.4) Ströme und Zeigerdiagramm:

$$I_k = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot U_N \cdot \sin(\vartheta)} = \frac{-28 \text{ MW}}{\sqrt{3} \cdot 10.000 \text{ V} \cdot \sin(-45,48^\circ)} = \underline{\underline{2267 \text{ A}}}$$

ZD:



Aus ZD: $I_{k0} = \underline{\underline{1,225 \text{ kA}}}$

[5 Punkte]

4.5) Polradspannung und Synchronreaktanztanz:

$$X_S = \frac{U_S}{I_{k0}} = \frac{10.000 \text{ V}}{1225 \text{ A}} = \underline{\underline{4,71 \Omega}}$$

$$U_P = X_S I_k = 4,71 \Omega \cdot 2267 \text{ A} = \underline{\underline{10677 \text{ V}}}$$

Aus Zeigerdiagramm: $\Delta U \approx 7740 \text{ V}$

[2 Punkte]

4.6) Strangstrom und Phasenverschiebungswinkel ohne Wirkleistungsabgabe:

$$I'_S = \frac{S}{\sqrt{3} \cdot U_N} = \frac{Q}{\sqrt{3} \cdot U_N} = \frac{7 \text{ MVA}}{\sqrt{3} \cdot 10.000 \text{ V}} = \underline{\underline{404,1 \text{ A}}}$$

$$\varphi' = \arccos\left(\frac{P}{S}\right) = \arccos\left(\frac{0 \text{ MW}}{7 \text{ MVA}}\right) = \underline{\underline{-90^\circ}}$$

[1 Punkt]