

### Lösungen zu den Rechen-Aufgabenteilen der Klausur Wintersemester 09/10 (Bachelor)

1.3 $I_{f,N} = 1 \text{ A}$ $U_{i,N} = 146,6 \text{ V}$ $U_{a,N} = 156,6 \text{ V}$ $P_{\text{mech},N} = 14661 \text{ W}$ $\eta_N = 0,92$	2.4 $s_N = 0,05$ $M_N = 67 \text{ Nm}$ $P_{\delta,N} = 10526 \text{ W}$ $I_{s,N} = 18,3 \text{ A}$ $P_{vr,N} = 526,3 \text{ W}$ $\eta_N = 0,95$	3.3 $M_N = 551,3 \text{ Nm}$ $\vartheta_N = 30^\circ$ $I_{s,N} = 144,3 \text{ A}$ $P_{el,N} = 86,6 \text{ kW}$
1.4 $n^* = 1509 \text{ min}^{-1}$ $M^* = -145,5 \text{ Nm}$ $P_{\text{mech}}^* = -23000 \text{ W}$	2.5 $s_k = 0,09\bar{3}$ $M_k = 80,4 \text{ Nm}$	3.4 $\vartheta_k = 90^\circ$ $M_k = 1102,6 \text{ Nm}$
	2.6 $M_A = 14,89 \text{ Nm}$	

### Lösungen zu den Rechen-Aufgabenteilen der Klausur Sommersemester 2009 (Bachelor)

1.4 $M_N = 33,6 \text{ Nm}$ $P_{\text{mech},N} = 6333 \text{ W}$ $P_{el,N} = 6600 \text{ W}$ $\eta_N = 0,96$ $R_a = 0,66 \Omega$	2.4 $p = 2$ $s_N = 0,0426$	3.3 ja, da $U_{p,N} > U_s$
		3.4 $M_k = 24,1 \text{ Nm}$
1.5 $U_a = 13,3 \text{ V}$	2.5 $M_N = 19,95 \text{ Nm}$ $s_k = 0,25$ $M_k = 60,15 \text{ Nm}$ $M_A = 28,3 \text{ Nm}$	3.5 $\vartheta = 29,8^\circ$ $I_s = 5,46 \text{ A}$ $\varphi = 6,1^\circ$ $P_{el} = 3769 \text{ W}$
1.6 $U_f = 165 \text{ V}$	2.6 $P_{\delta,N} = 3133,7 \text{ W}$ $P_{vr,N} = 133,7 \text{ W}$	

**Lösungen zu den Rechen-Aufgabenteilen der Klausur Wintersemester 10/11 (Bachelor)**

<p>1.4</p> $P_{mech,N} = 17153 \text{ W}$ $P_{el,N} = 18056 \text{ W}$ $I_{a,N} = 82,1 \text{ A}$ $U_{i,N} = 209 \text{ V}$	<p>2.3</p> $n_0 = 1000 \text{ min}^{-1}$	
<p>1.5</p> $M_d' = 0,71 \text{ H}$ $R_a = 0,134 \Omega$	<p>2.4</p> $n_N = 960 \text{ min}^{-1}$ $M_N = 179,05 \text{ Nm}$ $P_{vr,N} = 750 \text{ W}$ $\eta_N = 0,96$	<p>3.5</p> übererregt, da $U_p > U_s$ und $I_s$ gegenüber $U_s$ voreilend
<p>1.6</p> $U_i^* = 104,5 \text{ V}$ $I_a^* = 164,2 \text{ A}$ $U_a^* = 126,5 \text{ V}$	<p>2.5</p> $s_k = 0,165$ $M_k = 391 \text{ Nm}$	<p>3.6</p> $I_f = 0,54 I_{f,N}$

**Lösungen zu den Rechen-Aufgabenteilen der Klausur Sommersemester 2010 (Bachelor)**

<p>1.4</p> $M_N = 127,3 \text{ Nm}$ $U_{i,N} = 320 \text{ V}$	<p>2.4</p> $P_{\delta,N} = 35888 \text{ W}$ $P_{mech,N} = 34453 \text{ W}$ $n_N = 960 \text{ min}^{-1}$ $M_N = 342,7 \text{ Nm}$ $\eta_N = 0,96$	<p>3.4</p> $n_0 = 100 \text{ min}^{-1}$ <p>3.5</p> $\vartheta_N = 23^\circ$
<p>1.5</p> $M_d' = 5,09 \text{ H}$ $R_a = 3,2 \Omega$ $R_f = 400 \Omega$ $\eta_N = 0,77$	<p>2.5</p> $s_k = 0,09$ $M_k = 461,7 \text{ Nm}$ $M_A = 82,4 \text{ Nm}$	<p>3.6</p> $I_{s,N} = 40,91 \text{ A}$ $M_G = 2706 \text{ Nm}$
<p>1.6</p> $U_f = 200 \text{ V}$	<p>2.6</p> Faktor 3	<p>3.7</p> $P_{el,N} = 28350 \text{ W}$

### Bachelorprüfung im Wintersemester 2010/11

## Grundlagen der elektrischen Energietechnik

1. Teil: Hochspannungstechnik und Energieübertragung
2. Teil: Elektromechanische Energieumformung
3. Teil: Grundlagen der Leistungselektronik

### Allgemeine Hinweise:

Zur Bearbeitung der Aufgaben 3 Klausurteile stehen insgesamt drei Stunden (180 Minuten) zur Verfügung.

Es sind **alle Unterlagen** sowie ein **Taschenrechner** (auch programmierbare) zugelassen.

Bei der Lösung der Aufgaben sind die einzelnen Lösungswege **klar** zu dokumentieren. Eine Aufgabe kann **nicht** gewertet werden, wenn mehrere Lösungswege mit unterschiedlichen Ergebnissen angeboten werden!

Bitte halten Sie einen Ausweis mit Lichtbild und ihren Studentenausweis bereit.

Die Termine der mündlichen Nachprüfungen werden durch Aushang bekannt gegeben.

**Bitte tragen Sie auf jedes Blatt oben rechts Ihren Vor- und Zunamen ein.**

Wir wünschen Ihnen einen klaren Kopf und viel Erfolg!!!

## Bachelorprüfung im Wintersemester 2010/11

### Grundlagen der elektrischen Energietechnik

Name:

Vorname:

Matrikelnummer:

Ich bin damit einverstanden, dass **mein Prüfungsergebnis im Internet** unter der PIN-Nummer \_\_\_\_\_ veröffentlicht wird.

Unterschrift

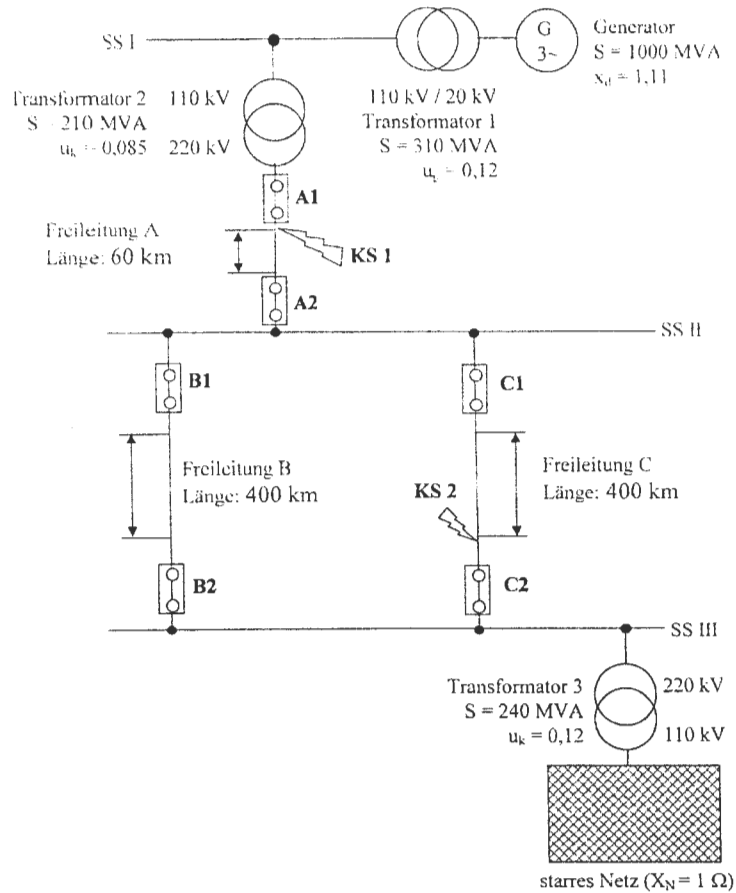
1. Teil	Punkte		
1. Aufgabe			
2. Aufgabe			
Summe			

2. Teil	Punkte		
1. Aufgabe			
2. Aufgabe			
3. Aufgabe			
Summe			

3. Teil	Punkte		
1. Aufgabe			
2. Aufgabe			
3. Kurzfragen			
Summe			

## 1. Teil: Hochspannungstechnik und Energieübertragung

### 1. Aufgabe:



In einem Auszug aus einem Übertragungsnetz sind einige Fehlerfälle zu betrachten. Alle Querglieder und Verluste sollen hierbei vernachlässigt werden. Alle Schalter sind geschlossen.

Der Induktivitätsbelag jeder dargestellten Freileitung ist  $\omega L' = 0,29 \Omega/\text{km}$ .

- Zeichnen Sie das einphasige Ersatzschaltbild des abgebildeten Netzteils. Berechnen Sie die Ersatzreaktanzen bezogen auf 220 kV.
- Bestimmen Sie für einen auftretenden Kurzschluss 1 (Stelle KS 1) die notwendige Abschaltleistung des Schalters A1.
- Bestimmen Sie für einen auftretenden Kurzschluss 2 (Stelle KS 2) die notwendige Abschaltleistung des Schalters C1.



**2. Aufgabe:**

Eine russische Drehstrom-Freileitung transportiert elektrische Energie bei einer Nennspannung von 1150 kV (50 Hz) über eine Strecke von etwa 1300 km. Die natürliche Leistung der Übertragungsstrecke ist etwa 5500 MW. Die Freileitung speist in ein starres Netz ein und hat die Leitungsbeläge  $\omega L' = 0,42 \Omega/\text{km}$  und  $\omega C' = 6 \cdot 10^{-6} \text{ S/km}$ . Die ohmschen Anteile werden auf Grund der Spannungshöhe vernachlässigt.

- a) Welcher Strom fließt in den Phasenleitern der Freileitung, wenn sie mit ihrer natürlichen Leistung betrieben wird? Wie groß ist der Wellenwiderstand der Leitung?
- b) Zur Änderung der natürlichen Leistung wird die Leitung in der Mitte mit einer Kapazität von  $7,2 \mu\text{F}$  pro Phase längskompensiert. Welcher Leitungswinkel stellt sich ein, wenn die abgegebene Wirkleistung bei Nennspannung 5500 MW entspricht?  
Zeichnen Sie zunächst das  $\pi$ -Ersatzschaltbild! Für ein Zeigerdiagramm zur Lösung benutzen Sie bitte den Maßstab  $100 \text{ kV} \triangleq 1 \text{ cm}$  und  $1 \text{ kA} \triangleq 1 \text{ cm}$ .
- c) Wie groß ist die natürliche Leistung der nach b.) kompensierten Freileitung?

**2. Teil: Elektromechanische Energieumformung****1. Aufgabe: Gleichstrommaschine**

- 1.1 Welche Funktion haben die Wendepolwicklung und die Kompensationswicklung beim Betrieb einer Gleichstrommaschine? [2 P]
- 1.2 Zeichnen Sie für den 1. Quadranten die Drehmoment-Drehzahl-Kennlinien einer fremderregten Gleichstrommaschine bei Betrieb mit Nennankerspannung  $U_a = U_{a,N}$  für:  $k = I_{f,N}$  und  $k = 1/2 I_{f,N}$ . [2 P]
- 1.3 Zeichnen Sie in das Diagramm aus Aufgabenteil 1.2) die Belastungskennlinie ein, die sich für einen Motor ergibt, wenn ein Aufzug mit konstantem Lastgewicht betrieben werden soll. [2 P]

Eine fremderregte Gleichstrommaschine wird als Antrieb für einen Aufzug verwendet. Beim Heben der Nennlast mit Nenngeschwindigkeit, also dem Betrieb im Nennpunkt, besitzt die Maschine folgende Daten:

Erregerstrom	:	$I_{f,N}$	=	2 A
Ankerspannung	:	$U_{a,N}$	=	220 V
Drehzahl	:	$n_N$	=	$1400 \text{ min}^{-1}$
Drehmoment	:	$M_N$	=	117 Nm

Der Wirkungsgrad beträgt im Nennpunkt 95 % (ohne Berücksichtigung der Erregerverluste). Sättigungserscheinungen im Eisenkreis, Reibungs- und Eisenverluste sowie Verluste durch die Wendepol- oder Kompensationswicklung werden nicht berücksichtigt.

- 1.4 Wie groß sind im Nennpunkt die mechanische Leistung  $P_{\text{mech},N}$ , die aufgenommene elektrische Leistung  $P_{\text{el},N}$  (ohne Erregerleistung), der Ankerstrom  $I_{a,N}$  und die induzierte Spannung  $U_{i,N}$ ? [4 P]
  - 1.5 Berechnen Sie die Rotationsinduktivität  $M_d'$  und den Ankerwiderstand  $R_a$  der Maschine. [2 P]
- Die Ankerspannung kann mit Hilfe eines Gleichstromstellers variabel zwischen 0 V und 220 V eingestellt werden.
- 1.6 Bei Betrieb mit Nennerregerstrom soll die zweifache Nennlast mit halber Nenngeschwindigkeit angehoben werden. Berechnen Sie für diesen Betriebspunkt die induzierte Spannung, den Ankerstrom und die erforderliche Ankerspannung. [3 P]

## 2. Aufgabe: Asynchronmaschine (ASM)

- 2.1 Skizzieren Sie die Drehmoment-Drehzahl-Kennlinie einer Asynchronmaschine im 1. Quadranten und kennzeichnen Sie den Bereich, in dem typischerweise der Nennarbeitspunkt der Maschine liegt. Zeichnen Sie zusätzlich eine typische Lastkennlinie (z. B. Lüfter) ein. [3 P]
- 2.2 Welchen Einfluss hat eine Stern-Dreieck-Umschaltung bei der Asynchronmaschine auf die maximale Luftspaltleistung  $P_{\text{sk}}$ , auf das Kippmoment  $M_k$  und auf den Kippschlupf  $s_k$ ? [3 P]

Eine sechspolige Käfigläufer-Asynchronmaschine wird in Dreieckschaltung an einem 400V/50Hz-Drehstromnetz betrieben. Von dem Asynchronmotor sind für den Nennpunkt folgende Daten bekannt:

$$\begin{aligned} \text{Nennschlupf: } s_N &= 0,04 \\ \text{Nennleistung: } P_{\text{mech N}} &= 18 \text{ kW} \end{aligned}$$

Das maximale Drehmoment der ASM tritt bei einer Drehzahl von  $835 \text{ min}^{-1}$  auf. Der Statorwiderstand sowie Eisen-, Reibungs- und Zusatzverluste sind vernachlässigbar (vereinfachtes Ersatzschaltbild).

- 2.3 Bestimmen Sie die Leerlaufdrehzahl  $n_0$ . [1 P]
- 2.4 Bestimmen Sie für den Nennpunkt: [4 P]
- die Drehzahl  $n_N$
  - das Drehmoment  $M_N$
  - die Rotorverlustleistung  $P_{\text{vr,N}}$
  - den Wirkungsgrad  $\eta_N$
- 2.5 Wie groß sind der Kippschlupf  $s_k$  und das Kippmoment  $M_k$ ? [2 P]

## 3. Aufgabe: Vollpol-Synchronmaschine

- 3.1 Zeichnen Sie das Zeigerdiagramm einer Vollpol-Synchronmaschine für Generatorbetrieb am starren Netz ( $R_s = 0$ ), wobei die Maschine nur reine Wirkleistung einspeist. Bezeichnen Sie die Spannungsabfälle und tragen Sie den Polradwinkel  $\theta$  ein. Wie groß ist der Phasenwinkel  $\varphi$ ? [3 P]
- 3.2 Wie ist bei der Synchronmaschine die "Überlastbarkeit" definiert? [1 P]
- 3.3 Warum dürfen Synchronmaschinen nicht im Stillstand ans Netz zugeschaltet werden? Welche Bedingungen sind für das Zuschalten ans Netz einzuhalten? [2 P]

Eine 6-polige Vollpol-Synchronmaschine wird in Sternschaltung am 400V/50Hz-Drehstromnetz betrieben. Von der Maschine sind folgende Daten bekannt:

$$\begin{aligned} \text{synchrone Reaktanz: } X_d &= 10 \, \Omega \\ \text{Polradspannung je Strang: } U_{pN} &= 300 \text{ V bei Nennerergerstrom } I_{fN} \\ \text{Verluste können vernachlässigt werden (} R_s &= 0) \end{aligned}$$

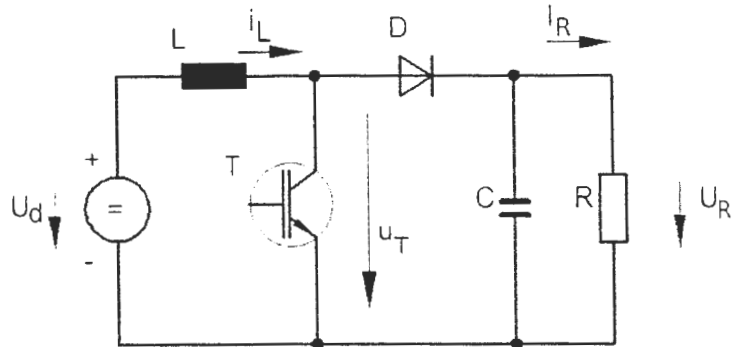
Die Maschine wird bei Nennerregung und mechanisch unbelastet als Phasenschieber betrieben:

- 3.4 Skizzieren Sie qualitativ das Zeigerdiagramm für diesen Betriebspunkt. [2 P]
- 3.5 Wird die Maschine über- oder untererregt betrieben? Begründen Sie Ihre Antwort. [2 P]
- 3.6 Um welchen Faktor muss die Erregung verändert werden, damit eine Blindleistung gleichen Betrages aber mit entgegengesetztem Vorzeichen erzeugt wird? [2 P]

### 3. Teil: Grundlagen der Leistungselektronik

#### Aufgabe 1: Gleichstromsteller

Gehen Sie von **idealen Bedingungen** aus (ideale Bauteile, idealer Stromübergang von einem auf das andere Ventil).



$$U_d = 120 \text{ V}$$

$$R = 100 \, \Omega$$

$$\text{Taktfrequenz } f_T = 25 \text{ kHz}$$

Der IGBT ist zu Beginn jeder Periode für  $T_{\text{ein}} = 25 \, \mu\text{s}$  leitend, danach sperrt er für den Zeitraum  $T_{\text{aus}}$ .

Glättungskondensator  $C \rightarrow \infty$

#### 1. Gleichstromsteller

1.1. Berechnen Sie die Ausgangs-Gleichspannung  $U_R$  und den Strom  $I_R$ . (Strom  $i_L$  lückt nicht)

1.2. Wie groß muss die Induktivität  $L$  sein, damit der Steller gerade nicht lückt?

1.3. Zeichnen Sie die zeitlichen Verläufe der Spannung  $u_T$  und des Stroms  $i_L$ .

Kennzeichnen Sie  $U_R$ ,  $I_R$ ,  $T$  und  $T_{\text{ein}}$ . Benutzen Sie die bereitgestellten Diagramme (1.3a) und (1.3b).

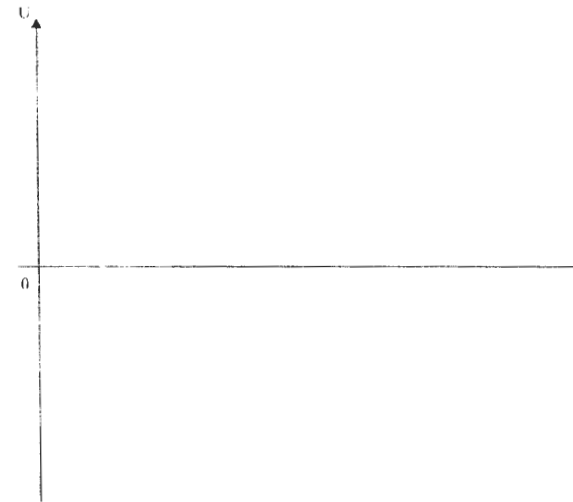
2. **Annahme:** Die Induktivität beträgt nun  $300 \, \mu\text{H}$  und  $U_R$  soll den Wert aus Aufgabenteil 1.1 beibehalten.

2.1. Ist ein lückfreier Betrieb mit den Steuerzeiten aus Aufgabenteil 1 gegeben?

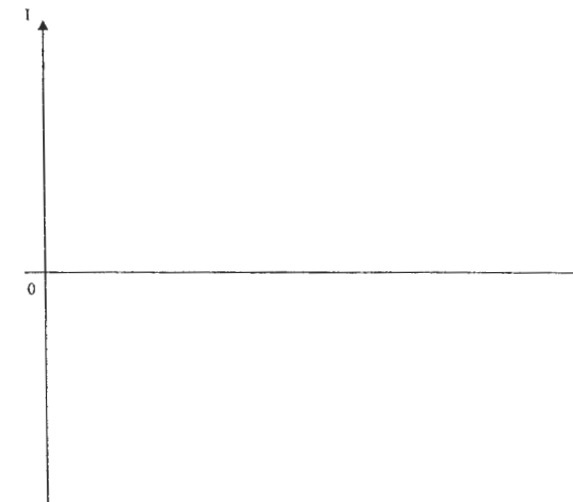
Begründen Sie die Antwort.

2.2. Berechnen Sie  $T_{\text{ein}}$  und  $T_{\text{aus}}$  damit der Steller gerade nicht mehr lückt.

(1.3a)

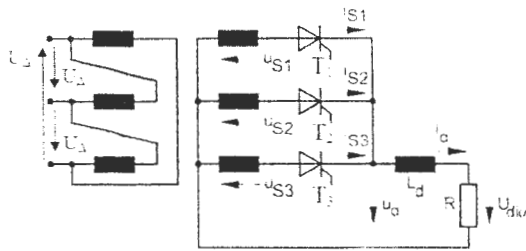


(1.3b)



## Aufgabe 2: M3-Schaltung

Gehen Sie von **idealen Bedingungen** aus (ideale Bauteile, idealer Stromübergang von einem auf das andere Ventil). Sämtliche Wechselgrößen sind als **Effektivwerte** gegeben.



$$U_{\Delta} = 400 \text{ V}, 50 \text{ Hz}$$

$$\bar{u} = N_P/N_S = \frac{1}{\sqrt{3}}$$

$$R = 10 \Omega$$

$$\text{Steuerwinkel } \alpha = 60^\circ$$

$$L_d \rightarrow \infty$$

$\bar{u}$ : Übersetzungsverhältnis des Transformators

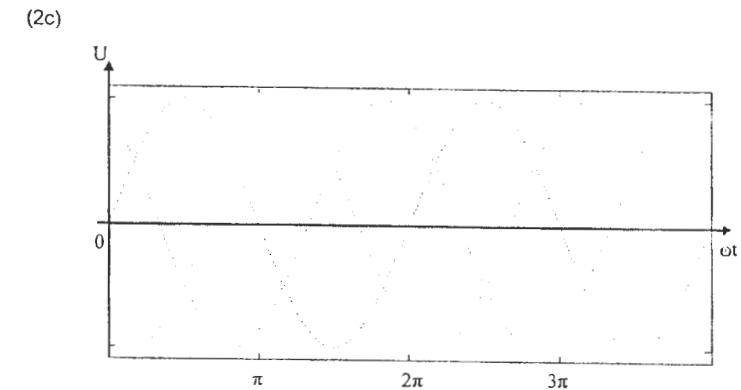
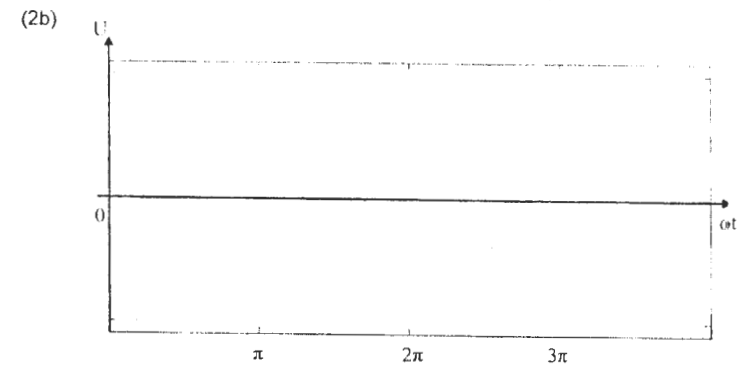
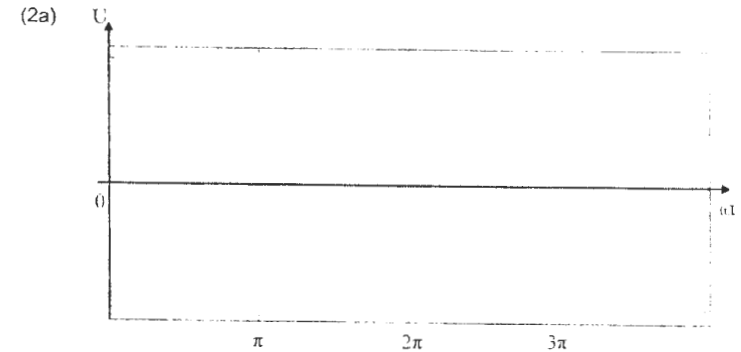
$N_P$ : Primärwindungszahl des Transformators je Strang

$N_S$ : Sekundärwindungszahl des Transformators je Strang

1. Zeichnen Sie den zeitlichen Verlauf der Spannung  $u_d$ . Benutzen Sie das bereitgestellte Diagramm (2a).
2. Berechnen Sie Gleichspannung  $U_{dia}$  und den Gleichstrom  $I_d$ .

**Annahme:** Die Thyristoren  $T_1$  und  $T_2$  werden durch Dioden ersetzt (gleiche Sperrichtung). Der Steuerwinkel für den Thyristor  $T_3$  bleibt zunächst unverändert.

3. Zeichnen Sie für diesen Fall den zeitlichen Verlauf der Spannung  $u_d$  und kennzeichnen Sie  $\alpha_{T3}$ . Benutzen Sie das bereitgestellte Diagramm (2b).
4. Berechnen Sie die neue Gleichspannung  $U_{dia}$ .
5. Bestimmen Sie  $\alpha_{T3}$ , so dass  $U_{dia} = 405 \text{ V}$  ist.
6. Zeichnen Sie für diesen Fall den zeitlichen Verlauf der Spannung  $u_d$  und kennzeichnen Sie  $\alpha_{T3}$ . Benutzen Sie das bereitgestellte Diagramm (2c).





## Kurzfragen

- (a) Skizzieren Sie die Schaltsymbole folgender Bauteile:

Diode

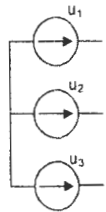
Zenerdiode

Thyristor

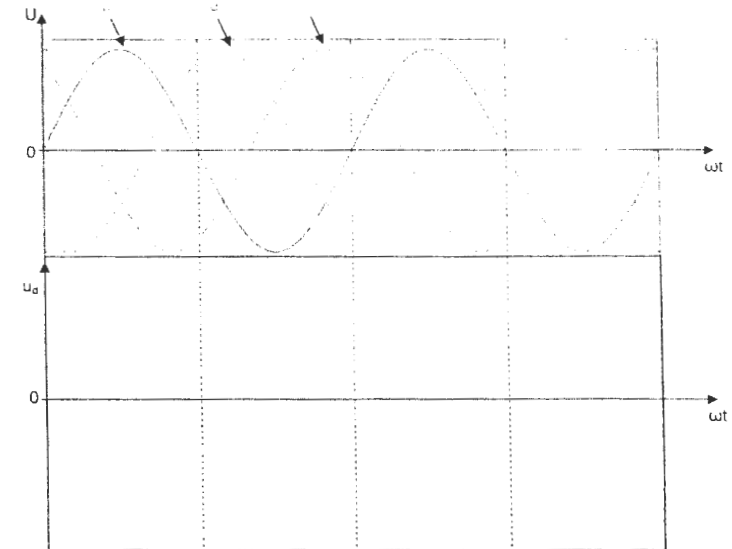
Bipolar Transistor

IGBT

- (b) Bei welchem Steuerverfahren für einen Tiefsetzsteller ist die Einschaltdauer  $T_e$  nicht variabel?
- (c) Zeichnen Sie eine ungesteuerte Sechspulsbrückenschaltung mit einer ohmsch-induktiven Last, die direkt am dreiphasigen Wechselstromnetz betrieben wird.



Gegeben sind die Verläufe der Eingangsspannungen aus dem dreiphasigen Wechselstromnetz. Zeichnen Sie den qualitativen Verlauf der Ausgangsspannung  $u_d$ .



- (d) Welche Frequenz tritt an der Glättungsdrossel einer ungesteuerten B6-Brücke auf, die an einem 60 Hz Netz betrieben wird?

- (e) Zeichnen Sie das Schaltbild für einen Einphasen-Spannungs-Wechselrichter mit induktiver Last und der Eingangsspannung  $U_g$ . Geben Sie für alle Betriebszustände des Freilaufes die möglichen Schaltzustände der Halbleiterbauelemente an, die stromführend sind (Benennung analog Schaltbild).

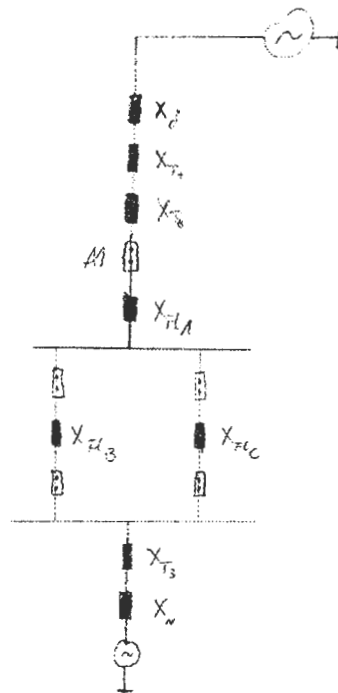
- (f) Vergleichen Sie eine B2- und M2-Schaltung qualitativ miteinander. Tragen Sie entweder (B2), (M2) oder (keiner) ein.

1. Die Sperrspannungsbeanspruchung der Ventile ist größer bei: .....
2. Die Halbleiterverluste sind kleiner bei: .....
3. Der Aufwand für den Transformator ist größer bei: .....

- (g) Wie verändert sich die Ausgangsspannung einer M3-Schaltung mit ohmscher Belastung, wenn die primärseitige  $\Delta$ -Schaltung des Transformators durch eine Y-Schaltung ersetzt wird?

$$U_{\text{neu}} = \dots \cdot U_{\text{alt}}$$

# 1. Aufgabe



$$wL' = 0,29 \frac{\Omega}{\text{km}}$$

$$a) \quad X_{TL1} = 60 \text{ km} \cdot 0,29 \frac{\Omega}{\text{km}} = 17,4 \Omega$$

$$X_{TL3} = 400 \text{ km} \cdot 0,29 \frac{\Omega}{\text{km}} = 116 \Omega$$

$$X_{TL4} = 400 \text{ km} \cdot 0,29 \frac{\Omega}{\text{km}} = 116 \Omega$$

$$X_d = \frac{1,11 (220 \text{ kV})^2}{1000 \text{ MVA}} = 53,7 \Omega$$

$$X_{T2} = \frac{0,083 (220 \text{ kV})^2}{270 \text{ MVA}} = 17,62 \Omega$$

$$X_{T1} = \frac{0,12 \cdot (220 \text{ kV})^2}{370 \text{ MVA}} = 18,7 \Omega$$

$$X_{T3} = \frac{0,12 (220 \text{ kV})^2}{370 \text{ MVA}} = 18,7 \Omega$$

$$X_n = 1 \Omega$$

$$b) \quad X_{ges} = X_d + X_{T1} + X_{T2} = 53,7 \Omega + 18,7 \Omega + 17,6 \Omega = 90 \Omega$$

$$S_{A1} = \frac{U_B^2}{X_{ges}} = \frac{(220 \text{ kV})^2}{90 \Omega} = 526 \text{ MVA}$$

$$c) \quad X_{ges} = X_d + X_{T1} + X_{T2} + X_{TL1} = X_{TL3} \parallel X_{TL4} = \frac{1}{\frac{1}{116} + \frac{1}{116}} = \frac{1}{2} \cdot 116 \Omega = 58 \Omega$$

$$= 109,4 \Omega + \frac{1}{2} \cdot 116 \Omega$$

$$= 167,4 \Omega$$

$$I_{2U} = \frac{220 \text{ kV}}{\sqrt{3} \cdot 167,4 \Omega} = 758,8 \text{ A}$$

$$I_{C1} = \frac{1}{3} I_{ges} = 379,4 \text{ A}$$

$$S_{C1} = \sqrt{3} \cdot 220 \text{ kV} \cdot 379,4 \text{ A} = 144,56 \text{ MVA}$$

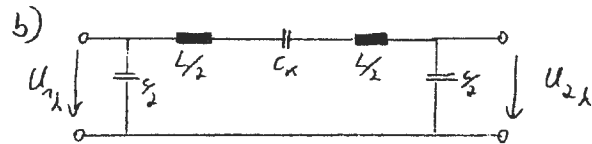
$$a) P_{\text{net}} = 5500 \text{ MW}$$

$$P_{\text{net}} = \frac{U_d}{Z}$$

$$Z = \frac{(1150 \text{ kV})^2}{5500 \text{ MW}} = 240,45 \Omega$$

$$S_d = \sqrt{3} U_d I_1 = \sqrt{3} \cdot 1150 \text{ kV} \cdot I_1 \stackrel{!}{=} P_{\text{net}} = 5500 \text{ MW}$$

$$\Rightarrow I_1 = \frac{5500 \text{ MW}}{\sqrt{3} \cdot 1150 \text{ kV}} = 2,76 \text{ kA}$$



$$X_L = 0,42 \frac{\Omega}{\text{km}} \cdot 1300 \text{ km} = 546 \Omega$$

$$X_{C_k} = 2 \cdot \pi \cdot 50 \text{ Hz} \cdot 7,2 \cdot 10^{-6} \text{ F} = 2,262 \text{ mS}$$

$$X_{\text{ges}} = \omega L - \frac{1}{\omega C_k} = 546 \Omega - 442,1 \Omega = 103,9 \Omega$$

$$U_{2,1} = \frac{1150 \text{ kV}}{\sqrt{3}} \approx 664 \text{ kV}$$

$$I_2 = 2,76 \text{ kA} \quad (a))$$

Achtung:

$$Z = \sqrt{\frac{L}{C}} = 264,6 \Omega$$

falscher Wert in Aufgabenstellung

$$I_{C2} = \frac{\omega C}{2} U_{2,1} = \frac{\omega C' \cdot l}{2} U_{2,1}$$

$$= 3 \cdot 10^{-6} \frac{\text{F}}{\text{km}} \cdot 1300 \text{ km} \cdot 664 \text{ kV}$$

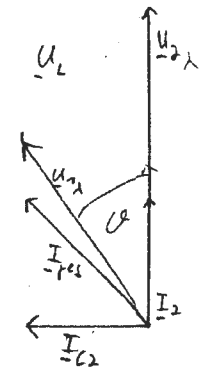
$$= 2,59 \text{ kA}$$

$$I_{\text{ges}} = I_1 + I_{C2}$$

$$I_{\text{ges}} = \sqrt{(2,76 \text{ kA})^2 + (2,59 \text{ kA})^2} = 3,78 \text{ kA}$$

$$U_L = I_{\text{ges}} X_{\text{ges}} = 3,78 \text{ kA} \cdot 103,9 \Omega$$

$$= 392,7 \text{ kV}$$



$$\Rightarrow \varphi \approx 36^\circ$$

$$c) P_{\text{net}} = \frac{U_d^2}{Z} \quad Z = \sqrt{\frac{X_{\text{ges}}}{\omega C}} = \sqrt{\frac{103,9 \Omega}{6 \cdot 10^{-6} \text{ F} \cdot 1300 \text{ km}}} = \sqrt{\frac{103,9 \Omega}{7,8 \text{ mS}}} = 115,4 \Omega$$

$$\Rightarrow P_{\text{net, neu}} = \frac{(1150 \text{ kV})^2}{115,4 \Omega}$$

$$= 11460,16 \text{ MW}$$



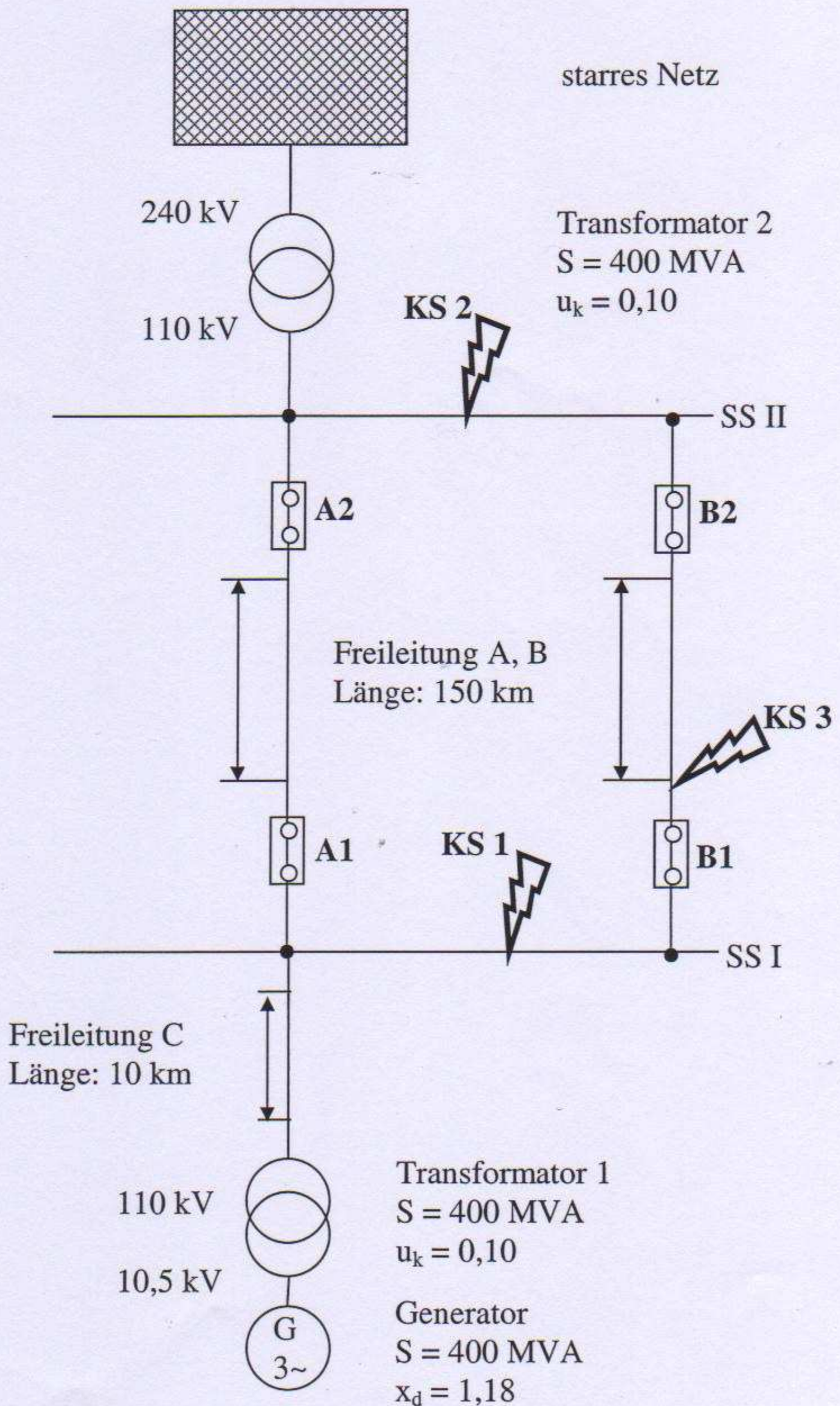
# 1. Teil: Hochspannungstechnik und Energieübertragung

## 1. Aufgabe:

Ein Generator G liegt über eine 150 km lange 110 kV Drehstrom-Dreifachleitung an einem starren Netz.

Die Drehstromfreileitungen A und B haben den Leitungsbelag  $\omega L' = 0,35 \Omega/\text{km}$ .

Die Drehstromfreileitung C hat den Leitungsbelag  $\omega L' = 0,41 \Omega/\text{km}$ .





Alle Querglieder werden vernachlässigt. Die Leitungen sind als verlustfrei anzunehmen. Die Netzreaktanz beträgt  $10 \, \Omega$ .

- a.) Zeichnen Sie das vollständige einphasige Kurzschluss-Ersatzschaltbild und berechnen Sie die Reaktanzen bezogen auf 110 kV.

Alle Leitungen sind in Betrieb. Die generator-fernen Leistungsschalter A2 und B2 im Schaltbild werden als geschlossen angenommen.

- b.) Auf Sammelschiene 1 (SSI) tritt an der eingetragenen Stelle ein Kurzschluss (KS1) auf. Bestimmen Sie die notwendigen dreiphasigen Abschaltleistungen der Leistungsschalter A1 und B1!
- c.) Auf Sammelschiene 2 (SSII) tritt an der eingetragenen Stelle ein Kurzschluss (KS2) auf. Bestimmen Sie die notwendigen dreiphasigen Abschaltleistungen der Leistungsschalter A1 und B1!
- d.) Am Anfang der Freileitung B tritt an der eingetragenen Stelle ein Kurzschluss (KS 3) auf. Bestimmen Sie die notwendige dreiphasige Abschaltleistung des Leistungsschalters B1!

Leitung A ist nun abgeschaltet.

- e.) Der generator-ferne Leistungsschalter B2 im Schaltbild wird als geschlossen angenommen. Auf Sammelschiene 1 (SSI) tritt an der eingetragenen Stelle ein Kurzschluss (KS1) auf. Bestimmen Sie die notwendige dreiphasige Abschaltleistung des Leistungsschalters B1!
- f.) Wie hoch ist der maximale Strom, für den die mechanische Festigkeit der Sammelschiene 1 (SSI) ausgelegt werden muss?



**2. Aufgabe:**

Eine 800-kV-Drehstrom-Freileitung transportiert elektrische Leistung über 800 km. Die als verlustfrei angenommene 50 Hz - Freileitung speist in ein starres Netz ein und hat die folgenden Beläge:

$$\omega L' = 0,222 \, \Omega/\text{km} \quad \text{und} \quad \omega C' = 5,55 \cdot 10^{-6} \, \text{S/km}.$$

- a) Welcher Strom fließt in den Phasenleitern der Freileitung, wenn sie mit ihrer natürlichen Leistung betrieben wird.
- b) Welcher Leitungswinkel stellt sich für die Freileitung ein?
- c) Zeichnen Sie qualitativ (saubere Skizze ohne Werte) das Zeigerdiagramm der Spannungen und Ströme für diesen Fall! Achten Sie auf die richtigen Phasenlagen von  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $I_L$  und  $U_1$ ,  $U_2$  und  $U_L$  (Längsspannung)!
- d) Welcher Leitungswinkel stellt sich ein, wenn die Leitung in der Mitte mit einer Kapazität von  $55 \, \mu\text{F}$  pro Phase längskompensiert wird und die am Leitungsende abgegebene Wirkleistung bei Nennspannung der natürlichen Leistung nach a) entspricht? Zeichnen Sie zuerst das  $\pi$ -Ersatzschaltbild! Für ein Zeigerdiagramm benutzen Sie bitte den Maßstab  $50 \, \text{kV} \triangleq 1 \, \text{cm}$  und  $2 \, \text{kA} \triangleq 1 \, \text{cm}$ .
- e) Was bedeutet „Lastabwurf“ bei einer Freileitung?



## 2. Teil: Elektromechanische Energieumformung

### 1. Aufgabe: Gleichstrommaschine

- 1.1 Durch welche Ursache kann bei einer Gleichstrommaschine Bürstenfeuer entstehen? [1 P]
- 1.2 Wie kann bei einer fremderregten Gleichstrommaschine im Motorbetrieb die Drehrichtung umgekehrt werden? [1 P]
- 1.3 Mit welchen Maßnahmen kann die Leerlaufdrehzahl einer fremderregten Gleichstrommaschine erhöht werden? [2 P]

Eine fremderregte Gleichstrommaschine besitzt im Nennpunkt folgende Daten:

Ankerspannung:	$U_{a,N}$	= 330 V
Ankerstrom:	$I_{a,N}$	= 20 A
Drehzahl:	$n_N$	= 1800 min <sup>-1</sup>
Erregerspannung:	$U_{f,N}$	= 330 V

Für die Rotationsinduktivität ist der Wert  $M_d' = 1,4$  H und für den Erregerwiderstand der Wert  $R_f = 275 \Omega$  angegeben.

Sättigungserscheinungen im Eisenkreis, Reibungs- und Eisenverluste sowie Verluste durch die Wendepol- oder Kompensationswicklung werden nicht berücksichtigt.

- 1.4 Berechnen Sie für den Nennpunkt die folgenden Größen: [6 P]
  - Drehmoment  $M_N$
  - mechanische Leistung  $P_{\text{mech},N}$
  - aufgenommene elektrische Leistung  $P_{\text{el},N}$  und Wirkungsgrad  $\eta_N$  (ohne Berücksichtigung der Erregerleistung)
  - Ankerwiderstand  $R_a$
- 1.5 Die Maschine soll im Stillstand bei Nenn-Erregerspannung mit dem Nennmoment anlaufen. Welche Ankerspannung  $U_a$  ist hierfür einzustellen? [2 P]
- 1.6 Welche Erregerspannung muss eingestellt werden, damit bei Nenn-Ankerspannung und Belastung mit Nenn-Ankerstrom eine Drehzahl von 3600 min<sup>-1</sup> erreicht wird? [2 P]



## 2. Aufgabe: Asynchronmaschine (ASM)

- 2.1 Welche Leerlaufdrehzahl besitzt eine Drehfeldmaschine mit der Polpaarzahl  $p = 1$  bei einer Statorfrequenz von  $f_s = 60 \text{ Hz}$ ? Wie kann man die Drehrichtung ändern? [2 P]
- 2.2 Welchen Einfluss hat bei einer Asynchronmaschine die Streuung ( $X_\sigma$ ) auf den Anlaufstrom und auf das Kippmoment? [2 P]
- 2.3 Warum werden Asynchronmaschinen stationär mit möglichst geringem Schlupf betrieben? [1 P]

Ein Käfigläufer-Asynchronmotor wird an einem 400V/50Hz-Drehstromnetz betrieben. Von dem Asynchronmotor sind folgende Daten bekannt:

Schaltungsart: Sternschaltung  
 Nennleistung:  $P_{\text{mech,N}} = 3 \text{ kW}$   
 Nenndrehzahl:  $n_N = 1436 \text{ min}^{-1}$

Das maximale Drehmoment der ASM tritt bei einer Drehzahl von  $1125 \text{ min}^{-1}$  auf. Der Statorwiderstand sowie Eisen-, Reibungs- und Zusatzverluste sind vernachlässigbar (vereinfachtes Ersatzschaltbild).

- 2.4 Bestimmen Sie die Polpaarzahl  $p$  und den Nennschlupf  $s_N$ . [2 P]
- 2.5 Wie groß sind das Nennmoment  $M_N$ , der Kippschlupf  $s_k$ , das Kippmoment  $M_k$  und das Anlaufmoment  $M_A$ ? [6 P]
- 2.6 Berechnen Sie für den Nennpunkt die Luftspaltleistung  $P_{\delta,N}$  und die Rotorverluste  $P_{\text{vr,N}}$ . [2 P]



### 3. Aufgabe: Vollpol-Synchronmaschine

- 3.1 Wie wirkt sich der untererregte Betrieb von Synchronmaschinen am starren Netz bezüglich der Blindleistung im Netz aus? [1 P]
- 3.2 Welchen Einfluss hat das Umpolen der Erregerwicklung auf die stationäre Drehzahl einer Synchronmaschine? [1 P]

Eine Synchronmaschine läuft am 400V/50Hz-Drehstromnetz. Von der Maschine sind folgende Daten bekannt:

Verschaltung: Sternschaltung  
 synchrone Drehzahl:  $n_0 = 3.000 \text{ min}^{-1}$   
 synchrone Reaktanz:  $X_d = 23 \Omega$   
 Nenn-Polradspannung:  $U_{p,N} = 251,3 \text{ V}$

Verluste können vernachlässigt werden ( $R_s = 0$ ).

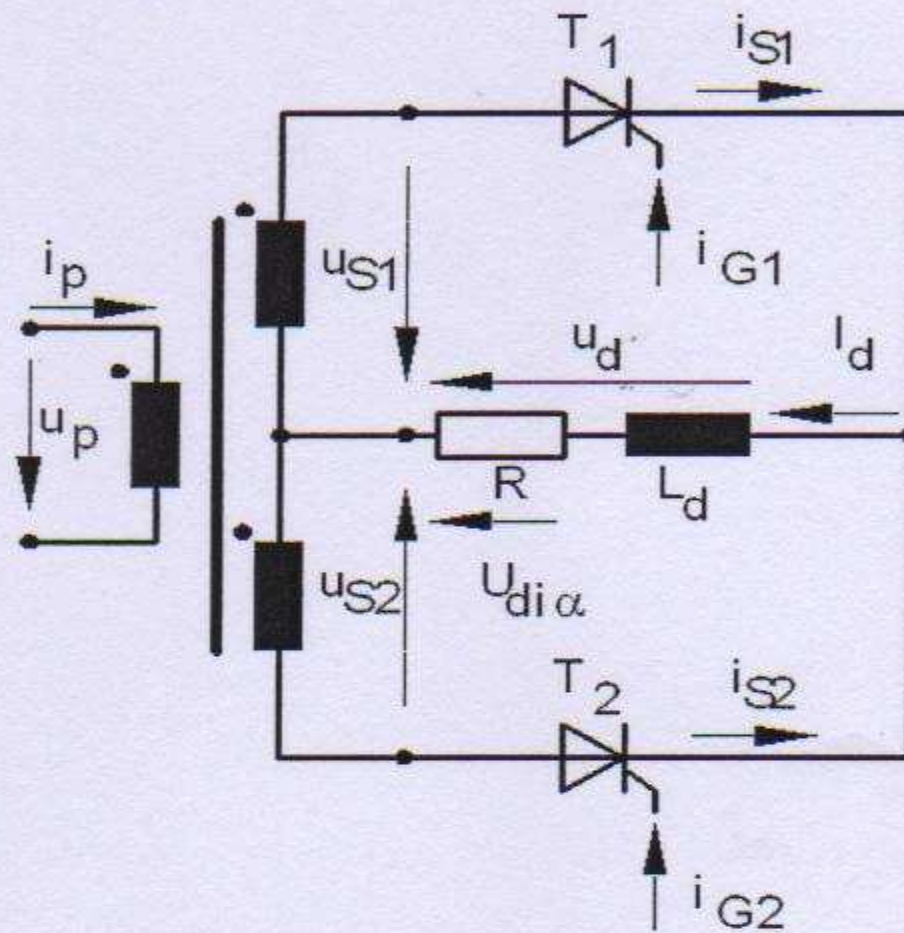
- 3.3 Kann die Synchronmaschine bei Nennerregung kapazitive Blindleistung aufnehmen (d. h. übererregt betrieben werden)? Begründung! [2 P]
- 3.4 Wie groß ist das Kippmoment  $M_k$  der Maschine bei Nennerregung? [1 P]
- 3.5 Die Maschine wird im Motorbetrieb bei Nennerregung mit einem Lastmoment  $M_L = 12 \text{ Nm}$  belastet. Berechnen Sie: [6 P]
- den Polradwinkel  $\vartheta$
  - den Strangstrom  $I_s$  (Tipp: Stromortskurve)
  - den Phasenwinkel  $\varphi$
  - die elektrisch zugeführte Leistung  $P_{el}$



### 3. Teil: Grundlagen der Leistungselektronik

Sämtliche Wechselgrößen sind als Effektivwerte gegeben!

#### 1. Aufgabe: Gesteuerte M2-Schaltung



$$u_p = 150 \text{ V (Strangspannung), } 50 \text{ Hz}$$

$$\alpha = 45^\circ$$

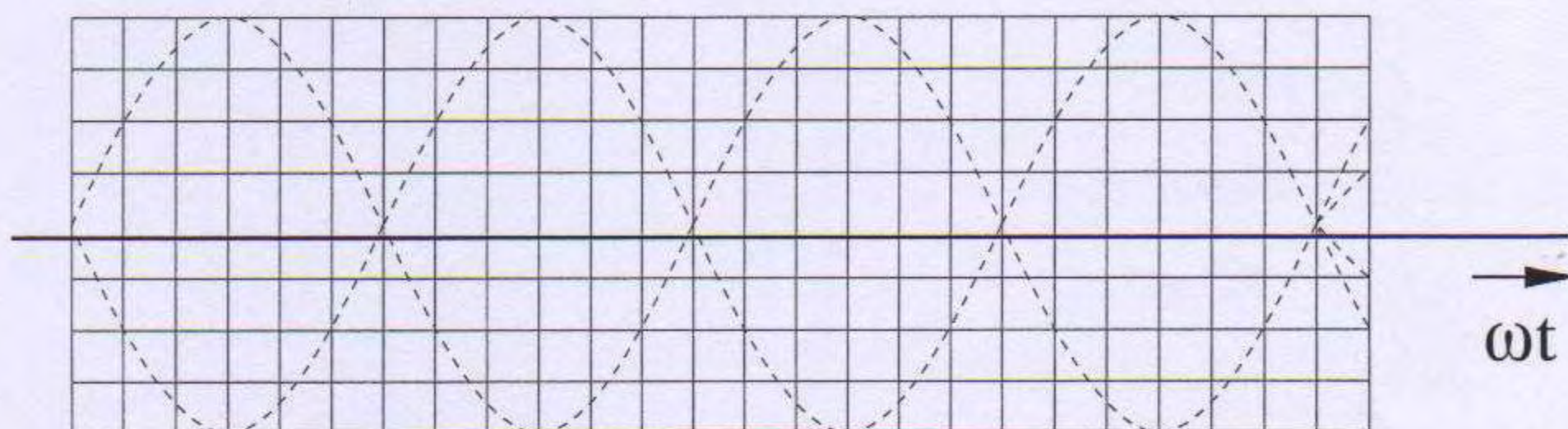
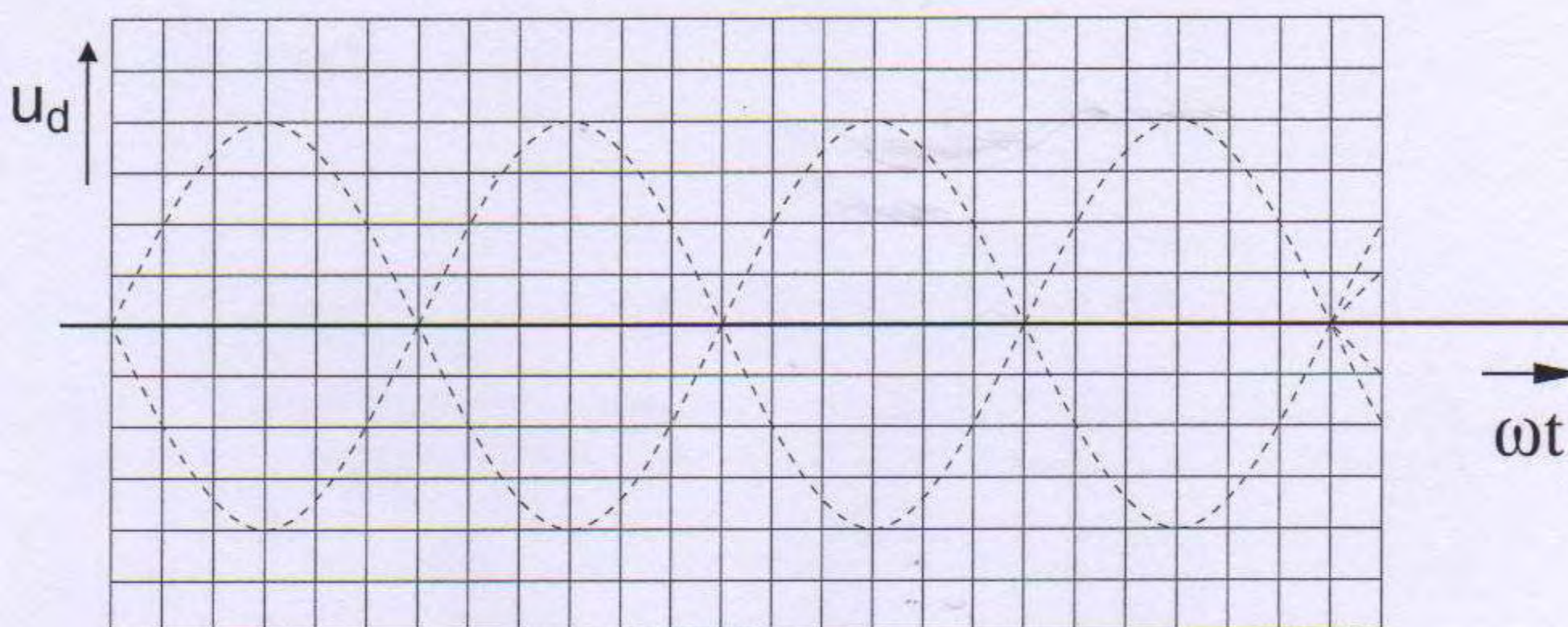
$$R = 19 \, \Omega$$

$$\ddot{U} = N_P/N_{S1} = N_P/N_{S2} = 0,5$$

Die Induktivität  $L_d$  zur Glättung des Stromes soll zunächst als sehr groß ( $L \rightarrow \infty$ ) angenommen werden.

- Skizzieren Sie den zeitlichen Verlauf der Spannung  $u_d$  sowie der Ströme  $i_{G1}$  und  $i_{G2}$  (Bildblatt zur 1. Aufgabe).
- Berechnen Sie den Wert der Gleichspannung  $U_{di\alpha}$  und den Wert des Gleichstromes  $I_d$ .
- Skizzieren Sie die Ströme  $i_{S1}$ ,  $i_{S2}$  und  $i_p$  (Bildblatt zur 1. Aufgabe).

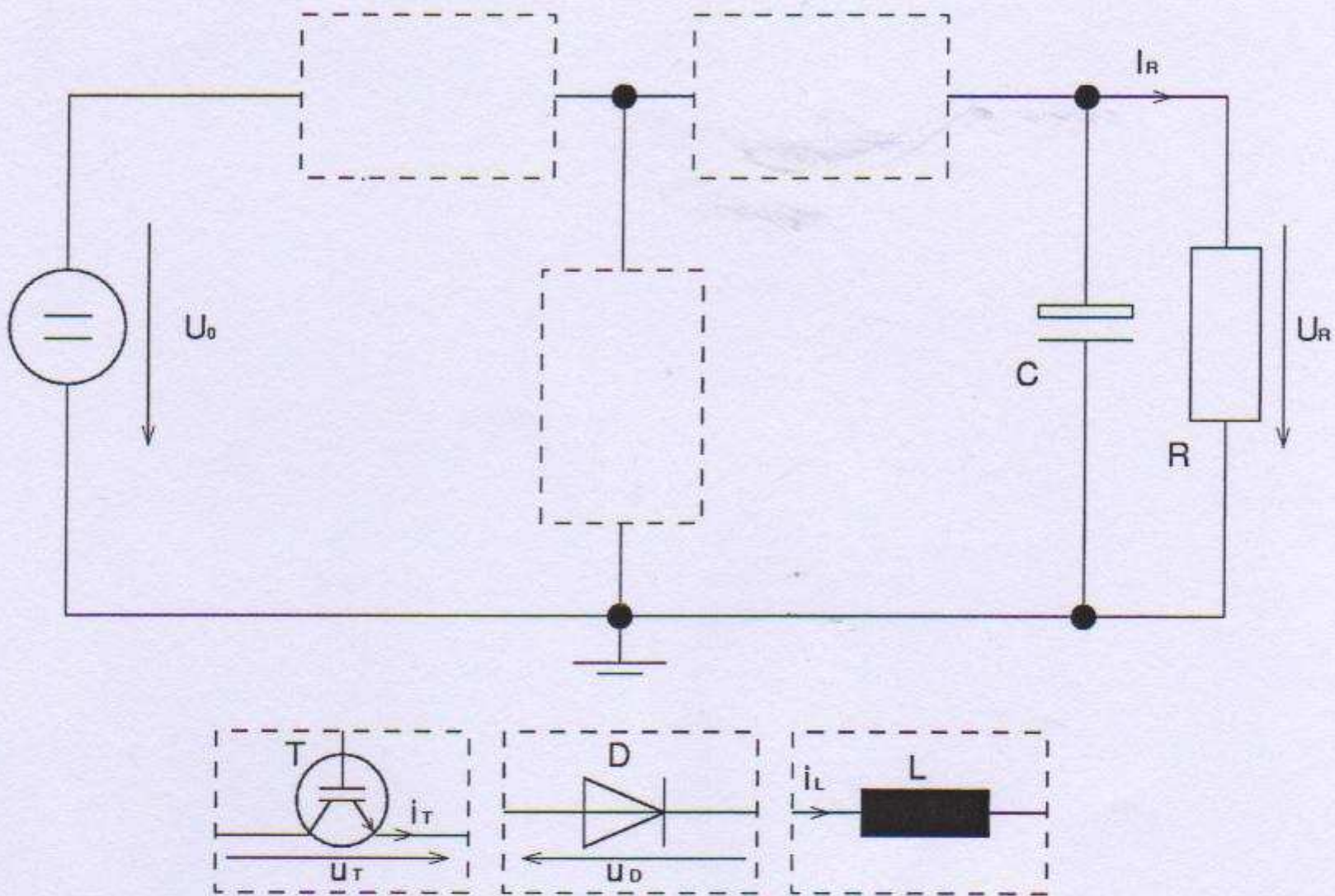


**Bildblatt zur 1. Aufgabe**

Bemaßen Sie die Ordinaten und tragen Sie charakteristische Werte ein!



## 2. Aufgabe: Hochsetz -Gleichstromsteller



$$U_0 = 150 \text{ VDC}$$

$$U_R = 450 \text{ VDC}$$

$$L = 50 \mu\text{H}$$

$$C \rightarrow \infty \text{ (sehr groß, vernachlässigbare Welligkeit der Spannung)}$$

$$i_{L\text{Mittelwert}} = 6 \text{ A}$$

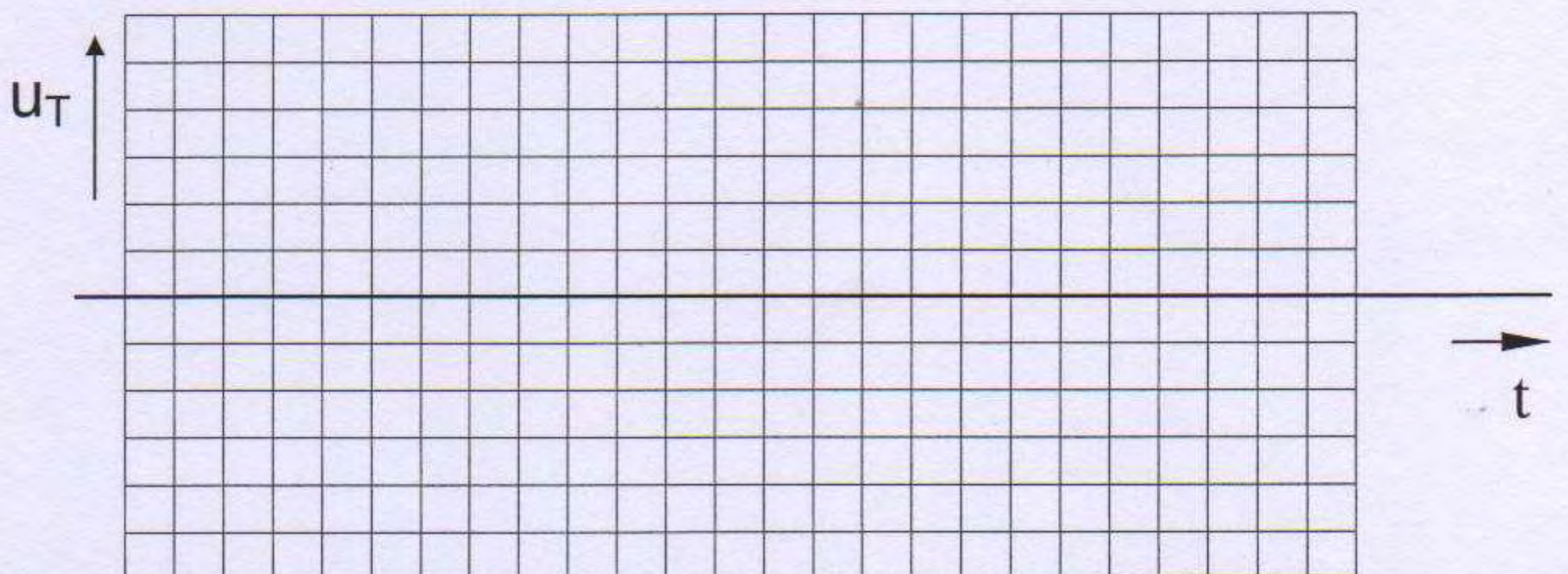
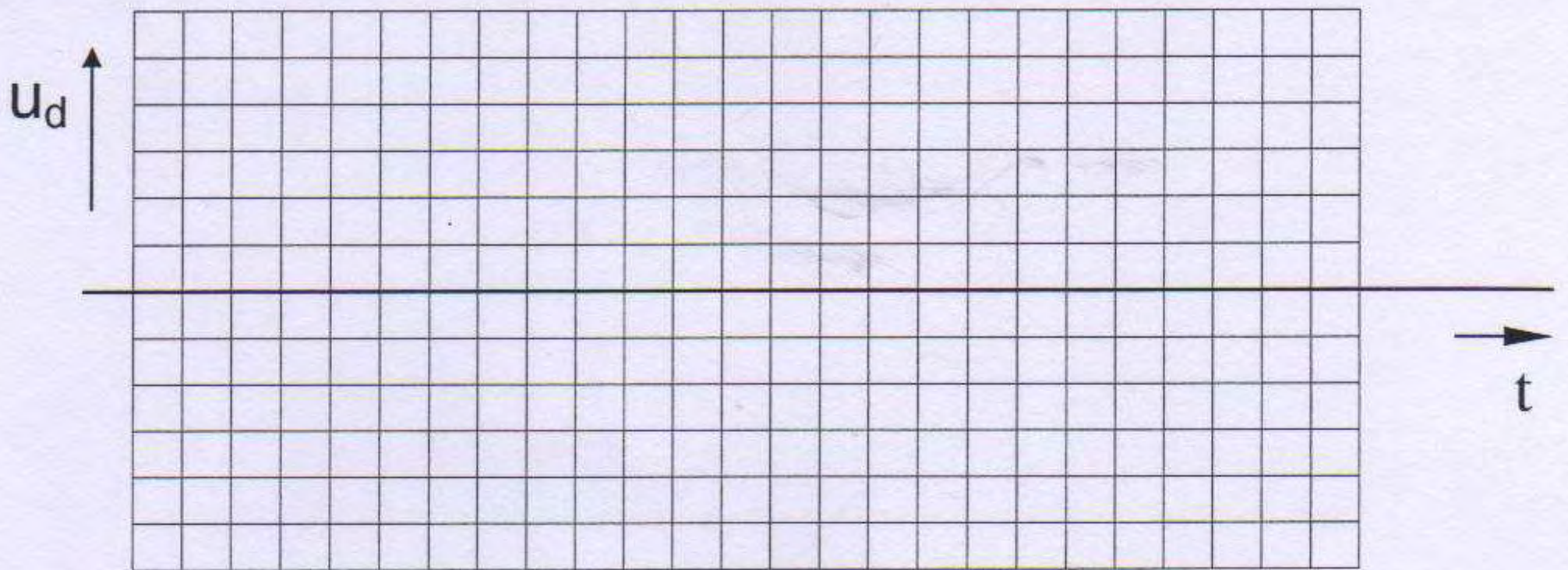
$$t_{\text{ges}} = 1/f$$

- a. Fügen Sie an den freigelassenen Stellen die unter der Zeichnung angeordneten Bauelemente in der richtigen Polarität ein.

Die Speicherdrossel  $L$  sei so dimensioniert, dass der Strom durch sie gerade noch nicht lückt. Diode  $D$  wird als ideal angenommen ( $U_f = 0$ )

- b. Berechnen Sie die Einschaltzeit  $t_{\text{ein}}$  und die Ausschaltzeit  $t_{\text{aus}}$  des Transistors sowie die Gesamtzeit  $t_{\text{ges}}$ .
- c. Skizzieren Sie für diesen Betriebszustand die Spannung  $u_D$  an der Diode, den Strom  $i_L$  durch die Drossel, den Strom  $i_T$  durch den Transistor und die Spannung  $u_T$  über dem Transistor. Tragen Sie die Maximalwerte mit ein (Bildblatt zur 2. Aufgabe)
- d. Berechnen Sie den Widerstand  $R$ , den Strom  $I_R$  sowie die Ausgangsgesamtleistung.



Bildblatt zur 2. Aufgabe

Bemaßen Sie die Ordinaten und tragen Sie charakteristische Werte ein!



### 3. Aufgabe: Verständnisfragen

- a) Zeichnen Sie für eine gesteuerte Zweipuls-Mittelpunktschaltung (M2-Schaltung, Steuerwinkel  $\alpha > 0$ ) für eine sinusförmige Wechselspannung am Eingang die sich ergebenden zeitlichen Strom- und Spannungsverläufe  $u_d$  und  $i_d$  an der Last, wenn die Last gebildet wird aus:
- einer Kapazität mit Parallelwiderstand
  - einer Induktivität ( $L \neq \infty$ ) mit Reihenwiderstand
  - einem Widerstand
- b) Skizzieren Sie die Schaltsymbole von Diode, Thyristor und Bipolartransistor mit ihren Anschlussbezeichnungen und Strom/Spannungs-Kennlinien. Geben Sie die typischen Steuergrößen (Spannung, Strom) für die steuerbaren Halbleiter an. Welche Halbleiter würden Sie für einen selbstgeführten Wechselrichter einsetzen?
- c) Erläutern Sie die Entstehung der Stromüberschwingungen, die bei netzgeführten Gleichrichterschaltungen im Netz auftreten und nennen Sie Maßnahmen zur Verringerung der Stromüberschwingungen.
- d) Erläutern Sie Energieflussrichtung und Steuerwinkel für einen netzgeführten Gleichrichter und für einen netzgeführten Wechselrichter.





TECHNISCHE UNIVERSITÄT  
CAROLO-WILHELMINA  
ZU BRAUNSCHWEIG

INSTITUT FÜR  
ELEKTRISCHE MASCHINEN,  
ANTRIEBE UND BAHNEN



INSTITUT FÜR  
HOCHSPANNUNGSTECHNIK UND  
ELEKTRISCHE ENERGIEANLAGEN

Braunschweig, 01.04.2010  
Ku-Wo/Ca-Tar/Mei-Gu

### Bachelorprüfung im Wintersemester 09/10

## Grundlagen der elektrischen Energietechnik

1. Teil: Hochspannungstechnik und Energieübertragung
2. Teil: Elektromechanische Energieumformung
3. Teil: Grundlagen der Leistungselektronik

### Allgemeine Hinweise:

Zur Bearbeitung der Aufgaben der 3 Klausurteile stehen insgesamt drei Stunden (180 Minuten) zur Verfügung.

Es sind **alle Unterlagen** sowie ein **Taschenrechner** (auch programmierbare) zugelassen.

Bei der Lösung der Aufgaben sind die einzelnen Lösungswege **klar** zu dokumentieren. Eine Aufgabe kann **nicht** gewertet werden, wenn mehrere Lösungswege mit unterschiedlichen Ergebnissen angeboten werden!

Bitte halten Sie einen Ausweis mit Lichtbild und ihren Studentenausweis bereit.

Die Termine der mündlichen Nachprüfungen werden durch Aushang bekannt gegeben.

**Bitte tragen Sie auf jedes Blatt oben rechts Ihren Vor- und Zunamen ein.**

Wir wünschen Ihnen einen klaren Kopf und viel Erfolg!!!

## Bachelor-Prüfung im Wintersemester 09/10

### Grundlagen der elektrischen Energietechnik

Name: \_\_\_\_\_

Vorname: \_\_\_\_\_

Matrikelnummer: \_\_\_\_\_

Ich bin damit einverstanden, dass **mein Prüfungsergebnis im Internet** unter der PIN-Nummer \_\_\_\_\_ veröffentlicht wird.

Unterschrift \_\_\_\_\_

1. Teil	Punkte		
1. Aufgabe			
2. Aufgabe			
Summe			

2. Teil	Punkte		
1. Aufgabe			
2. Aufgabe			
3. Aufgabe			
Summe			

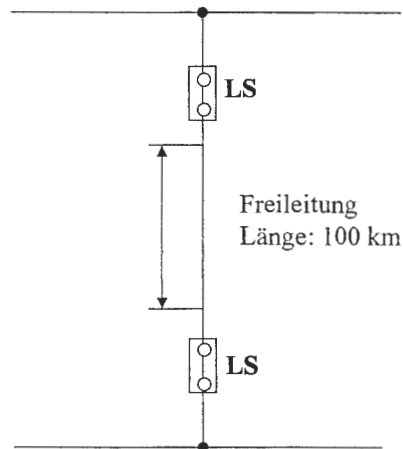
3. Teil	Punkte		
1. Aufgabe			
2. Aufgabe			
3. Aufgabe			
Summe			

## 1. Teil: Hochspannungstechnik und Energieübertragung

### 1. Aufgabe:

Die dargestellte 110-kV-Drehstrom-Freileitung transportiert elektrische Leistung über 100 km. Die 50 Hz - Freileitung hat die folgenden Beläge:

$$\omega L' = 0,39 \, \Omega/\text{km} \quad \text{und} \quad R' = 0,11 \, \Omega/\text{km}$$

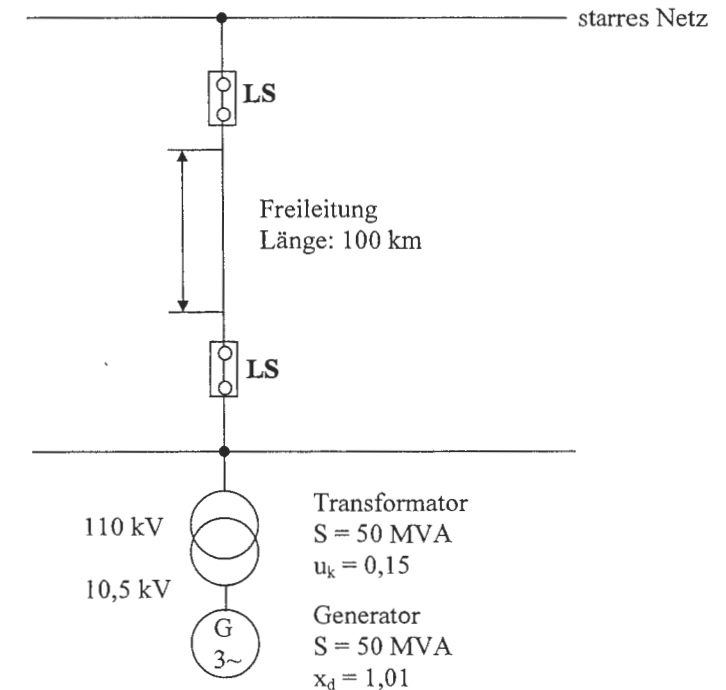


Querglieder sollen vernachlässigt werden.

- a) Wie groß sind die Werte der Blindleistung und der Wirkleistung eines Verbrauchers am Ende, für den Fall, dass am Anfang bei  $U_1 = 110 \text{ kV}$  die Leistungen  $P_1 = 30 \text{ MW}$  und  $Q_1 = 20 \text{ Mvar}$  induktiv eingespeist werden? Zeichnen Sie das einphasige Ersatzschaltbild! Vorgabe Zeigerdiagramm:  $10 \text{ kV} = 2 \text{ cm}$ !

Die genannte Leitung soll nun wie dargestellt zur Anbindung eines Drehstrom-Synchrongenerators über einen Drehstromtransformator an das starre Netz dienen.

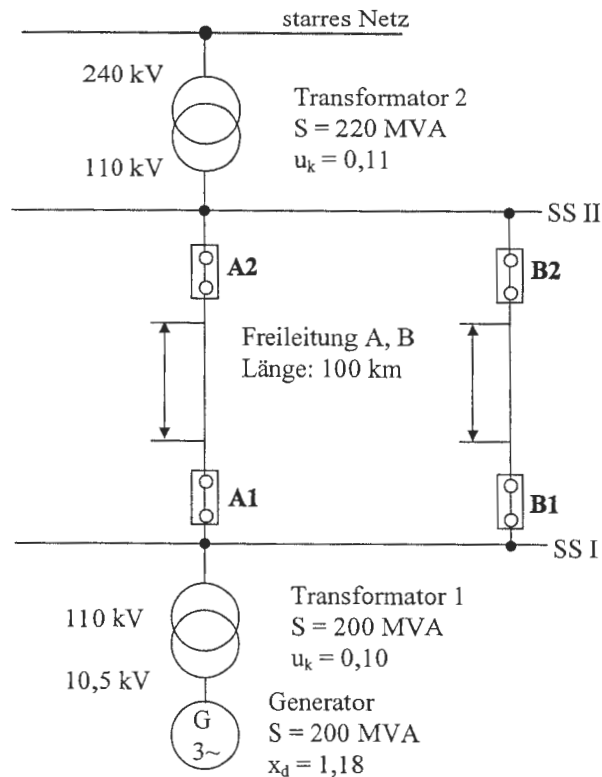
Alle Querglieder und Verluste sollen vernachlässigt werden.



- b) Bei einem gesamten Übertragungswinkel von  $40^\circ$  soll in das Netz nur Wirkleistung eingespeist werden. Welche Wirk- und Blindleistung gibt der Generator für diesen Fall an seinen Klemmen ab? Zeichnen Sie das einphasige Ersatzschaltbild! Vorgabe Zeigerdiagramm:  $10 \text{ kV} = 2 \text{ cm}$ !

**2. Aufgabe:**

Ein Generator G liegt über zwei 100 km lange 110 kV Drehstrom-Freileitungen (mit dem Induktivitätsbelag  $\omega L' = 0,36 \Omega/\text{km}$ ) an einem starren Netz.

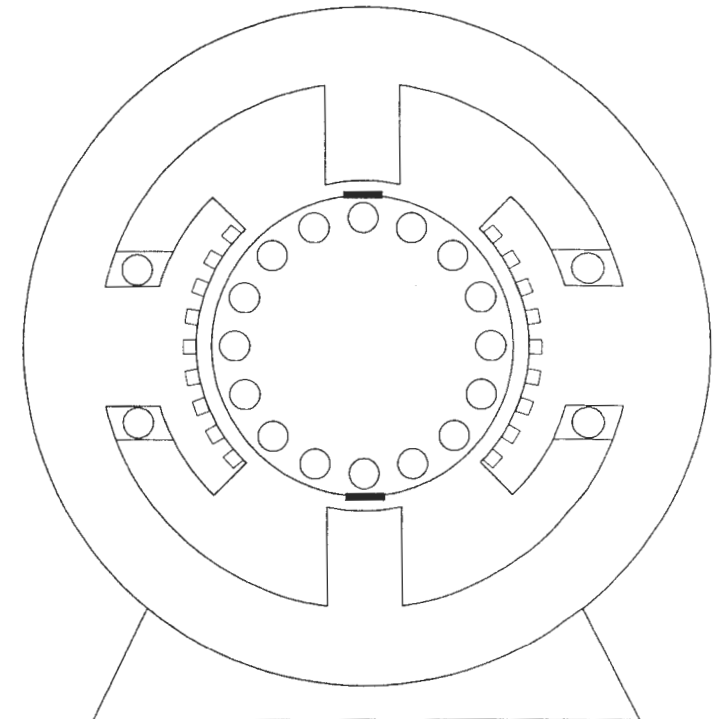


Alle Querglieder und Verluste sollen vernachlässigt werden.

- Berechnen Sie die Ersatzreaktanzen bezogen auf 110 kV. Bestimmen Sie die Gesamtreaktanz. Zeichnen Sie das Ersatzschaltbild.
- Die in das starre Netz eingespeiste Wirkleistung soll 50 % der Kippleistung nicht überschreiten. Welche maximale Wirkleistung kann in das Netz bei einem  $\cos\varphi = 0,95$  eingespeist werden?

**2. Teil: Elektromechanische Energieumformung****1. Aufgabe: Gleichstrommaschine**

- 1.1 Kennzeichnen Sie in dem skizzierten Radialschnittbild einer zweipoligen Gleichstrommaschine die Erreger-, Anker- und Kompensationswicklung. Tragen Sie die Stromrichtungen für Erreger- und Ankerwicklung so ein, dass sich der Rotor in der Draufsicht links herum dreht. Tragen Sie außerdem die erforderliche Stromrichtung für die Kompensationswicklung ein. [4 P]



- 1.2 Zeichnen Sie in das Radialschnittbild aus Aufgabenteil 1.1 den prinzipiellen Verlauf der Feldlinien des Erregerfeldes und des Ankerfeldes ein. [2 P]

Ein Elektrofahrzeug wird von einer fremderregten Gleichstrommaschine angetrieben. Mit Hilfe von zwei Gleichstromstellern können aus der Fahrzeugbatterie ( $U_{\text{Bat}} = 220 \text{ V}$ ) variable Anker- und Erregerspannungen im Bereich von 0 ... 220 V erzeugt werden. Die Gleichstrommaschine besitzt im Nennpunkt folgende Daten:

$$\begin{aligned} \text{Nennmoment: } M_N &= 100 \text{ Nm} \\ \text{Nendrehzahl: } n_N &= 1400 \text{ min}^{-1} \end{aligned}$$

Für die Rotationsinduktivität ist der Wert  $M_d = 1,0 \text{ H}$ , für den Erregerwiderstand der Wert  $R_f = 150 \Omega$  und für den Ankerwiderstand der Wert  $R_a = 0,1 \Omega$  angegeben.

Sättigungserscheinungen im Eisenkreis, Reibungs- und Eisenverluste sowie Verluste durch die Wendepol- oder Kompensationswicklung werden nicht berücksichtigt.

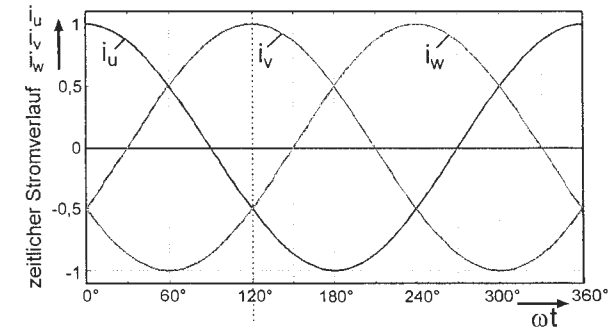
- 1.3 Welcher Erregerstrom  $I_{f,N}$  ist für den Motorbetrieb einzustellen, damit im Nennpunkt ein Ankerstrom von  $I_{a,N} = 100 \text{ A}$  fließt? Wie groß sind dann die induzierte Spannung  $U_{i,N}$ , die Ankerspannung  $U_{a,N}$ , die mechanische Leistung  $P_{\text{mech},N}$  und der Wirkungsgrad  $\eta_N$  (einschließlich Erregerverluste)? [5 P]

Während eines Bremsvorgangs wird mit der Maschine generatorisch in die Batterie zurückgespeist. In diesem Betriebspunkt beträgt die Ankerspannung  $U_a = 220 \text{ V}$ , es fließt ein Ankerstrom  $I_a = -100 \text{ A}$  und der Erregerstrom beträgt  $I_f = 1,455 \text{ A}$ .

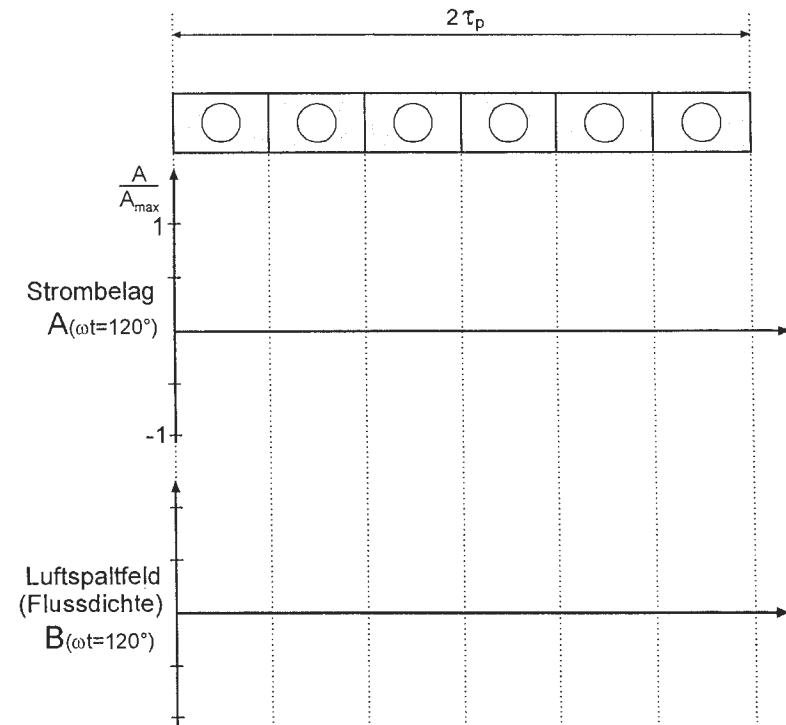
- 1.4 Wie groß ist die Drehzahl in diesem Betriebspunkt? Wie groß sind das Drehmoment und die mechanische Leistung? [3 P]

## 2. Aufgabe: Asynchronmaschine (ASM)

- 2.1 In der folgenden Skizze ist eine abgewickelte dreisträngige Drehstromwicklung mit der Polpaarzahl  $p = 1$  dargestellt. Bezeichnen Sie die Wicklungen ( $U1, U2, V1, V2, W1, W2$ ) und tragen Sie in die Diagramme die Strombelagsverteilung und die sich daraus ergebende Flussdichteverteilung für den Zeitpunkt  $\omega t = 120^\circ$  ein. [3 P]



räumliche Wicklungsverteilung (abgewickelte Darstellung  $p=1$ )



- 2.2 Welchen Einfluss hat die Stern-Dreieck-Umschaltung auf die Leerlaufdrehzahl einer Asynchronmaschine? [1 P]
- 2.3 Nennen Sie zwei Möglichkeiten, um das Anlaufmoment einer Asynchronmaschine zu erhöhen. [2 P]

Eine vierpolige Käfigläufer-Asynchronmaschine wird als Pumpenmotor in Sternschaltung an einem 400V/50Hz-Drehstromnetz betrieben. Von dem Asynchronmotor sind für den Nennpunkt folgende Daten bekannt:

Nennleistung:  $P_{\text{mech,N}} = 10 \text{ kW}$   
 Nenndrehzahl:  $n_N = 1425 \text{ min}^{-1}$   
 Leistungsfaktor:  $\cos\varphi_N = 0,83$

Das maximale Drehmoment der ASM tritt bei einer Drehzahl von  $1360 \text{ min}^{-1}$  auf. Der Statorwiderstand sowie Eisen-, Reibungs- und Zusatzverluste sind vernachlässigbar (vereinfachtes Ersatzschaltbild).

- 2.4 Bestimmen Sie für den Nennpunkt: [6 P]
- den Schlupf  $s_N$
  - das Drehmoment  $M_N$
  - die Luftspaltleistung  $P_{\delta,N}$
  - den Strangstrom  $I_{s,N}$
  - die Rotorverlustleistung  $P_{\text{vr,N}}$
  - den Wirkungsgrad  $\eta_N$
- 2.5 Bestimmen Sie für den Kippunkt: [2 P]
- den Schlupf  $s_K$
  - das Drehmoment  $M_K$
- 2.6 Wie groß ist das Anlaufmoment  $M_A$ ? [1 P]

### 3. Aufgabe: Vollpol-Synchronmaschine

- 3.1 Skizzieren Sie für den Betrieb am starren Netz die Stromortskurve einer Vollpol-Synchronmaschine ( $R_s = 0$ ), bei der die Erregung so gewählt wurde, dass nur untererregter Betrieb möglich ist. Kennzeichnen Sie den Betriebspunkt mit minimalem Phasenwinkel und den Betriebspunkt mit maximalem Drehmoment. [3 P]
- 3.2 Wie muss eine Synchronmaschine am Netz betrieben werden, um kapazitive Verbraucher zu kompensieren? [1 P]

Eine vierpolige Vollpol-Synchronmaschine wird in Sternschaltung am 400V/50Hz Drehstromnetz betrieben. Folgende Größen sind bekannt:

synchrone Reaktanz:  $X_d = 1,6 \Omega$   
 Polradspannung bei Nennerregung:  $U_{p,N} = 400 \text{ V}$   
 Verluste können vernachlässigt werden ( $R_s = 0$ )

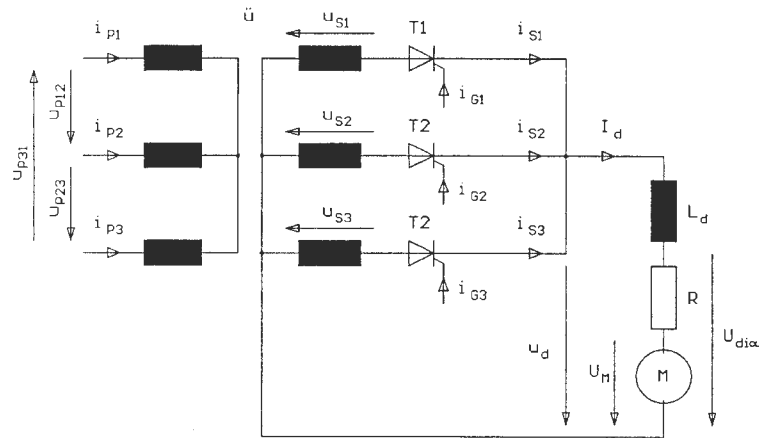
- 3.3 Im Nennpunkt gibt die Maschine bei Nennerregung eine mechanische Leistung von  $P_{\text{mech,N}} = 86,6 \text{ kW}$  ab. Berechnen Sie: [5 P]
- das Nennmoment  $M_N$
  - den Polradwinkel  $\vartheta_N$
  - den Strangstrom  $I_{s,N}$  (Tipp: Stromortskurve)
  - die elektrisch zugeführte Leistung  $P_{\text{el,N}}$
- 3.4 Die Maschine wird bei Nennerregung kurzzeitig bis zum Kippunkt belastet. Bestimmen Sie für diesen Betriebspunkt: [2 P]
- den Polradwinkel  $\vartheta_K$
  - das Kippmoment  $M_K$



## 3.Teil: Grundlagen der Leistungselektronik

Sämtliche Wechselgrößen sind als Effektivwerte gegeben!

## 1. Aufgabe: Dreipuls-Mittelpunktschaltung



$U_p = 200 \text{ V}_{AC}$  (verkettete Spannung)

$R = 3 \Omega$

$U_M = 37,4 \text{ V}$

$\ddot{u} = N_p/N_s = 1$

$\alpha = 60^\circ$  (Steuerwinkel)

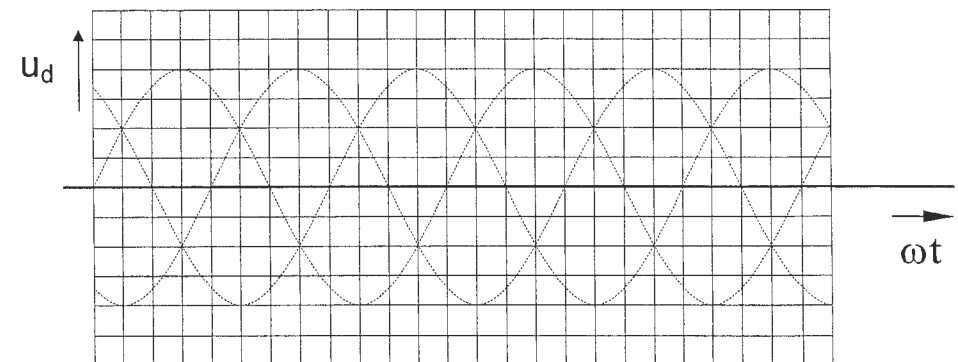
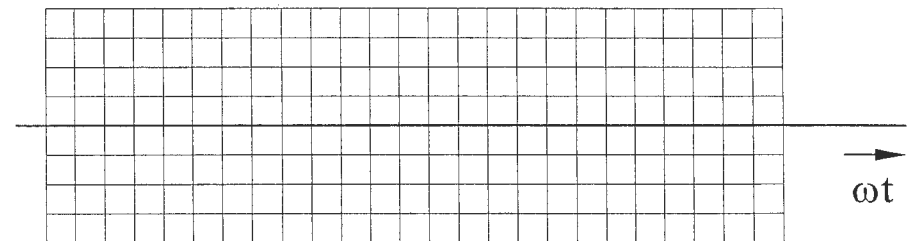
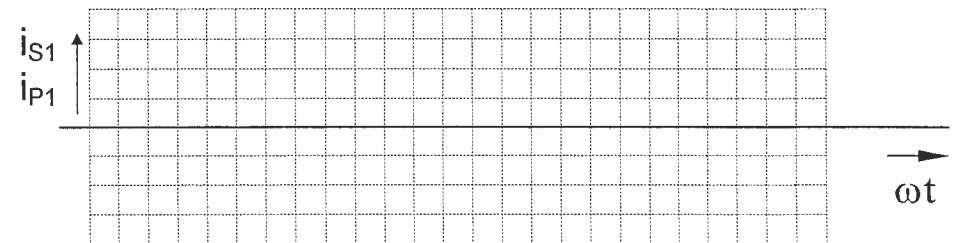
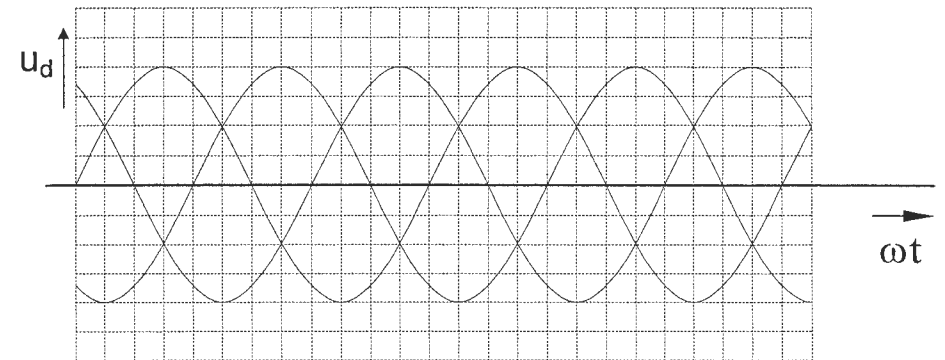
Gehen Sie von einem idealen Stromübergang von einem auf das andere Ventil aus. Die Induktivität  $L_d$  zur Glättung des Stromes soll zunächst als sehr groß angenommen werden ( $L_d \rightarrow \infty$ ).

- Skizzieren Sie den zeitlichen Verlauf von  $u_d$  (Bildblatt zur 1. Aufgabe).
- Berechnen Sie den Wert der Gleichspannung  $U_{dia}$  (Kommutierung, Durchlassspannungen vernachlässigt). Geben Sie das Integral (Formel) zur Berechnung von  $U_{dia}$  an und achten Sie auf die korrekte Angabe der Integralgrenzen.
- Berechnen Sie den Strom  $I_d$  und skizzieren Sie die Ströme  $i_{s1}$  und  $i_{p1}$  (Bildblatt zur 1. Aufgabe).

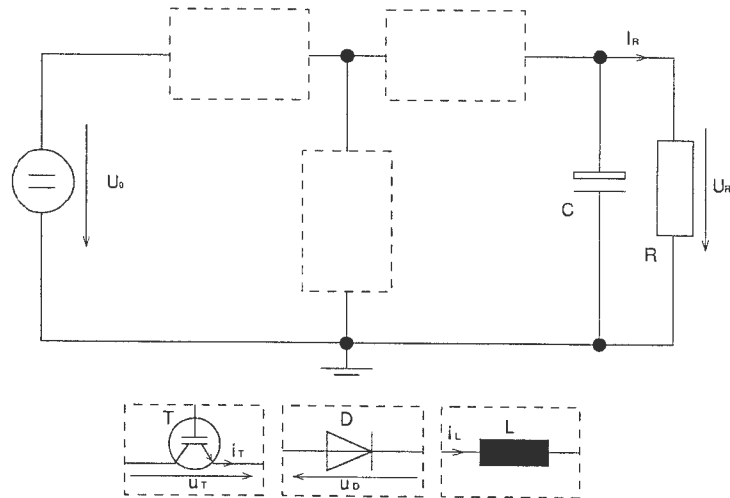
In der nun folgenden Betrachtung soll die Induktivität  $L_d$  nicht mehr unendlich groß sein ( $L_d < \infty$ ), so dass es zum Lückbetrieb kommt.

- Skizzieren Sie den zeitlichen Verlauf der Spannung  $u_d$  und den zeitlichen Verlauf des Stromes durch die Glättungsinduktivität  $L_d$  für den Fall, dass der Strom pro Halbwelle ca.  $15^\circ$  lückt (keine Berechnung).

## Bildblatt zur 1. Aufgabe



Bemaßen Sie die Ordinaten und tragen Sie charakteristische Werte ein!

**2. Aufgabe: Tiefsetz -Gleichstromsteller**

$U_0 = 100 \text{ VDC}$

Taktfrequenz:  $f_T = 20 \text{ kHz}$

Last:  $R = 2 \Omega$

$C \rightarrow \infty$  (sehr groß, vernachlässigbare Welligkeit der Spannung)

- Fügen Sie an den freigelassenen Stellen die unter der Zeichnung angeordneten Bauelemente mit der richtigen Polarität ein.
- Die Einschaltzeit  $t_{\text{ein}}$  des Transistors beträgt  $20 \mu\text{s}$ . Berechnen Sie die Ausschaltzeit  $t_{\text{aus}}$  und die Ausgangsspannung  $U_R$  der Schaltung. Welcher Laststrom (Zahlenwert) fließt durch den Lastwiderstand  $R$ ?
- Zeichnen Sie die zeitlichen Verläufe von Strom und Spannung am Transistor sowie von Strom und Spannung an der Induktivität unter der Voraussetzung, dass der Strom durch die Induktivität gerade noch nicht lückt (Bildblatt zur 2. Aufgabe).
- Berechnen Sie die Induktivität der Drossel.
- In einem neuen Betriebszustand besitzt der Lastwiderstand  $R$  nur noch den halben Wert ( $R_{\text{neu}} = 1/2 R = 1 \Omega$ ). Zeichnen Sie für diesen Fall den zeitlichen Verlauf des Stromes durch die Induktivität (Bildblatt zur 2. Aufgabe).

**Bildblatt zur 2. Aufgabe**

Transistor

$i_T$   $u_T$

Induktivität

$i_L$   $u_L$

Induktivität

$i_L$

Bemaßen Sie die Ordinaten und tragen Sie charakteristische Werte ein!  
Die Kurven sind eindeutig zu beschriften.

### 3. Aufgabe: Verständnisfragen

- a) Zeichnen Sie für eine gesteuerte Zweipuls-Mittelpunktschaltung (M2-Thyristor-Schaltung, Steuerwinkel  $\alpha > 0$ ) für eine sinusförmige Wechselspannung am Eingang die sich ergebenden zeitlichen Strom- und Spannungsverläufe  $u_d$  und  $I_d$  an der Last, wenn die Last gebildet wird aus:
  - einer Induktivität ( $L \neq \infty$ ) mit Reihenwiderstand
  - einem Widerstand
- b) Skizzieren Sie die Schaltsymbole von Diode, Thyristor und Bipolartransistor mit ihren Anschlussbezeichnungen und Strom/Spannungs-Kennlinien. Geben Sie die typischen Steuergrößen (Spannung, Strom) für die steuerbaren Halbleiter an. Welche Halbleiter würden Sie für einen selbstgeführten Wechselrichter einsetzen?
- c) Zeichnen Sie einen 2-Quadranten-Steller mit ohmsch-induktiver Last. Tragen Sie Strom- und Spannungspfeile an der Last ein und listen Sie tabellarisch die verschiedenen Möglichkeiten der Strom- und Spannungsrichtungen mit den beim Stromfluss beteiligten Halbleiter-Bauteilen auf.
- d) Erläutern Sie die Entstehung der Stromüberschwingungen / Netzzrückwirkungen, die bei netzgeführten Gleichrichterschaltungen im Netz auftreten und nennen Sie zwei Maßnahmen zur Verringerung der Stromüberschwingungen.

1.3

-1-

H 09/10

ges  $I_{fN}, U_{iN}, U_{aN}, P_{mechN}, R_N$ 

$$(2.55) \quad M = M'd I_a I_f \Rightarrow I_{fN} = \frac{M_N}{M'd I_a} = \frac{100}{1 \cdot 100} \frac{Nm}{H \cdot A} \\ = \underline{\underline{1 A}}$$

$$(2.44) \quad U_{iN} = M'd \cdot I_f \cdot \omega = \frac{1 \cdot 1 \cdot 1400 \cdot 2\pi \cdot 1}{60} \frac{min}{s} \\ = \underline{\underline{146.6 V}}$$

$$(2.44) \quad U_{aN} = R_a I_a + U_{iN} = 0.1 \cdot 100 + 146.6 \quad \Omega A + V \\ = \underline{\underline{156.6 V}}$$

$$(2.50) \quad P_{mech} = M \cdot N = \frac{100 \cdot 1400 \cdot 2\pi}{60} \frac{Nm \cdot min}{min \cdot s} \\ = \underline{\underline{14.66 kW}}$$

$$(Übung 1) \quad \eta_N = \frac{P_{mech}}{U_a I_a + U_i I_a} = \frac{14660}{156.6 \cdot 100 + 146.6 \cdot 1} \frac{kW}{VA + VA} \\ = \underline{\underline{0.927}}$$

1.4 ges  $n_N^*, M_N^*, P_{mech}^*$ 

$$(2.44) \quad n_N^* = \frac{U_i}{M'd I_f \cdot 2\pi} \frac{Vs}{H A \cdot min} \quad U_a = R_a \cdot I_a + U_i \\ U_i = U_a - R_a I_a$$

$$(2.55) \quad = 1509.51 \text{ min}^{-1}$$

$$M_N^* = M'd I_a \cdot I_f \\ = 1 \cdot (100) \cdot 1.455 \quad H \cdot A \cdot A$$

$$(2.50) \quad = -145.5 Nm$$

$$P_{mech}^* = M_N^* \cdot \omega^* = -145.5 Nm \cdot 1509.51 \cdot \frac{1}{min} \cdot \frac{2\pi}{60} \\ = -23 kW$$



2.2

$n_{0\Delta} \approx n_{0\lambda}$  nicht 3fach! nahezu unverändert  
 $3P_{\lambda} = P_{\Delta}$   $3M_{\lambda} \cdot \omega = M_{\Delta} \cdot \omega$   $\omega_{\lambda} = \omega_{\Delta}$

2.3

- ~~stern~~ Frequenzumrichter (FU)
- ~~Widerstände~~ Widerstände in die Läuferwicklung (Schleifringläufer)
- Luftspalt zwischen Läufer u. Ständer vergrößern.

2.4

ges  $s_N$ ,  $M_N$ ,  $P_{SN}$ ,  $I_{SN}$ ,  $P_{vFN}$ ,  $\eta_N$

$$(5.2) \quad s_N = 1 - \frac{n_N}{n_p} = 1 - \frac{1425 \frac{\text{min}}{\text{min}}}{1500 \frac{\text{min}}{\text{min}}} = 0,05$$

$n \frac{\text{min}}{\text{min}}$	$p$
3000	1
1500	2
1000	3

$$n_p = \frac{n}{p}$$

$$(5.62) \quad M_N = \frac{P_{\text{mech}}}{\omega_n} = \frac{10 \cdot 10^3 \frac{\text{W}}{\text{min}} \cdot 60 \frac{\text{s}}{\text{min}}}{1425 \cdot 2\pi} = 67 \text{ Nm}$$

$$(5.62) \quad P_{SN} = \frac{P_{\text{mech}}}{1-s} = \frac{10 \cdot 10^3 \text{ W}}{1-0,05}$$

$$(5.43) \quad = 10,526 \text{ kW}$$

$$I_{SN} = \frac{P_{SN}}{\sqrt{3} U_N \cos \varphi_N} = \frac{10526 \text{ W}}{\sqrt{3} \cdot 400 \cdot 0,83} = 18,3 \text{ A}$$

$$(5.62) \quad P_{vFN} = P_{SN} - P_{\text{mech}} = 10526 \text{ W} - 10000 \text{ W} = 526 \text{ W}$$

$$\eta_N = 1-s = \frac{P_{\text{mech}}}{P_{SN}} = \frac{n_N}{n_p} = 0,95$$

2.5

ges:  $S_K$ ,  $M_K$ 

$$(5.2) \quad S_K = 1 - \frac{n_{max}}{n_p} = 1 - \frac{1360}{1500} \frac{\text{min}}{\text{min}}$$

$$= 0,093$$

$$(\text{Übung 3}) \quad M_K = M_N \frac{S_N^2 + S_K^2}{2 S_N S_K} = 67 \frac{(0,05^2 + 0,093^2)}{2 \cdot 0,05 \cdot 0,093} \text{ Nm}$$

$$= 80,47 \text{ Nm}$$

2.6

 $M_K \cdot 2 S_K$  $Ma = \frac{\dots}{\dots}$  $S_K^2 + 1$ 

Formelsammlung Zusammenfassung S.13

3.2 Skript S.99  
 unterregt:  $U_p < U_s$

3.3

ges:  $M_N$ ;  $U_N$ ;  $I_{SN}$ ;  $P_{elN}$ 

$$(6.36) \quad M_N = \frac{P_{mechN}}{\Omega_N} = \frac{86,6 \cdot 10^3 \text{ W}}{1500 \cdot 2 \cdot \pi} \frac{60 \text{ min}}{\text{min}} \quad \text{Da 4 polig} \Rightarrow 2 \text{ Polpaare}$$

$$= 551,3 \text{ Nm}$$

$$(6.35) \quad \vartheta = \sin^{-1} \left( \frac{P_{mech} \cdot x_d}{m_s U_s U_p} \right) = \sin^{-1} \left( \frac{86,6 \cdot 10^3 \cdot 1,6}{\sqrt{3} \cdot 400 \cdot 400} \right) \frac{\text{W}}{\text{V} \cdot \text{V}}$$

$$= 30^\circ$$

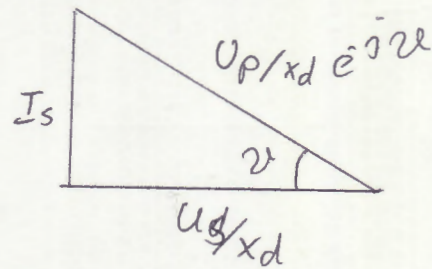
Taschenrechner: Deg!



3.3

$$(6.48) I_{s,N} = \frac{U_p \sin(30^\circ)}{x_d \cos(30^\circ)} = \frac{400 \sin 30^\circ}{1.6 \cos 30^\circ} \frac{V}{\Omega}$$

$$= \underline{\underline{144.34 A}}$$



$$(6.33) P_{el,N} = m_s U_p I_q = P_{mech} \quad (R_s = 0)$$

$$= \sqrt{3} \cdot 400 V \cdot 125 A$$

$$= \underline{\underline{86.6 kW}}$$

$$I_q = \frac{U_s \cdot \sin(30^\circ)}{x_d}$$

3.4

ges:  $\psi_{ki}$   $M_K$ 

$$\underline{\underline{\psi_{ki} = 90^\circ}} \quad \text{Bild (6.17)}$$

$$(6.36) M_K = \frac{m_s p U_s U_p \sin \psi}{\omega_s x_d}$$

$$= \frac{\sqrt{3} \cdot 2 \cdot 400 \cdot 400 \cdot 1}{2 \pi 50 \cdot 1.6} \frac{V \cdot V}{Hz \cdot \Omega}$$

$$= \underline{\underline{1102.66 Nm}}$$



TECHNISCHE UNIVERSITÄT  
CAROLO-WILHELMINA  
ZU BRAUNSCHWEIG



INSTITUT FÜR  
HOCHSPANNUNGSTECHNIK UND  
ELEKTRISCHE ENERGIEANLAGEN

Braunschweig, 20.03.2009  
Ku-Wo

**Diplom-Hauptprüfung im Wintersemester 2008/2009**

**Grundlagen der elektrischen Energietechnik**

1. Teil: Hochspannungstechnik und Energieübertragung

**Allgemeine Hinweise:**

Zur Bearbeitung der Aufgaben stehen zwei Stunden (120 Minuten) zur Verfügung.

Es sind **alle Unterlagen** sowie ein **Taschenrechner** (auch programmierbare) zugelassen.

Bei der Lösung der Aufgaben sind die einzelnen Lösungswege **klar** zu dokumentieren. Eine Aufgabe kann **nicht** gewertet werden, wenn mehrere Lösungswege mit unterschiedlichen Ergebnissen angeboten werden!

Bitte halten Sie einen Ausweis mit Lichtbild und ihren Studentenausweis bereit.

Die Termine der mündlichen Nachprüfungen werden durch Aushang bekannt gegeben.

**Bitte tragen Sie auf jedes Blatt oben rechts Ihren Vor- und Zunamen ein.**

Wir wünschen Ihnen einen klaren Kopf und viel Erfolg!

GdE

F09

pfg@tu-bs.de  
http://pfg-et.campus-bs.de

2

Braunschweig, 20.03.2009  
Ku-Wo

**Diplom-Hauptprüfung im Wintersemester**  
**2008/2009**

**Grundlagen der elektrischen Energietechnik**

1. Teil: Hochspannungstechnik und Energieübertragung

Name:	
-------	--

Vorname:	
----------	--

Matrikelnummer:							
-----------------	--	--	--	--	--	--	--

Ich bin damit einverstanden, dass mein Prüfungsergebnis im Internet unter meiner Matrikelnummer veröffentlicht wird.

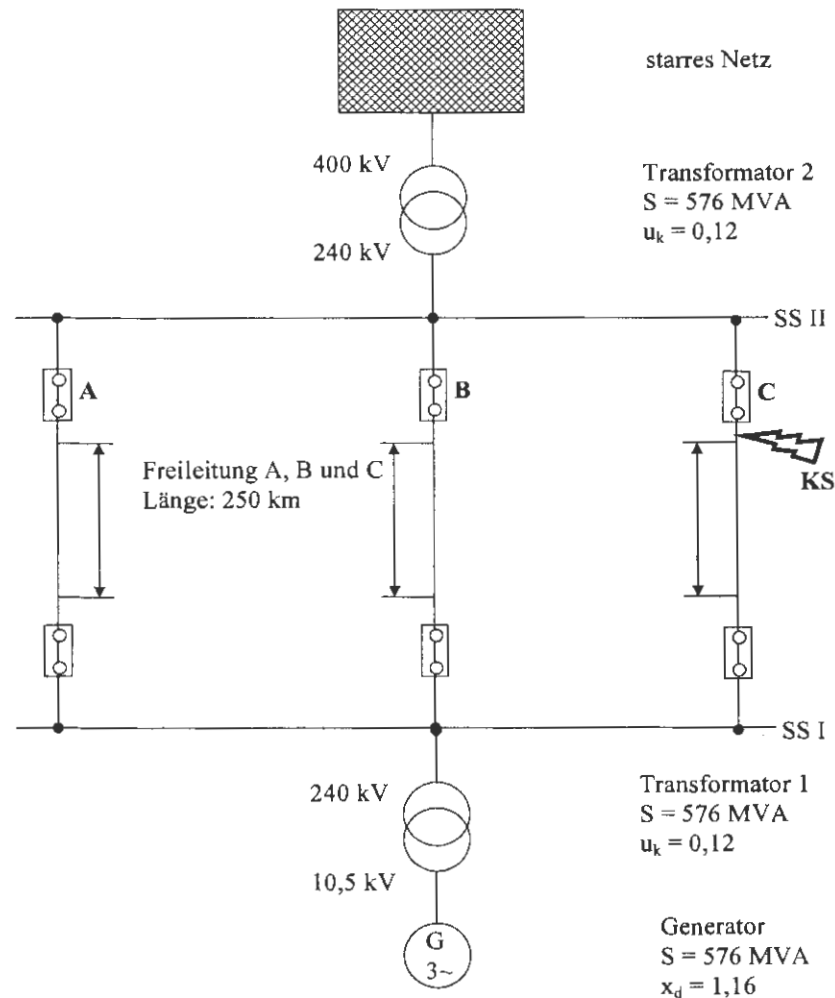
Unterschrift

	Punkte		
Aufgabe 1			
Aufgabe 2			
Summe			



**1. Aufgabe:**

Ein Generator G liegt über eine 250 km lange 240 kV Drehstrom-Dreifachleitung an einem starren Netz. Jede Drehstromfreileitung hat die Leitungsbeläge  $\omega L' = 0,4 \Omega/\text{km}$  und  $R' = 0,05 \Omega/\text{km}$ .



a.) Wie groß ist die natürliche Leistung einer Freileitung?

Alle Querglieder werden vernachlässigt. Die Leitungen sind als verlustfrei anzunehmen. Alle Leitungen sind zunächst in Betrieb.

b.) Zeichnen Sie das vollständige einphasige Ersatzschaltbild und berechnen Sie die Reaktanzen bezogen auf 240 kV. Fassen Sie dann das vollständige Ersatzschaltbild soweit wie möglich zusammen!

c.) Welche Wirkleistung kann mit  $\cos \varphi = 0,97$  (induktiv) höchstens in das starre 400 kV - Netz eingespeist werden, wenn aus Stabilitätsgründen 45% der Kipp Leistung nicht überschritten werden soll?  
Zeigerdiagramm 10 kV  $\triangleq$  1 cm

d.) Leitung A ist nun abgeschaltet, B und C sind in Parallelbetrieb. An der eingetragenen Stelle tritt ein dreiphasiger Kurzschluss (KS) auf. Die generatornahen Leistungsschalter im Schaltbild werden als geschlossen angenommen und im Weiteren vernachlässigt.  
Bestimmen Sie die notwendige dreiphasige Abschaltleistung des Leistungsschalters C! Als Netzreaktanz ist die Reaktanz des Transformators 2 zu nehmen.  
In welchem Schaltzustand wäre der Fehlerstrom an der eingetragenen Stelle maximal? Wie hoch wäre dieser Strom?

e.) Wie hoch ist der maximale Strom, für den jeweils die mechanische Festigkeit der beiden Sammelschienen (SS I und SS II) ausgelegt werden muss?

f.) Zwei der drei Leitungen sind infolge des erwähnten Kurzschlusses abgeschaltet. Der Erregerstrom des Generators hat sich nicht geändert. Der Generator arbeitet mit der maximalen Leistung aus Aufgabenteil c.). Welcher Übertragungswinkel  $\delta$  und welcher  $\cos \varphi$  stellen sich jetzt ein?  
Wie groß ist der Strom auf der Freileitung?  
Zeigerdiagramm 10 kV  $\triangleq$  1 cm

## 2. Aufgabe:

In einem Steinkohlekraftwerk mit einer elektrischen Scheinleistung von 100 MVA arbeitet ein Kessel, der Frischdampf von 150 bar und 550°C erzeugt. Dieser wird in einer Hochdruckturbine bis auf 250°C abgearbeitet, durch Zuführen einer spezifischen Wärme von 500 kJ/kg zwischenüberhitzt und anschließend in einer Niederdruckturbine bis zum Taupunkt entspannt. Turbinen und

Kesselspeisewasserpumpe werden als ideal angenommen.

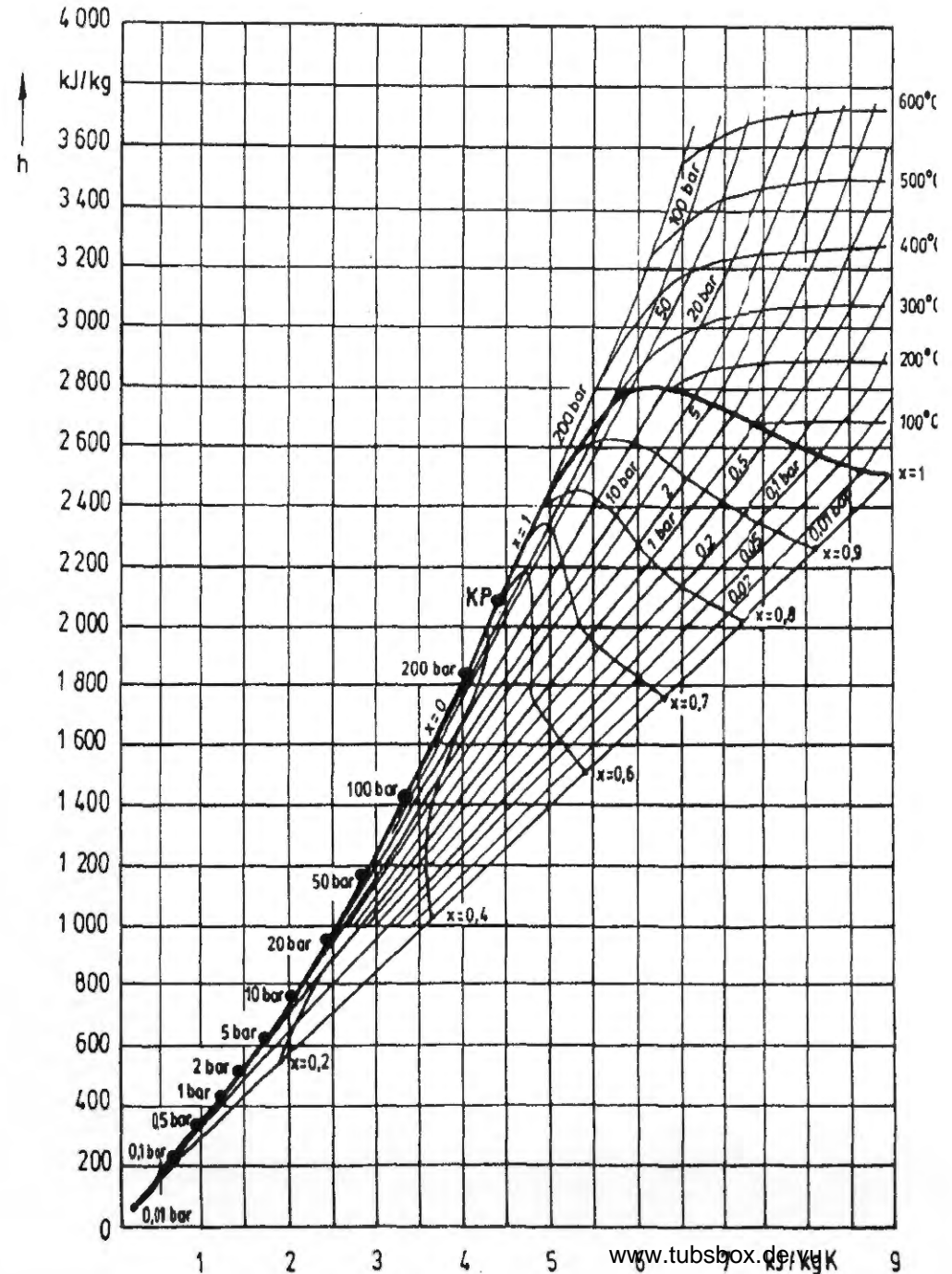


- Skizzieren Sie den Kreisprozess im beiliegenden h-s Diagramm! Wie groß ist der Dampfdruck beim Austritt aus der Niederdruckturbine?
- Berechnen Sie die notwendige Leistung der Kesselspeisewasserpumpe für die Annahme, dass vom Kraftwerk an der Turbinenwelle 80 MW geleistet werden!

Das Kraftwerk speist auf eine 170 km lange 110 kV-Drehstromfreileitung mit den Belegen  $R' = 0,12 \Omega/\text{km}$  und  $\omega L' = 0,38 \Omega/\text{km}$ .

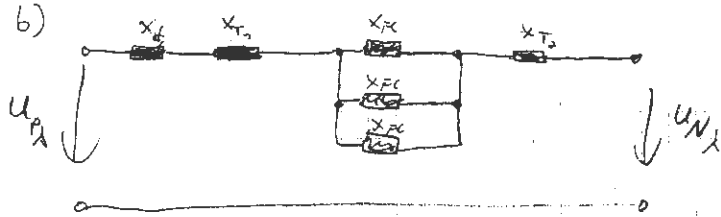
Alle Querglieder werden vernachlässigt.

- Welche Wirk- und Blindleistung nehmen die Verbraucher am Leitungsende ab, wenn am Leitungsanfang bei  $U_1 = 110 \text{ kV}$  die Scheinleistung des Kraftwerks mit einem induktiven  $\cos\varphi$  von 0,88 eingespeist wird? Zeichnen Sie das Ersatzschaltbild. Arbeiteten die Verbraucher kapazitiv oder induktiv? Zeigerdiagramm  $10 \text{ kV} \triangleq 2 \text{ cm}$



$$a) P_{out} = \frac{U_s^2}{Z} \quad Z = \sqrt{\frac{L}{C}} = \sqrt{\frac{0,4 \frac{s}{kV}}{4,3 \cdot 10^{-4} \frac{s}{kV}}} \approx 305 \Omega$$

$$\Rightarrow P_{out} = \frac{(240 kV)^2}{305 \Omega} = 188,85 \text{ MW}$$



$$X_L = \frac{(240 kV)^2 \cdot 0,76}{576 \text{ MVA}} = 776 \Omega$$

$$X_T = \frac{(240 kV)^2 \cdot 0,72}{576 \text{ MVA}} = 72 \Omega$$

$$X_{FC} = 250 kV \cdot 0,4 \frac{s}{kV} = 100 \Omega$$

$$X_{T_2} = X_{T_1}$$

$$X_{\Sigma} = 776 \Omega + 72 \Omega + \frac{1}{3} \cdot 100 \Omega + 72 \Omega = 173,3 \Omega$$



c)

$$P_{W_L} = P_k \cdot \sin \varphi$$

$$0,45 \cdot P_k = P \cdot \sin \varphi$$

$$\Rightarrow \varphi = 26,74^\circ$$

$$U_{N_1} = \frac{240 kV}{\sqrt{3}} = 138,56 kV$$

$$\cos \varphi = 0,97$$

$$\Rightarrow \varphi = 74,07^\circ$$

$$U_X = 8,16 \text{ km}$$

$$U_X = 81 kV$$

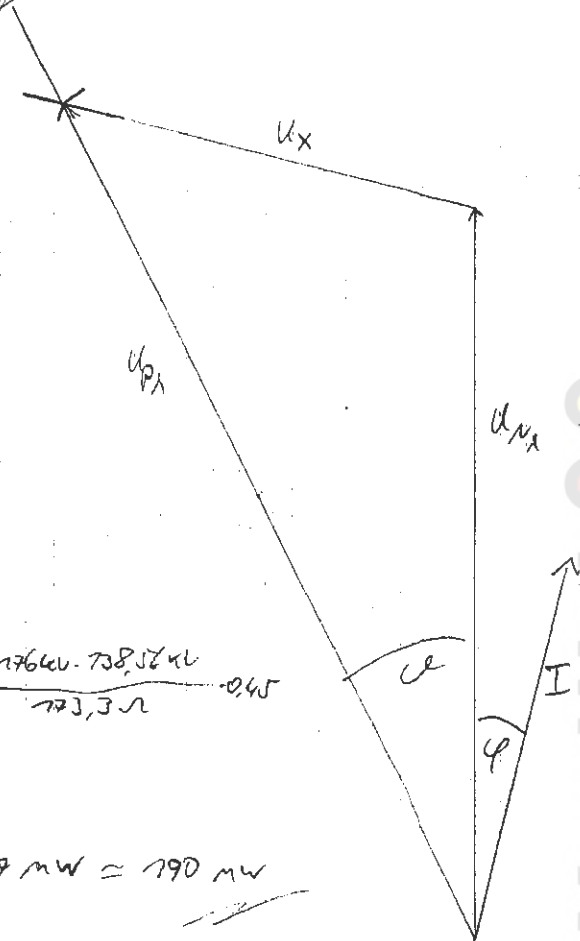
$$U_{P_1} = 72,6 \text{ km}$$

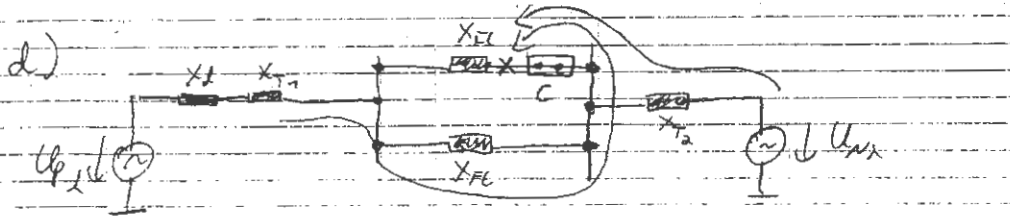
$$U_{P_1} = 726 kV$$

$$P_{W_L} = \frac{U_{P_1} \cdot U_{N_1} \cdot \sin \varphi}{X_{\Sigma}} = \frac{726 kV \cdot 138,56 kV}{173,3 \Omega} \cdot 0,45$$

$$= 63,32 \text{ MW}$$

$$P_{W_\Delta} = 3 \cdot P_{W_L} = 189,96 \text{ MW} \approx 190 \text{ MW}$$





$$I_{K1} = \frac{U_{\Delta}}{\sqrt{3} X_{T1}} = \frac{240 \text{ kV}}{\sqrt{3} (12 \Omega)} = 11,55 \text{ kA}$$

$$I_{K_{KW}} = \frac{U_{\Delta}}{\sqrt{3} (X_1 + X_{T1} + \frac{X_{FL}}{2})} = \frac{240 \text{ kV}}{\sqrt{3} (178 \Omega)} = 778,44 \text{ kA}$$

$$I_{K2} = I_{K1} + \frac{1}{2} I_{K_{KW}} = 11,55 \text{ kA} + 389,22 \text{ kA} = 11,939 \text{ kA}$$

$$S_{L3n} = \sqrt{3} U_{\Delta} I_{K2} = \sqrt{3} \cdot 240 \text{ kV} \cdot 11,939 \text{ kA} = 4962,9 \text{ MVA}$$

Der Strom wird maximal, wenn alle Leitungen in Parallelbetrieb wären.

$$I_{K_{KW}} = \frac{U_{\Delta}}{\sqrt{3} (X_1 + X_{T1} + \frac{1}{3} X_{FL})} = 858,89 \text{ A}$$

$$I_{K2} = I_{K1} + \frac{1}{3} I_{K_{KW}} = 12,72 \text{ kA}$$

e)  $I_s = 2 \sqrt{2} I_K$

SS I:

$$I_{s_{KW}} = \frac{240 \text{ kV}}{\sqrt{3} \cdot 128 \Omega} = 7082,53 \text{ A}$$

$$I_{s_{II}} = \frac{240 \text{ kV}}{\sqrt{3} (33,33 \Omega + 128 \Omega)} = 3,957 \text{ kA}$$

$$I_{s_{T}} = \sqrt{2} \cdot 4,139 \text{ kA} = 777 \text{ kA}$$

GS II:

$$I_{s_{KW}} = \frac{240 \text{ kV}}{\sqrt{3} (128 \Omega + 33,33 \Omega)} = 858,9 \text{ A}$$

$$I_{s_{II}} = \frac{240 \text{ kV}}{\sqrt{3} \cdot 128 \Omega} = 7750 \text{ kA}$$

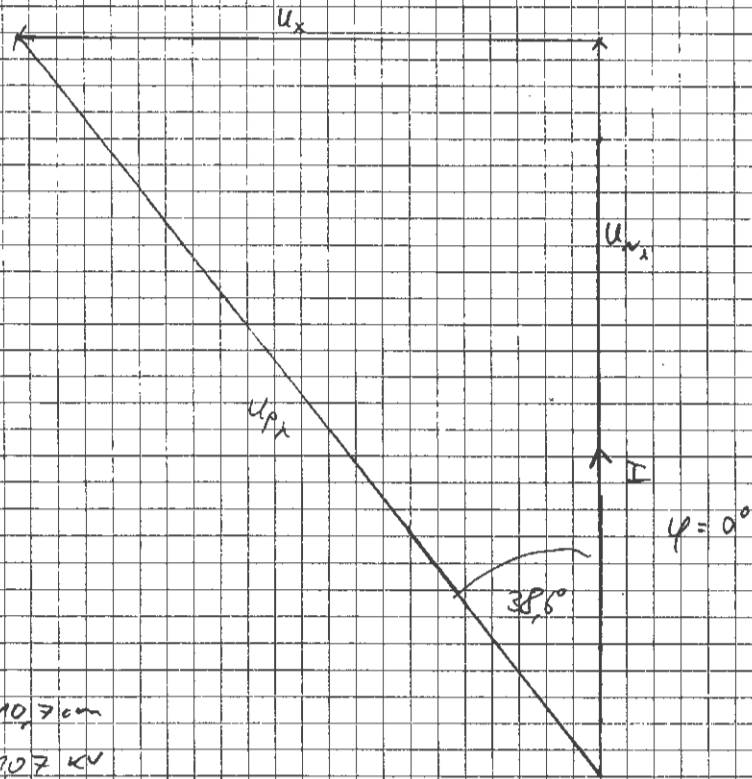
$$I_{s_{II}} = \sqrt{2} \cdot 77,6 \text{ kA} = 55,09 \text{ kA}$$



f)  $P_A = 6332 \text{ MW}$   $I_{\text{eff}} = \text{const} \rightarrow |U_A| = 176 \text{ kV}$

$X_{\text{ges}} = 776 \Omega + 72 \Omega + 100 \Omega + 72 \Omega = 240 \Omega$

$\varphi = \arccos\left(\frac{240 \Omega \cdot 6332 \text{ MW}}{176 \text{ kV} \cdot 138,56 \text{ kV}}\right) = \arccos(0,623) = 38,56^\circ$



$U_x = 10,7 \text{ cm}$

$U_x = 107 \text{ kV}$

$I = \frac{U_x}{X_{\text{ges}}} = \frac{107 \text{ kV}}{240 \Omega} = 445,8 \text{ A}$

6/12



(2) a) s. h-s-Diagramm

Der Dampfdruck beträgt etwa 7 bar

$$b) \quad h_H = h_2 - h_3 = 3500 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - 2900 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 600 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$h_N = h_4 - h_5 = 3400 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - 2680 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 720 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$P_t = 80 \text{ MW} = \dot{m} \left( 600 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} + 720 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right) = 1320 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$\Rightarrow \dot{m} = 60,67 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \quad (\text{Massenstrom})$$

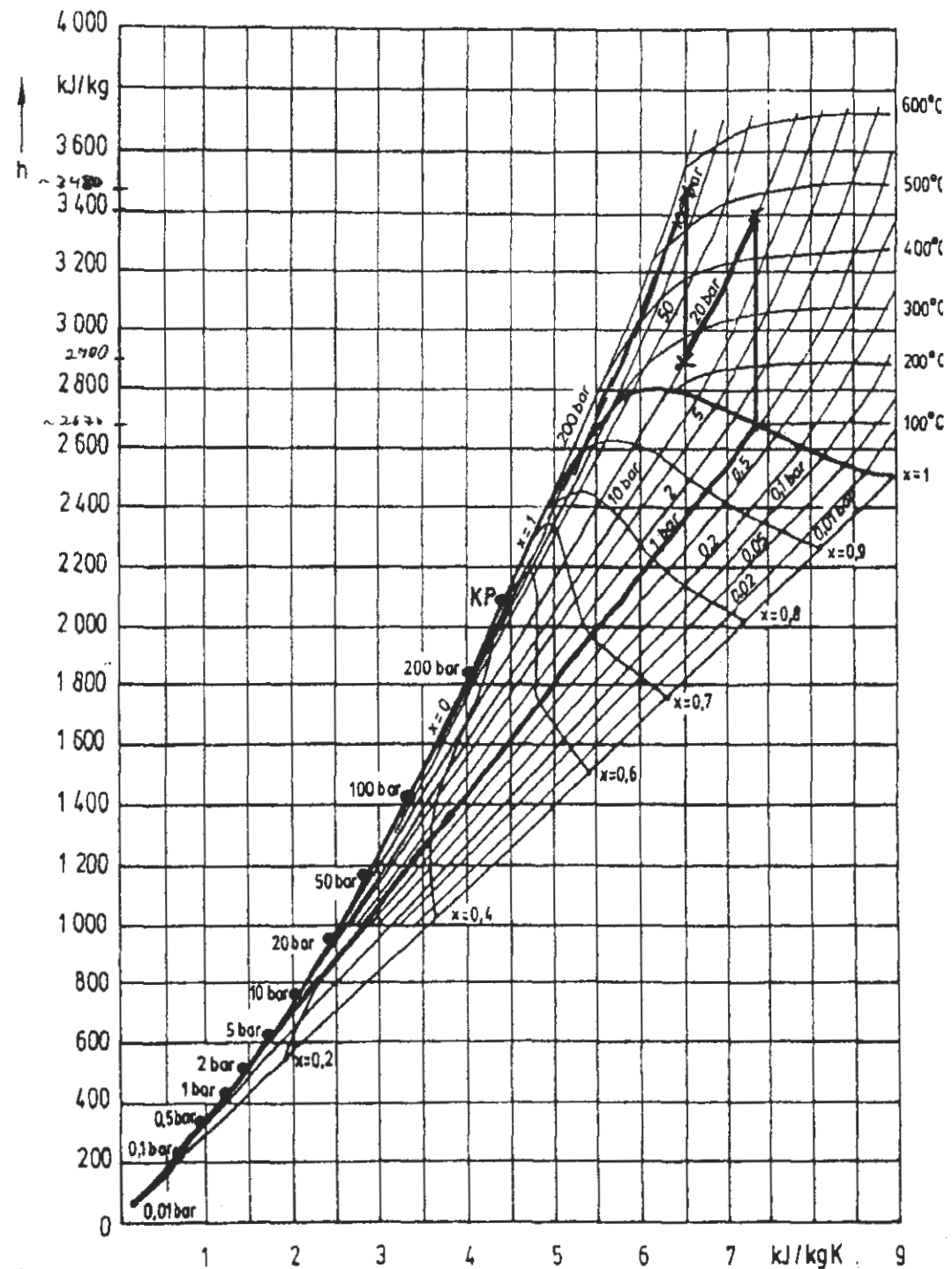
spez. Verdichtungsarbeit

$$w_{t,p} = v \cdot \Delta p = 1 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} (150 \text{ bar} - 7 \text{ bar})$$

$$= 10^{-3} \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \cdot 143 \cdot 10^5 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$$

$$= 14,30 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$\Rightarrow P_{t,p} = \dot{m} \cdot w_{t,p} = 60,67 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot 14,30 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 869,69 \frac{\text{kJ}}{\text{s}} = 869,7 \text{ kW}$$



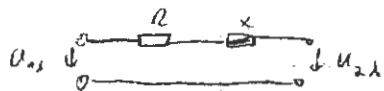
h,s Diagramm von Wasserdampf

(2)

6)

$$R = 170 \text{ k}\Omega \cdot 0,12 \frac{\Omega}{\text{k}\Omega} = 20,4 \Omega$$

$$X = 170 \text{ k}\Omega \cdot 0,38 \frac{\Omega}{\text{k}\Omega} = 64,6 \Omega$$



$$U_{1,1} = \frac{170 \text{ kV}}{\sqrt{3}} = 63,5 \text{ kV}$$

$$\varphi_1 = \arccos(0,88) = 28,35^\circ$$

$$U_x = I \cdot X = 524,8 \text{ A} \cdot 64,6 \Omega = 33,9 \text{ kV}$$

$$U_R = I \cdot R = 524,8 \text{ A} \cdot 20,4 \Omega = 10,7 \text{ kV}$$

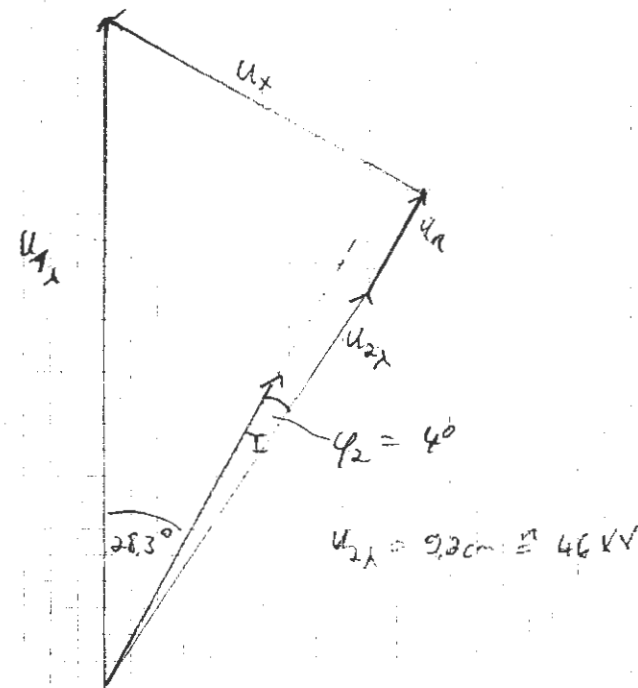
$$I = \frac{S_1}{\sqrt{3} \cdot U_{1,1}} = \frac{100 \text{ MVA}}{\sqrt{3} \cdot 170 \text{ kV}} = 524,8 \text{ A}$$

$$I_{2,1} = \sqrt{3} \cdot U_{2,1} \cdot I = 3 \cdot U_{2,1} \cdot I = 3 \cdot 46 \text{ kV} \cdot 524,8 \text{ A} = 72,42 \text{ MVA}$$

$$P_{2,1} = \cos(3,5^\circ) \cdot 72,42 \text{ MVA} = 72,28 \text{ MVA}$$

$$Q_{2,1} = \sin(3,5^\circ) \cdot 72,42 \text{ MVA} = 4,42 \text{ MVA}$$

30



- 1)  $U_x$  vertikal eintragen
- 2)  $I$  qualitativ unter  $\varphi_1 = 28,3^\circ$  eintragen
- 3)  $\perp$  zu  $I$   $U_x$  antragen
- 4) parallel zu  $I$  an den Beginn von  $U_x$   $U_R$  antragen
- 5) Spannungswalk ergibt  $U_{2,1}$ ,  $U_{2,1}$  ausmessen
- 6)  $\varphi_2$  ausmessen

8/12

Die verbrauchte reaktive Kapazität.





IMAB

BRAUNSCHWEIG, DEN 20. MÄRZ 2009  
HANS-SOMMER-STRASSE 66  
38106 BRAUNSCHWEIG

POSTFACH 33 29  
38023 BRAUNSCHWEIG  
TELEFON NR. (0531) 391 3913  
FAX NR. (0531) 391 5767

TECHNISCHE UNIVERSITÄT BRAUNSCHWEIG  
INSTITUT FÜR ELEKTRISCHE MASCHINEN,  
ANTRIEBE UND BAHNEN

PROF. DR.-ING. W.-R. CANDERS

## Hauptdiplomprüfung

### Grundlagen der elektrischen Energietechnik (Elektromechanische Energieumformung)

Frühjahr 2009

#### Einleitendes

Die Prüfung besteht aus vier Aufgaben, die in mehrere Unterpunkte aufgeteilt sind. Lassen Sie in Ihren Ergebnissen einen deutlichen Lösungsweg erkennen. Eine Endformel und das Ergebnis reichen nicht aus.

Schreiben Sie bitte in Ihrem eigenen Interesse deutlich. Jedes Blatt sollte Ihren Namen und Ihre Matrikelnummer enthalten.

Die Ergebnisse der Klausur und eventuelle Termine für die mündlichen Nachprüfungen werden per Aushang am schwarzen Brett des Instituts bekannt gegeben.

Name, Vorname: \_\_\_\_\_

Matrikelnummer: \_\_\_\_\_

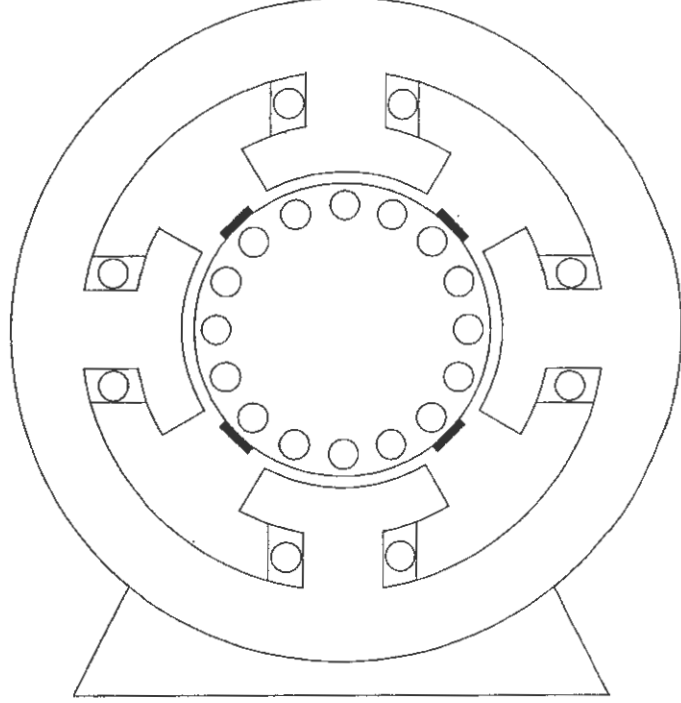
**Viel Erfolg!**

Aufgabe	Punkte	Erstkorrektur	Zweitkorrektur
1			
2			
3			
4			
Summe			

Note	
------	--

9/12

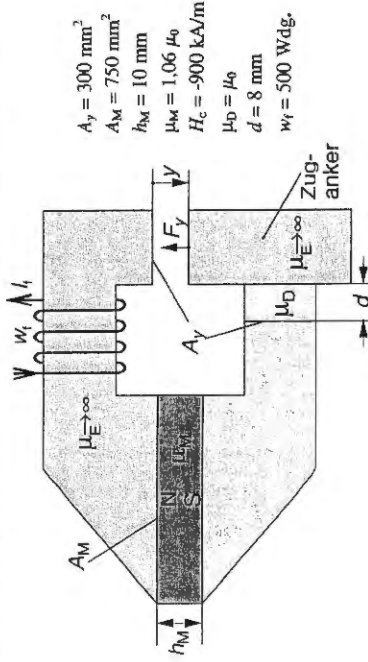
zu Aufgabe 2.1) und 2.2)



## 1 Magnetischer Kreis

- 1.1 Zeichnen Sie das magnetische Ersatzschaltbild eines Permanentmagneten (Abmessungen: Magnethöhe  $h_M$ , Querschnittsfläche  $A_M$ ) und geben Sie die Elemente formelmäßig an. [2 P]
- 1.2 Wie lautet das ohmsche Gesetz des Magnetkreises? Welche Einheiten besitzen die Formelelemente? Stellen Sie die Analogie zum elektrischen Kreis her. [2 P]
- 1.3 Welche maximale Flussdichte ist in der Praxis im Luftspalt von elektrischen Maschinen erreichbar? [1 P]

Die nachfolgende Skizze zeigt ein elektromechanisches System bestehend aus einem feststehenden Magnetkreis ( $\mu_E \rightarrow \infty$ ) mit einer Permanentmagnetierung ( $\mu_M$ ,  $H_C$ ,  $h_M$ , Querschnittsfläche  $A_M$ ), einer Zusatzerrerspule ( $w_f$ ,  $I_f$ ) und einem in  $y$ -Richtung beweglichen Zuganker ( $\mu_E \rightarrow \infty$ ,  $A_y$ ). Dieser stützt sich seitlich gegen ein nichtmagnetisches Distanzstück ab ( $\mu_0 = \mu_0$ , Querschnittsfläche  $A_y$ ). Randeffekte und Streuung können vernachlässigt werden.



Eine zweipolige Gleichstrom-Reihenschlussmaschine besitzt im Nennpunkt folgende Daten:

Drehzahl	:	$n_N = 1500 \text{ min}^{-1}$
mech. Leistung	:	$P_{\text{mech},N} = 25,8 \text{ kW}$
Klemmenspannung	:	$U_N = 200 \text{ V}$
Wirkungsgrad	:	$\eta_N = 0,86$

Sättigungserscheinungen im Eisenkreis, Reibungs- und Eisenverluste, sowie Verluste durch die Wendepol- oder Kompensationswicklung werden nicht berücksichtigt.

- 2.4 Berechnen Sie den Nennstrom  $I_N$ , die Rotationsinduktivität  $M_d$  und den Gesamtwiderstand  $R_{\text{ges}} = R_s + R_f$  der Maschine. [3 P]
- 2.5 Die Maschine besitzt einen mittleren (Rotor-)Luftspaltdurchmesser von  $D_s = 200 \text{ mm}$  und eine Blechpaketlänge von  $\ell_g = 225 \text{ mm}$ . Wie groß ist der Dreheschub  $\tau_w$  (= spezifische Kraft) im Nennpunkt? [2 P]
- 2.6 Welcher Vorwiderstand  $R_v$  ist notwendig, damit der Anfahrstrom auf  $300 \text{ A}$  begrenzt wird? Wie groß ist der Wirkungsgrad mit diesem Vorwiderstand bei Nenn Drehzahl? [3 P]

- 1.4 Zeichnen Sie für die skizzierte Anordnung das magnetische Ersatzschaltbild (ESB) und geben Sie die einzelnen Elemente des ESB formelmäßig an. [3 P]
- 1.5 Bestimmen Sie den Sammelfaktor  $S$  der Anordnung. [1 P]
- 1.6 Geben Sie formelmäßig die Luftspaltflussdichte  $B_g(y)$  als Funktion der Luftspaltlänge  $y$  an, wenn die Zusatzerrerspule berücksichtigt wird. Berechnen Sie  $B_g(y)$  für  $y = 1 \text{ mm}$ ,  $I_f = 1 \text{ A}$ . [3 P]
- 1.7 Welcher Erregerstrom  $I_f$  muss in der Zusatzerrerspule eingestellt werden, damit auf den Zuganker keine magnetische Kraft wirkt? [2 P]
- 1.8 Wie groß ist die magnetische Energie  $W_m$  in den Bereichen der skizzierten Anordnung, für die  $\mu_E \rightarrow \infty$  angenommen wird? [1 P]

## 2 Gleichstrommaschine

- 2.1 Auf der Rückseite des Deckblattes ist das Radialschnittbild einer vierpoligen Gleichstrommaschine skizziert. Tragen Sie die Stromrichtungen für Erreger- und Ankerwicklung so ein, dass sich der Rotor in der Draufsicht links herum dreht. [2 P]
- 2.2 Zeichnen Sie in das Bild aus Aufgabenteil 2.1 den prinzipiellen Verlauf der Feldlinien des Erregerfeldes und des Ankerfeldes ein. [2 P]
- 2.3 Skizzieren Sie die Drehmoment-Drehzahl-Kennlinie eines Reihenschluss-Gleichstrommotors bei Betrieb mit den Klemmenspannungen  $U = U_N$  und  $U = 0,5 U_N$ . Zeichnen Sie zusätzlich eine typische Lastkennlinie (z. B. Fahrwiderstand) ein und kennzeichnen Sie jeweils den stationären Arbeitspunkt. [3 P]

## 3 Asynchronmaschine (ASM)

- 3.1 Zeichnen Sie das einsträngige Ersatzschaltbild einer Drehstromwicklung und benennen Sie die einzelnen Elemente. [2 P]
- 3.2 Warum ist bei einer Käfigläufer-ASM kein übererregter Betrieb wie bei Synchronmaschinen möglich? [1 P]
- 3.3 Wodurch ist der Betrieb einer Asynchronmaschine mit 'optimalem' Leistungsfaktor  $\cos \varphi$  gekennzeichnet? [1 P]
- Eine sechspolige Käfigläufer-Asynchronmaschine weist bei Betrieb an einem 50 Hz-Drehstromnetz im Nennpunkt folgende Daten auf:

Nenn Drehzahl:	$n_N = 950 \text{ min}^{-1}$
aufgenommene Wirkleistung:	$P_{\text{el},N} = 24 \text{ kW}$

Im Kippunkt wird die Drehzahl  $n_k = 900 \text{ min}^{-1}$  gemessen. Der Statorwiderstand sowie Eisen-, Reibungs- und Zusatzverluste können vernachlässigt werden.

- 3.4 Ermitteln Sie für den Nennpunkt den Schlupf  $s_N$ , die Rotorverlustleistung  $P_{\text{vr},N}$ , den Wirkungsgrad  $\eta_N$  und das Drehmoment  $M_N$ . [4 P]
- 3.5 Ermitteln Sie für den Kippunkt den Schlupf  $s_k$ , die aufgenommene Wirkleistung  $P_{\text{el},k}$  und das Kippmoment  $M_k$ . [3 P]
- 3.6 Ermitteln Sie für die Drehzahlen  $n = 0, 400, 800, 900, 950$  und  $1000 \text{ min}^{-1}$  das Drehmoment der Maschine (Hilfe: Kloss'sche Formel). Skizzieren Sie mit diesen Werten als Stützstellen den Drehmoment-/Drehzahlverlauf dieser Maschine im ersten Quadranten des  $M/n$ -Diagramms. [4 P]



#### 4 Vollpol-Synchronmaschine

4.1 Skizzieren Sie die Drehmoment-Drehzahl-Kennlinie einer Asynchronmaschine, einer Synchronmaschine und einer fremderregten Gleichstrommaschine mit jeweils gleicher Leerlaufdrehzahl in ein gemeinsames Diagramm (nur 1. Quadrant). [3 P]

4.2 Wie muss eine Synchronmaschine am Netz betrieben werden, um induktive Verbraucher zu kompensieren? [1 P]

4.3 Wie groß ist der Unterschied zwischen der Hauptinduktivität  $L_h$  eines Stranges und der Drehfeldinduktivität  $L_{\delta}$ ? [1 P]

Eine vierpolige Vollpol-Synchronmaschine wird in Sternschaltung mit Nennernregung am 400 V-50 Hz-Drehstromnetz betrieben. Bei Vernachlässigung sämtlicher Verluste ( $R_s = 0$ ) gilt:

Synchronreaktanzen:  $X_d = 1,1 \Omega$

Polradspannung bei Nennernregung:  $U_{p,N} = 288 \text{ V}$

4.4 Wie groß ist der Leerlaufstrom  $I_{L,0}$  bei unbelasteter Maschine (Phasenschieber)? Ist die Maschine in diesem Betriebspunkt über- oder untererregt? Begründen Sie Ihre Antwort. [2 P]

4.5 Wie groß sind im Kippunkt der Polradwinkel  $\vartheta_k$  und das Kippmoment  $M_k$  der Maschine? [2 P]

4.6 Berechnen Sie den Phasenwinkel  $\varphi_k$  zwischen Strangspannung und Strangstrom im Kippunkt (Hilfe: Stromortskurve). [2 P]

4.7 Wie groß ist die maximal abgebbare mechanische Leistung der Maschine bei Nennernregung? [1 P]

4.8 Die Maschine soll mit einem maximalen Drehmoment  $M_{L,max} = 1500 \text{ Nm}$  belastet werden können. Um welchen Faktor muss die Erregung gegenüber der Nennernregung erhöht werden, damit dies möglich ist? [2 P]

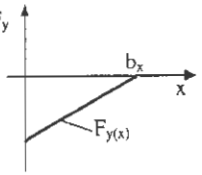
11/12

4.9 Welches maximale Drehmoment kann die Maschine bei Nennernregung in Dreieckschaltung abgeben? [1 P]

#### Lösungen zu den Rechen-Aufgabenteilen der Klausur Frühjahr 2007

1.5 $S = 2$	2.5 $R_a = 0,1 \Omega$ $R_f = 0,01 \Omega$ $M_d = 1,1 \text{ mH}$	3.4 $\cos \varphi_k = 0,58$ $P_{\delta,k} = 34641 \text{ W}$	4.4 $U_{p,N} = 230,9 \text{ V}$ $X_d = 1 \Omega$
1.6 $\vec{B}_{\delta(y,I_f)} = \frac{B_f \cdot h_M + w_f \cdot I_f \cdot \mu_M}{h_M \cdot \frac{A_y}{A_M} + (1,06 \cdot 2 \cdot y)}$	2.6 $I_N = 137,3 \text{ A}$ $M_N = 20,73 \text{ Nm}$	3.5 $I_{s,0} = 20 \text{ A}$ 3.6 $I_{s,-\infty} = 120 \text{ A}$	4.5 $M_k = 509,1 \text{ Nm}$ $P_{mech,k} = 159,94 \text{ kW}$
1.7 $B_{\delta(y=10 \text{ mm}, I_f=0)} = 0,458 \text{ T}$ $m = 5,1 \text{ kg}$	2.7 $P_{mech,N} = 13029 \text{ W}$ $\eta_N = 0,86$ 2.8 $U^* = 78,36 \text{ V}$	3.7 $\cos \varphi_{min} = 0,714$ 3.8 $\ddot{u} = \frac{M_k}{M \cos \varphi_{min}}$ $= \frac{I_{siv,k}}{I_{siv,\varphi_{min}}} = 1,428$	4.6 $\varphi_k = 45^\circ$ 4.7 $U_s = 230 \text{ V}$ $\Rightarrow U_L = \sqrt{3} \cdot U_s$ $= 346,35 \text{ V}$

#### Lösungen zu den Rechen-Aufgabenteilen der Klausur Herbst 2007

1.4 $A_M = 7500 \text{ mm}^2$	2.4 $I_{f,N} = 1 \text{ A}$ $U_{i,N} = 146,6 \text{ V}$ $U_{a,N} = 156,6 \text{ V}$ $P_{mech,N} = 14661 \text{ W}$ $\eta_N = 0,92$	3.5 $P_{\delta,k} = 34641 \text{ W}$	4.5 $U_{p,N} = 73,3 \text{ V}$ untererregt
1.5 $F_y = -\frac{\partial W_{m,ges}}{\partial y}$ $= -\frac{B_{\delta}^2}{\mu_0} \cdot (b_x -  x ) \cdot l_z$ 	2.5 $n^* = 1509 \text{ min}^{-1}$ $M^* = -145,5 \text{ Nm}$ $P_{mech}^* = -23000 \text{ W}$ $P_{v,el}^* = 1529 \text{ W}$	3.6 $I_{s,0} = 20 \text{ A}$ 3.7 $I_{s,N} = 50 \text{ A}$ 3.8 $I_{s,-\infty} = 120 \text{ A}$	4.6 $X_d = 0,66 \Omega$ $M_k = 242,5 \text{ Nm}$ 4.7 $\varphi_{min} = 71,5^\circ$ 4.8 $U_s = 56,1 \text{ V}$ $\Rightarrow U_L = \sqrt{3} \cdot U_s$ $= 97,2 \text{ V}$

Lösungen zu den Rechen-Aufgabenteilen der Klausur Frühjahr 2008

1.5 $B_{\delta 1} = 0,359 \text{ T}$ $B_{\delta 2} = 0,719 \text{ T}$ $B_{\delta 3} = 0,359 \text{ T}$	2.5 $P_{el,N} = 20800 \text{ W}$ $\eta_N = 0,805$ $U_{i,N} = 167,5 \text{ V}$	3.5 $n_0 = 1000 \text{ min}^{-1}$ $n_N = 970 \text{ min}^{-1}$	4.4 $U_{p,N} = 529,3 \text{ V}$ $X_d = 1,6 \Omega$
1.6 $L_f = 0,13 \cdot 10^{-3} \text{ H}$	2.6 $R_a = 0,324 \Omega$ $M'_d = 0,5 \text{ H}$	3.6 $M_N = 196,9 \text{ Nm}$ $M_k = 584,8 \text{ Nm}$ $M_{st} = 196,4 \text{ Nm}$	4.5 $\frac{I_f}{I_f^*} = 1,95$
	2.7 $n_0 = 954,93 \text{ min}^{-1}$ $M_{st} = 1234,56 \text{ Nm}$	3.7 $n^* = 982,5 \text{ min}^{-1}$	4.6 $M_k = 2527,3 \text{ Nm}$ $P_{mech,k} = 397 \text{ kW}$
	2.8 $R_{a,v} = 0,324 \Omega$ 2.9 $R_{f,v} = 50 \Omega$	3.8 nein: $M_{st}^* < M_L$ $M_{st}^* = 65,5 \text{ Nm}$ $M_L = 98,5 \text{ Nm}$	4.7 $M_G = 1655 \text{ Nm}$

Lösungen zu den Rechen-Aufgabenteilen der Klausur Herbst 2008

1.5 $B_{\delta (\delta=5\text{mm})} = 0,58 \text{ T}$	2.4 $I_N = 100 \text{ A}$ $M'_d = 10 \cdot 10^{-3} \text{ H}$ $R_d + R_f = 0,312 \Omega$ $n_0 = \infty$	3.4 $p = 3$ $s_N = 0,035$ 3.5 $M_N = 445,3 \text{ Nm}$	4.4 $U_s = 231 \text{ V}$ $I_s = 11 \text{ A}$ 4.5 untererregt da $U_p < U_s$
1.6 Ansatz: $W_m = \frac{1}{2} \sum_v \frac{B_v^2}{\mu_v} \cdot V_v$ $A_E \approx A_M = A$ $W_m = \frac{B_d^2 \cdot A}{2\mu_0} \left[ \frac{(l_{E1} + l_{E2} + l_{E3})}{\mu_{r,E}} + \frac{l_{M}}{\mu_{r,M}} + 2\delta \right]$	2.5 $R_v = 1,258 \Omega$ $n^* = 1500 \text{ min}^{-1}$ 2.6 $\tau_p = 117,8 \text{ mm}$ $\alpha = 0,68$	3.6 $\cos \varphi_N = 0,795$ $\eta_N = 0,965$ 3.7 $M_A = 666,8 \text{ Nm}$	4.6 Faktor 2,1 4.7 $I_k = 10 \text{ A}$
1.7 $L_{(\delta=5\text{mm})} = 6,95 \text{ mH}$	2.7 $B_{f,mi} = 0,6 \text{ T}$ $\tau_w = 14,15 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$	3.8 $M_k = 1514 \text{ Nm}$ $s_k = 0,232$	4.8 $M_k = 132,3 \text{ Nm}$ $P_k = 6930 \text{ W}$ 4.9 $\vartheta = 32,44^\circ$





TECHNISCHE UNIVERSITÄT  
CAROLO-WILHELMINA  
ZU BRAUNSCHWEIG



INSTITUT FÜR  
HOCHSPANNUNGSTECHNIK UND  
ELEKTRISCHE ENERGIEANLAGEN

Braunschweig, 08.10.2008  
Ku-Wo

### Diplom-Hauptprüfung im Sommersemester 2008

## Grundlagen der elektrischen Energietechnik

1. Teil: Hochspannungstechnik und Energieübertragung

### Allgemeine Hinweise:

Zur Bearbeitung der Aufgaben stehen zwei Stunden (120 Minuten) zur Verfügung.

Es sind **alle** Unterlagen sowie ein Taschenrechner (auch programmierbare) zugelassen.

Bei der Lösung der Aufgaben sind die einzelnen Lösungswege klar zu dokumentieren. Eine Aufgabe kann **nicht** gewertet werden, wenn mehrere Lösungswege mit unterschiedlichen Ergebnissen angeboten werden.

Bitte halten Sie einen Ausweis mit Lichtbild und ihren Studentenausweis bereit.

Die Termine der mündlichen Nachprüfungen werden durch Aushang bekannt gegeben.

Bitte tragen Sie auf jedes Blatt oben rechts Ihren Vor- und Zunamen ein.

GdE

H08

1/13

[pf@tu-bs.de](mailto:pf@tu-bs.de)  
<http://pf-et.campus-bs.de>

2

Wir wünschen Ihnen einen klaren Kopf und viel Erfolg!

Braunschweig, 08.10.2008  
Ku-Wo

## Diplom-Hauptprüfung im Sommersemester 2008

### Grundlagen der elektrischen Energietechnik

1. Teil: Hochspannungstechnik und Energieübertragung

Name:	
-------	--

Vorname:	
----------	--

Matrikelnummer:							
-----------------	--	--	--	--	--	--	--

Ich bin damit einverstanden, dass **mein Prüfungsergebnis im Internet** unter meiner Matrikelnummer veröffentlicht wird.

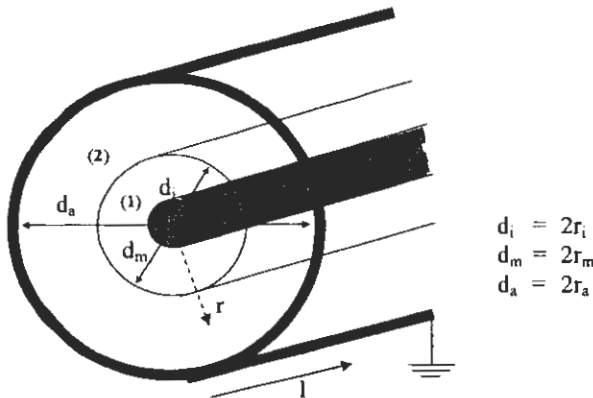
Unterschrift

	Punkte		
Aufgabe 1			
Aufgabe 2			
Aufgabe 3			
Summe			

**1. Aufgabe:**

Die in einem großen Windpark in der Nordsee erzeugte elektrische Energie wird in einer gasisolierten Schaltanlage (GIS) weiterverteilt. Zum Stromtransport werden über kurze Strecken hierbei unten abgebildete Rohrleitersysteme aus drei identischen coaxialen Zylinderanordnungen verwendet. Der spannungsführende Innenleiter wird von einer festen Isolierung (1) umgeben ( $\epsilon_{r1} = 2,4$ ). Zwischen der Feststoffisolierung (1) und dem geerdeten, zylindrischen Mantel befindet sich das Isoliergas  $\text{SF}_6$  (2) bei einem Druck von  $p = 3,3$  bar mit  $\epsilon_{r2} = 1$ . Der Durchmesser des Innenleiters beträgt 8 mm.

Im Betrieb liegt im zu betrachtenden Fall zwischen dem Innenleiter und dem geerdeten Mantel eine 50 Hz - Wechselspannung von  $\frac{145 \text{ kV}}{\sqrt{3}} \approx 83,72 \text{ kV}$ .

SF<sub>6</sub>-Rohrleitersystem

$$\begin{aligned} d_i &= 2r_i \\ d_m &= 2r_m \\ d_a &= 2r_a \end{aligned}$$

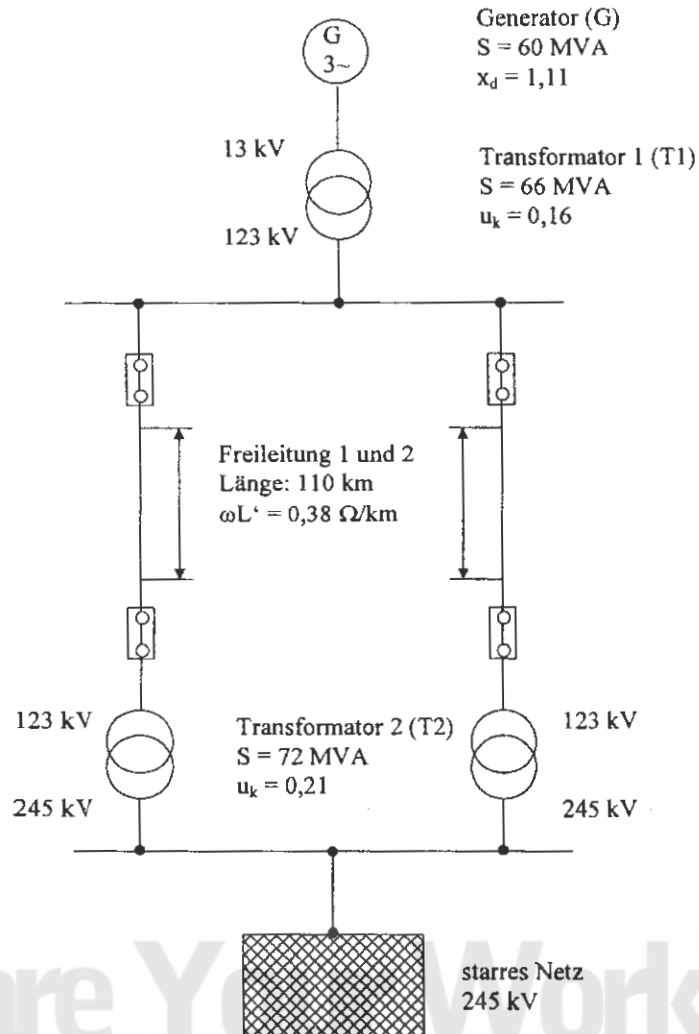
- Bestimmen Sie mit Hilfe des *optimalen Radienverhältnisses* die Größe von  $d_m$ .
- An der Feststoffisolierung und am  $\text{SF}_6$  sollen jeweils 50% der Gesamtspannung anliegen. Bestimmen Sie hiermit die fehlende Größe von  $d_i$ . Zeichnen Sie zur Hilfe das einphasige Ersatzschaltbild.
- Zeichnen Sie den Feldstärkeverlauf  $E_{eff} = f(r)$  für  $r_i \leq r \leq r_a$ . Berechnen Sie die Feldstärken an den Orten  $r = r_i$ ,  $r = r_m$  und  $r = r_a$  bei Betriebsbeanspruchung.
- Aufgrund eines Haarrisses im Außenleiter entweicht stetig  $\text{SF}_6$  und der Gesamtdruck nimmt ab. Bis zu welchem Druck hält die Isolierung der Spannungsbeanspruchung noch stand, wenn die Temperatur konstant bleibt?  
Hinweis: Benutzen Sie Blatt 8.
- Würde man die gesamte Isolierung nur mit der Feststoffisolierung auslegen, wie müsste man die Abmessungen verändern, um bei gleich bleibendem Innenleiter keine höhere max. Feldstärke am Innenleiter zu erhalten als die in c) berechnete?



2. Aufgabe:

In einem kleinen Steinkohlekraftwerk speist ein Drehstrom-Synchrongenerator (G) über einen Transformator (T1) in eine 110 km lange 123 kV - Drehstrom-Doppelleitung über jeweils einen weiteren Transformator (T2) in ein starres 245 kV -Drehstrom-Netz.

Alle Längs- und Querverluste werden vernachlässigt.



a.) Zeichnen Sie das vollständige einphasige Ersatzschaltbild und berechnen Sie die Reaktanzen bezogen auf 123 kV. Fassen Sie dann das vollständige Ersatzschaltbild soweit wie möglich zusammen!

b.) Welche Wirkleistung kann mit  $\cos \varphi = \frac{\sqrt{3}}{2}$  (induktiv) höchstens in das starre 245 kV - Netz eingespeist werden, wenn aus Stabilitätsgründen 61% der Kippleistung nicht überschritten werden soll?

Die zur Beantwortung der Frage erforderlichen Größen sollen graphisch aus einem Zeigerdiagramm ermittelt werden!

→ Hinweis: 10kV  $\triangleq$  10mm !!!

c.) Eine der beiden Leitungen wird infolge eines Kurzschlusses abgeschaltet. Der Erregerstrom des Generators ändern sich dabei nicht. Der Generator arbeitet mit der maximalen Leistung aus Aufgabenteil b.).

Welcher Übertragungswinkel  $\vartheta$  stellt sich jetzt ein?

Ist die Übertragung immer noch stabil?

Was würde passieren, wenn die Übertragung nicht mehr stabil wäre?

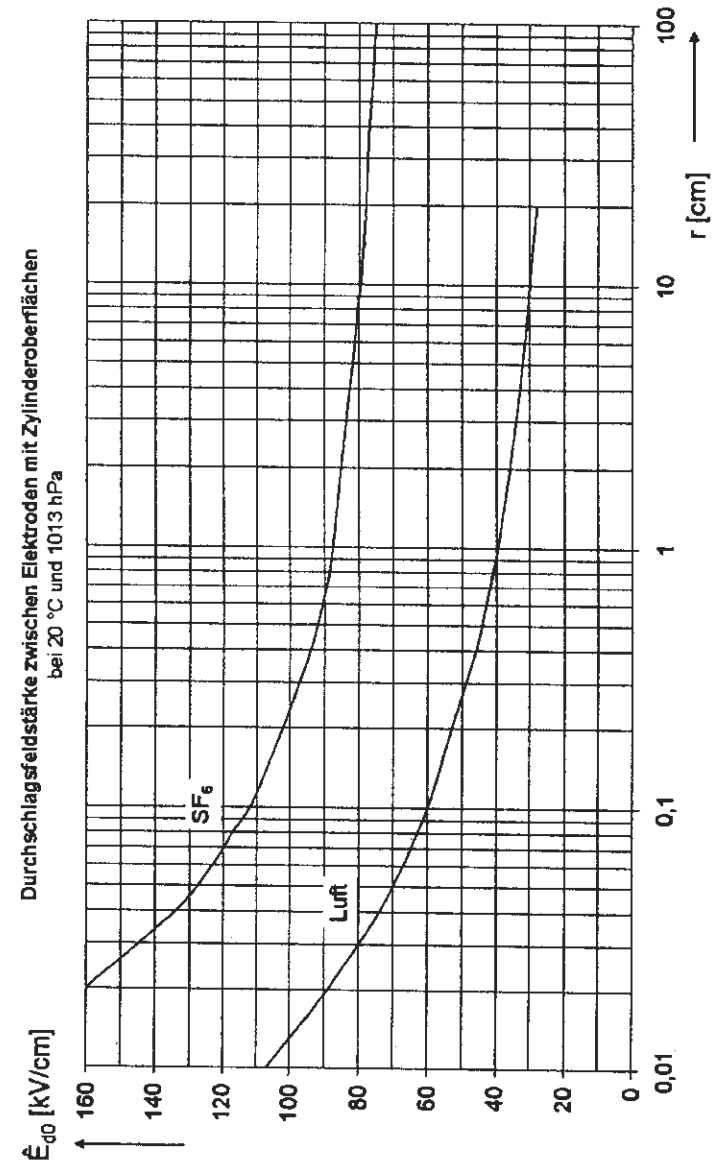
Welcher Phasenwinkel  $\varphi$  stellt sich jetzt ein?

### 3. Aufgabe:

Das zuvor genannte Steinkohlekraftwerk mit einer elektrischen Scheinleistung von 60 MVA arbeitet mit einem Kessel, der Frischdampf von 75 bar und 500°C erzeugt. Dieser wird in einer Hochdruckturbine bis auf 300°C abgearbeitet, danach durch Zuführen einer spezifischen Wärme von 300 kJ/kg zwischenüberhitzt und anschließend in einer Niederdruckturbine bis 2 bar entspannt. Turbinen und Kesselspeisewasserpumpe werden als ideal angenommen (isentrope Zustandsänderungen). Das Kraftwerk arbeitet auf einer Turbinenwelle mit  $P_{\text{mech}} = 47,5 \text{ MW}$ .

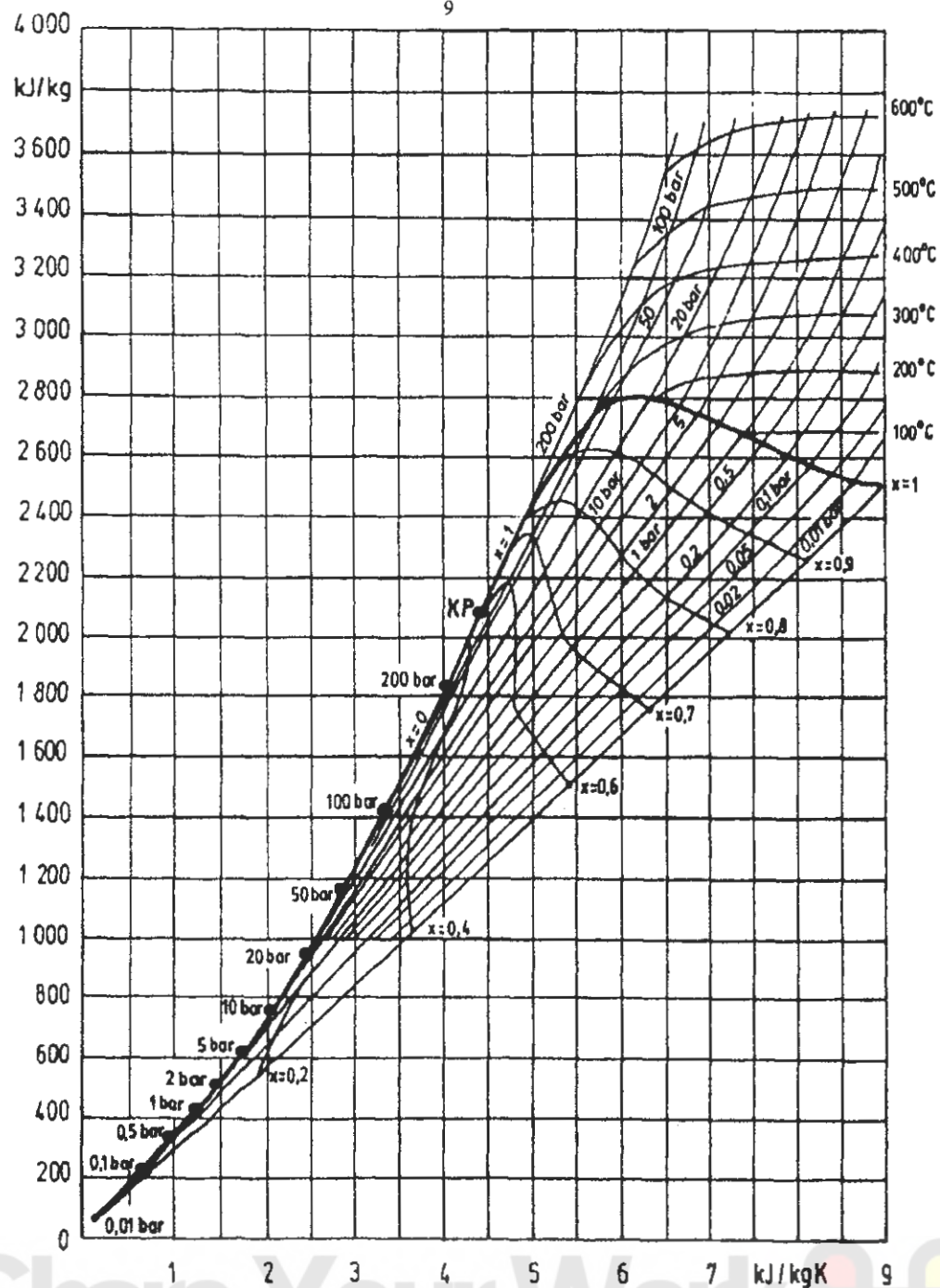


- Skizzieren Sie den Kreisprozess im beiliegenden h-s Diagramm!
- Wie groß sind die Leistungen von Hoch- und Niederdruckturbine?
- Wie groß ist der thermodynamische Wirkungsgrad des Kreisprozesses?
- Dem Kondensator fließen pro Tag 76.032.000 Liter Kühlwasser zu, welches eine konstante Temperatur von 8°C beim Eintritt in den Kondensator hat. Wie groß ist die Temperatur des Wassers beim Austritt aus dem Kondensator?  
Spez. Wärmekapazität Wasser:  $c_p \approx 4,2 \text{ kJ/kgK}$ .
- Wie viel Liter Wasser muss im Kessel pro Minute verdampft werden?





5/13



h,s Diagramm von Wasserdampf

s →

# 1. Aufgabe:

$$a) \quad r_{opt} = \frac{r_m}{e} = 0,368 \cdot r_m$$

$$\Rightarrow e \cdot 8 \text{ mm} = d_m = 27,75 \text{ mm} \quad (r_m = 10,88 \text{ mm})$$

$$b) \quad U_1 = U_2 = 0,5 \cdot 83,72 \text{ kV} = 41,86 \text{ kV}$$

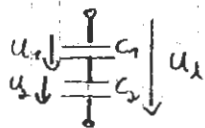
$$C_{21} = \frac{2\pi\epsilon\epsilon_0}{\ln\frac{r_o}{r_i}}$$

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{C_2}{C_1}$$

$$\Rightarrow 1 = \frac{C_2}{C_1} = \frac{\ln\left(\frac{r_m}{r_i}\right)}{\ln\left(\frac{r_o}{r_m}\right)} = \frac{1}{2,4} \cdot \frac{\ln\left(\frac{10,88}{4}\right)}{\ln\left(\frac{r_o}{10,88}\right)}$$

$$\Rightarrow r_o = 10,88 \text{ mm} \cdot e^{0,477}$$

$$= 16,57 \text{ mm}$$



$$c) \quad E_1(r) = \frac{41,86 \text{ kV}}{r}$$

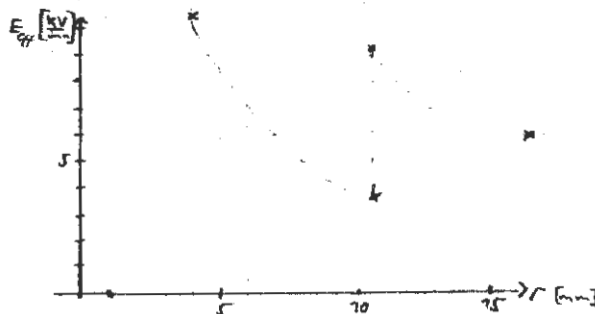
$$E_2(r) = \frac{41,86 \text{ kV}}{0,477 \cdot r}$$

$$E_1(r_i) = 10,46 \frac{\text{kV}}{\text{mm}}$$

$$E_2(r_m) = 9,23 \frac{\text{kV}}{\text{mm}}$$

$$E_1(r_m) = 3,85 \frac{\text{kV}}{\text{mm}}$$

$$E_2(r_o) = 6,08 \frac{\text{kV}}{\text{mm}}$$



6/13

$$d) \quad p_A = 3,3 \text{ bar}$$

$$\hat{E}_2(r_m) = \sqrt{2} \cdot 92,3 \frac{\text{kV}}{\text{cm}} = 130,53 \frac{\text{kV}}{\text{cm}}$$

$$\hat{E}_{d0}(r_m) \approx 87 \frac{\text{kV}}{\text{cm}} \quad (\text{aus Hilfsblatt})$$

$$\text{allg.: } \hat{E}_2(p, U) = \frac{p}{10^{13} h p_A} \cdot \frac{273^\circ\text{C} + 20^\circ\text{C}}{273^\circ\text{C} + U} \cdot \hat{E}_{d0}$$

$$\Rightarrow \frac{130,53}{87} = \frac{p}{1 \text{ bar}}$$

$$1,5 \text{ bar} = p$$

Bei 1,5 bar wären  $130,53 \frac{\text{kV}}{\text{cm}}$  ausreichend für einen Durchschlag!

$$e) \quad \hat{E}(r_i) = \sqrt{2} \cdot 104,6 \frac{\text{kV}}{\text{cm}} = 147,93 \frac{\text{kV}}{\text{cm}}$$

$$U_1 = 83,72 \text{ kV}$$

$$\hat{E}(4 \text{ mm}) = 147,93 \frac{\text{kV}}{\text{cm}} = \frac{E \cdot 83,72 \text{ kV}}{0,4 \cdot \ln\left(\frac{r_o}{4 \text{ mm}}\right)}$$

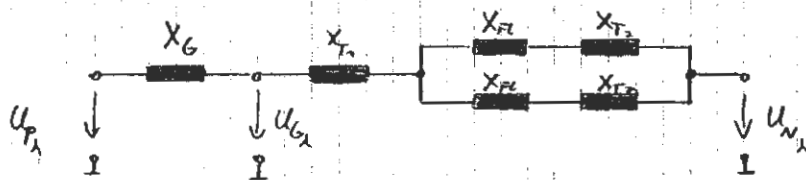
$$4 = \exp\left(\frac{\sqrt{2} \cdot 83,72 \text{ kV}}{0,4 \text{ cm} \cdot 147,93 \frac{\text{kV}}{\text{cm}}}\right) = r_o$$

$$r_o = 4 \cdot e^2 = 29,58 \text{ mm}$$



## 2. Aufgabe

a)



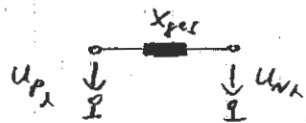
$$X_G = \frac{(123 \text{ kV})^2 \cdot 1,77}{60 \text{ MVA}} = 279,88 \Omega$$

$$X_{T1} = \frac{(123 \text{ kV})^2 \cdot 0,16}{66 \text{ MVA}} = 36,68 \Omega$$

$$X_{T2} = \frac{(123 \text{ kV})^2 \cdot 0,21}{72 \text{ MVA}} = 44,13 \Omega$$

$$X_{R1} = \omega L' \cdot l = 0,38 \frac{\Omega}{\text{km}} \cdot 110 \text{ km} = 41,8 \Omega$$

$$X_{\text{ges}} = X_G + X_{T1} + \frac{1}{2} X_{R1} + \frac{1}{2} X_{T2} = 359,53 \Omega$$



7/13

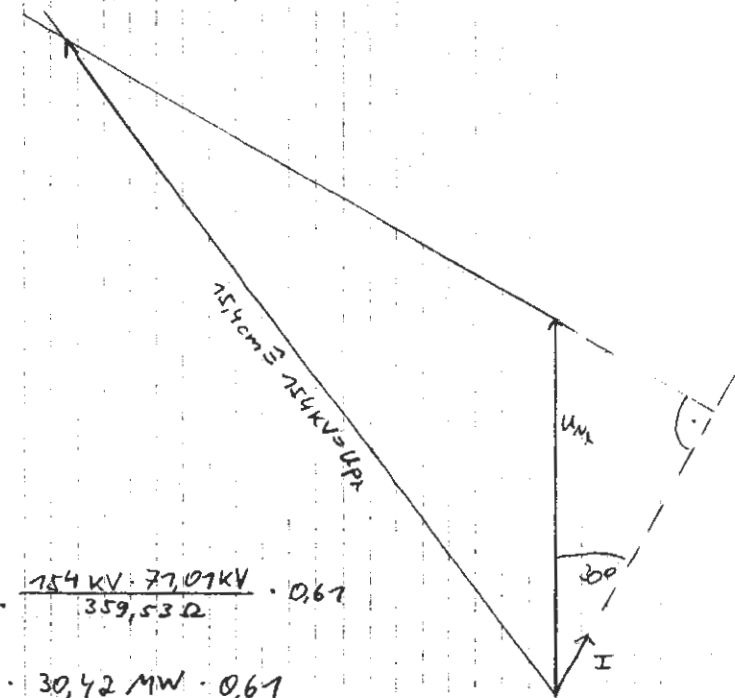
b)  $P_{WA} = \frac{U_{P1} \cdot U_{N1} \cdot \sin \varphi}{X_{\text{ges}}} = P_K \cdot \sin \varphi$

$$\Rightarrow \varphi = \arcsin(0,61) = 37,59^\circ$$

$$\varphi = \arccos \frac{\sqrt{3}}{2} = 30^\circ$$

Bestimmung von  $U_{P1}$  über Zeigerdiagramm:

$$U_{N1} = \frac{123 \text{ kV}}{\sqrt{3}} = 71,01 \text{ kV} \hat{=} 7,1 \text{ mm}$$



$$\begin{aligned} \Rightarrow P_{WA} &= 3 \cdot \frac{15,4 \text{ kV} \cdot 71,01 \text{ kV}}{359,53 \Omega} \cdot 0,61 \\ &= 3 \cdot 30,42 \text{ MW} \cdot 0,61 \\ &= 55,66 \text{ MW} \end{aligned}$$

c)  $X_{ges, neu} = X_G + X_{T1} + X_{FL} + X_{T2} = 402,49 \Omega$

$$P_{wA} = \frac{U_{pA} \cdot U_{wA}}{X_{ges, neu}} \cdot \sin \varphi_{neu}$$

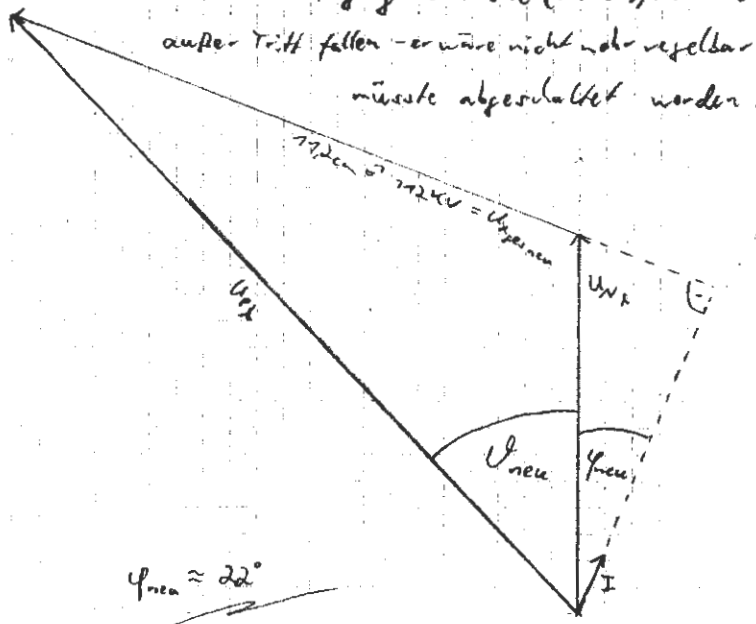
$P_{wA}$  und  $U_{pA}$  bleiben gleich (laut Aufgabenstellung).

$$\frac{55,66 \text{ MW}}{3} = \frac{154 \text{ kV} \cdot 77,01 \text{ kV}}{402,49 \Omega} \cdot \sin \varphi_{neu}$$

$$\Rightarrow 0,683 = \sin \varphi_{neu}$$

$$43,07^\circ = \varphi_{neu} < 90^\circ \rightarrow \text{stabil!}$$

Wäre d. Übertragung nicht stabil ( $\varphi > 90^\circ$ ), würde d. Generator außer Trüff fallen - er wäre nicht mehr regelbar - und müsste abgeschaltet werden.



$$\varphi_{neu} \approx 43^\circ$$

3. Aufgabe:

a) s. Hilfsblatt

$$b) \Delta h_H = h_2 - h_3 = 3400 \frac{\text{m}}{\text{kg}} - 3000 \frac{\text{m}}{\text{kg}} = 400 \frac{\text{m}}{\text{kg}}$$

$$\Delta h_N = h_4 - h_5 = 3370 \frac{\text{m}}{\text{kg}} - 2760 \frac{\text{m}}{\text{kg}} = 550 \frac{\text{m}}{\text{kg}}$$

$$P_T = \dot{m} \Delta h$$

$$\frac{P_{TH}}{P_{TN}} = \frac{\Delta h_H}{\Delta h_N} = \frac{400}{550} = 0,73$$

$$47,5 \text{ MW} = P_{TH} + P_{TN} = P_{TN} + 0,73 P_{TN}$$

$$\frac{47,5 \text{ MW}}{1,73} = 27,46 \text{ MW} = P_{TN}$$

$$47,5 \text{ MW} - 27,46 \text{ MW} = 20,04 \text{ MW} = P_{TH}$$

$$c) \eta = 1 - \frac{h_5 - h_3}{(h_2 - h_3) + (h_4 - h_3)} = 1 - \frac{2760 - 520}{3400 - 520 + 3370 - 3000}$$

$$= 1 - \frac{2240}{2580 + 370} = 1 - 0,7027$$

$$= 0,2978 = 29,78 \%$$



$$d) \quad \dot{m}_{\text{NW}} = P \frac{\left(\frac{1}{\eta} - 1\right)}{c_v(T_a - T_e)}$$

9/13

$$\Leftrightarrow \dot{m}_{\text{NW}} c_v T_a - \dot{m}_{\text{NW}} c_v T_e = P \left(\frac{1}{\eta} - 1\right)$$

$$T_a = \frac{1}{\dot{m}_{\text{NW}} c_v} (\dot{m}_{\text{NW}} c_v T_e + P \left(\frac{1}{\eta} - 1\right))$$

Zwischenrechnung

$$\dot{m}_{\text{NW}} = 76\,032\,000 \frac{\text{L}}{\text{d}} = 76\,032 \frac{\text{t}}{\text{d}} = \frac{76\,032 \text{ t}}{24 \cdot 60 \cdot 60 \text{ s}} = 880 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

$$T_a = \frac{1}{880 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot 4,2 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}} \left( 880 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot 4,2 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}} (273 + 8) \text{K} + 47,5 \text{ MW} \cdot 2,3 \right)$$

$$= \frac{1}{3696 \frac{\text{kJ}}{\text{sK}}} (7038,576 \text{ MW} + 112 \text{ MW})$$

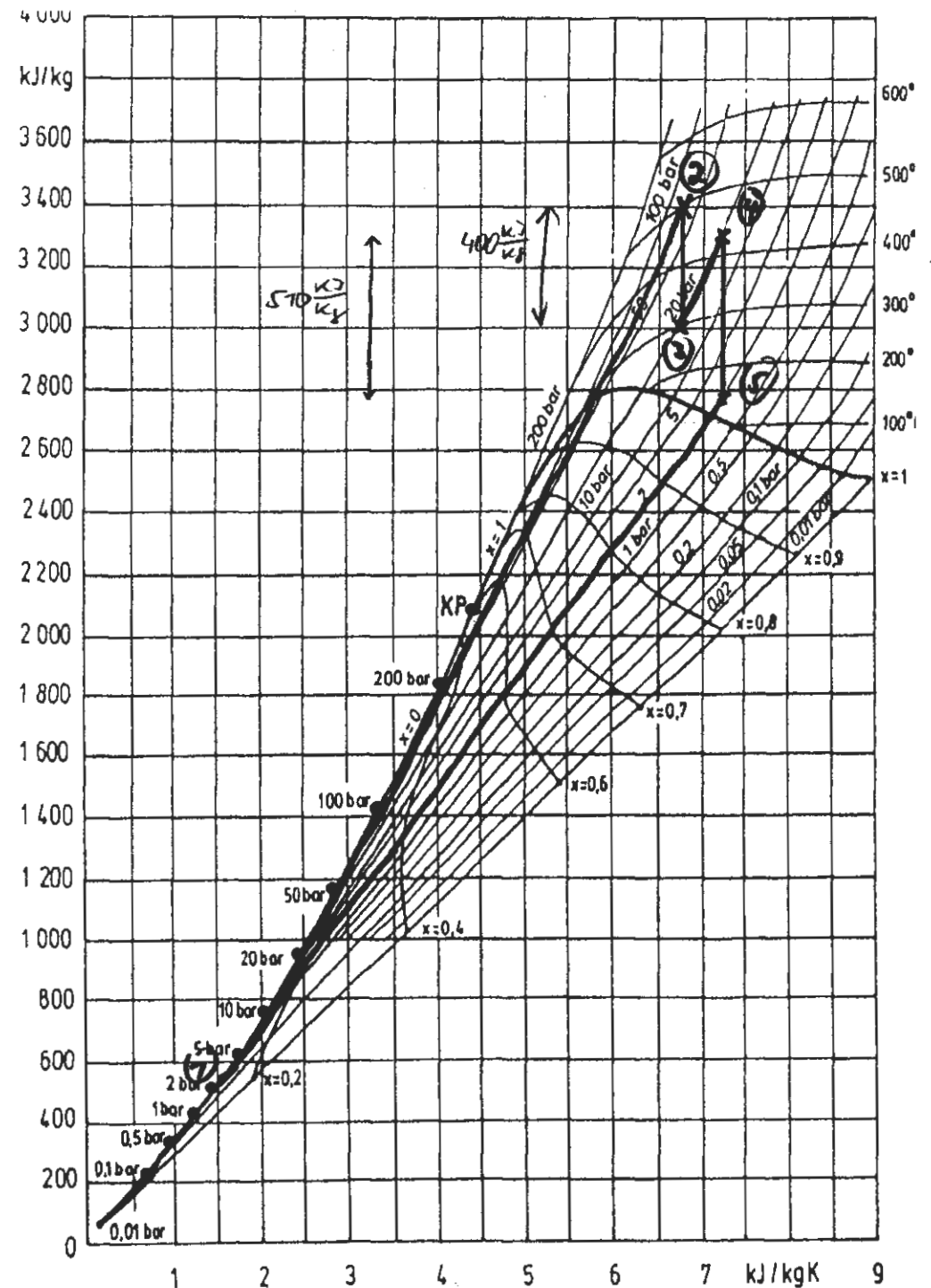
$$= \frac{7150,576 \cdot 10^3 \frac{\text{kJ}}{\text{s}}}{3696 \frac{\text{kJ}}{\text{sK}}} = 377,3 \text{ K} = 38,3^\circ\text{C} = T_a$$

$$e) \quad \dot{m} = \frac{P}{\Delta h} = \frac{47,5 \text{ MW}}{400 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} + 550 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}} = \frac{47,5 \cdot 10^3 \frac{\text{kJ}}{\text{s}}}{950 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}}$$

$$= 50 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

$$= 3000 \frac{\text{kg}}{\text{min}}$$

$$= 3000 \frac{\text{L}}{\text{min}}$$



h,s Diagramm von Wasserdampf



**IMAB**

TECHNISCHE UNIVERSITÄT BRAUNSCHWEIG  
INSTITUT FÜR ELEKTRISCHE MASCHINEN,  
ANTRIEBE UND BAHNEN

PROF. DR.-ING. W.-R. CANDERS

BRAUNSCHWEIG, DEN 08. OKTOBER 2008  
HANS-SOMMER-STRASSE 66  
38106 BRAUNSCHWEIG

POSTFACH 33 29  
38023 BRAUNSCHWEIG  
TELEFON NR. (0531) 391 3913  
FAX NR. (0531) 391 5767

GdE  
H08

10/13

**Einleitendes**

Die Prüfung besteht aus vier Aufgaben, die in mehrere Unterpunkte aufgeteilt sind. Lassen Sie in Ihren Ergebnissen einen deutlichen Lösungsweg erkennen. Eine Endformel und das Ergebnis allein reichen nicht aus.

Schreiben Sie bitte in Ihrem eigenen Interesse deutlich. Jedes Blatt sollte Ihren Namen und Ihre Matrikelnummer enthalten.

Die Klausurergebnisse und die Termine für eine eventuelle mündliche Nachprüfung werden per Aushang am schwarzen Brett des Instituts bekannt gegeben.

**Viel Erfolg!**

Name, Vorname: \_\_\_\_\_

Matrikelnummer: \_\_\_\_\_

Aufgabe	Punkte	Erstkorrektur	Zweitkorrektur
1			
2			
3			
4			
Summe			

Note	
------	--

[pfg@tu-bs.de](mailto:pfg@tu-bs.de)  
<http://pfg-et.campus-bs.de>

[pfg@tu-bs.de](mailto:pfg@tu-bs.de)  
<http://pfg-et.campus-bs.de>

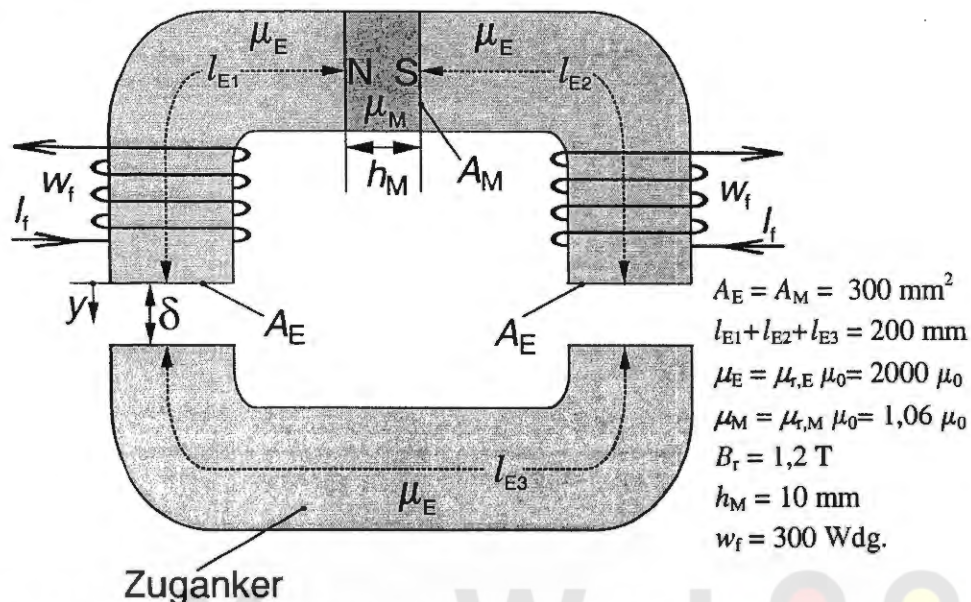


11/13

## 1 Magnetischer Kreis

- 1.1 Skizzieren Sie allgemein für Eisen und für Luft die Abhängigkeit der Flussdichte und der relativen Permeabilität von der magnetischen Feldstärke d. h.  $B = f(H)$  und  $\mu_r = f(H)$  in einem gemeinsamen Diagramm. [2 P]
- 1.2 Was ist bei Permanentmagneten unter dem Begriff *Kantenstrombelag* zu verstehen? [1 P]
- 1.3 Warum werden manche Magnetkreise mit Permanentmagneten in *Sammleranordnung* ausgeführt? [1 P]

Die nachfolgende Skizze zeigt ein elektromagnetisches System, bestehend aus einem Eisenkreis mit Permanentmagnet ( $\mu_M, B_r, h_M$ ) und zwei Spulen (mit jeweils  $I_f, w_f$ ) sowie einem vertikal beweglichen Zuganker. Die mittleren Feldlinienlängen in den Eisenteilen sind  $l_{E1}, l_{E2}$  und  $l_{E3}$ . Die Querschnittsflächen sind überall gleich groß ( $A_E = A_M$ ). Randeffekte, Streuung und Sättigung können vernachlässigt werden.



- 1.4 Zeichnen Sie für die skizzierte Anordnung das magnetische Ersatzschaltbild (ESB) und geben Sie die Größen der einzelnen Elemente des ESB formelmäßig an. [4 P]
- 1.5 Wie groß ist die Luftspaltflussdichte  $B_\delta$  bei einem Luftspalt  $\delta = 5 \text{ mm}$  und abgeschalteter elektrischer Erregung ( $I_f = 0 \text{ A}$ )? [3 P]
- 1.6 Geben Sie für eine gegebene Luftspaltflussdichte  $B_\delta$  formelmäßig die gespeicherte magnetische Energie des Gesamtsystems an. [2 P]
- 1.7 Berechnen Sie die Induktivität  $L$  der Anordnung für  $\delta = 5 \text{ mm}$ . [2 P]

## 2 Gleichstrommaschine

- 2.1 Durch welche Ursache kann bei einer Gleichstrommaschine Bürstenfeuer entstehen? [1 P]
- 2.2 Zeichnen Sie für den 1. Quadranten die Drehmoment-Drehzahl-Kennlinien einer Gleichstrom-Reihenschlussmaschine bei Betrieb mit folgenden Klemmenspannungen:  $U = U_N$ ;  $U = 0,5 U_N$ ;  $U = -U_N$  [3 P]
- 2.3 Warum darf ein Reihenschlussmotor nie im Leerlauf, d. h. ohne mechanische Belastung, betrieben werden? [1 P]

Eine Gleichstrom-Reihenschlussmaschine besitzt im Nennpunkt folgende Daten:

Klemmenspannung :  $U_N = 314 \text{ V}$

Drehzahl :  $n_N = 2700 \text{ min}^{-1}$

12/13

Drehmoment :  $M_N = 100 \text{ Nm}$

Wirkungsgrad :  $\eta_N = 0,9$

Sättigungserscheinungen im Eisenkreis, Reibungs- und Eisenverluste sowie Verluste durch die Wendepol- oder Kompensationswicklung werden nicht berücksichtigt.

2.4 Berechnen Sie den Nennstrom  $I_N$ , die Rotationsinduktivität  $M_d'$  und den Gesamtwiderstand  $R_a + R_f$ . Wie groß ist die Leerlaufdrehzahl  $n_0$ ? [4 P]

2.5 Welcher Vorwiderstand  $R_v$  ist erforderlich, damit die Maschine bei Speisung mit Nenn-Klemmenspannung  $U_N$  mit dem vierfachen Nennmoment anläuft? Welche Drehzahl erreicht sie mit dem Vorwiderstand bei Belastung mit dem Nennmoment? [2 P]

Von der Maschine sind folgende geometrische Daten bekannt:

Erregerwindungszahl pro Pol:  $w_{f,p} = 7 \text{ Wdg.}$

Ersatzluftspalt:  $\delta'' = 1 \text{ mm}$

Polzahl:  $2p = 4$

Polbreite:  $b_p = 80 \text{ mm}$

Rotordurchmesser:  $D_a = 150 \text{ mm}$

Eisenlänge:  $l_E = 200 \text{ mm}$

2.6 Berechnen Sie die Polteilung  $\tau_p$  und den Polbedeckungsfaktor  $\alpha$ . [2 P]

2.7 Wie groß sind im Nennpunkt der Maschine die mittlere Luftspaltflussdichte  $B_{f,mi}$  und der Drehschub  $\tau_w$  (= spezifische Kraft)? [2 P]

### 3 Asynchronmaschine (ASM)

3.1 Wodurch wird bei der Asynchronmaschine der Anlaufstrom begrenzt und warum sollten Asynchronmaschinen, die am Netz anlaufen, mit trägen Sicherungen abgesichert werden? [2 P]

3.2 Warum sollten Asynchronmaschinen stationär mit möglichst geringem Schlupf betrieben werden? [1 P]

3.3 Welchen Einfluss hat eine Stern-Dreieck-Umschaltung bei der Asynchronmaschine auf die maximale Luftspaltleistung  $P_{\delta,k}$ , auf das Kippmoment  $M_k$  und auf den Kippschlupf  $s_k$ ? [3 P]

Als Pumpenantrieb wird ein Käfigläufer-Asynchronmotor in Dreieckschaltung an einem 400V/50Hz-Drehstromnetz betrieben. Von dem Asynchronmotor sind folgende Daten bekannt:

Nennspannung:  $U_{s,N} = 400 \text{ V}$

Nennleistung:  $P_{\text{mech},N} = 45 \text{ kW}$

Nenn-Strangstrom:  $I_{s,N} = 48,84 \text{ A}$

Nennndrehzahl:  $n_N = 965 \text{ min}^{-1}$

Bei 50 % der Nennspannung wurde ein Anlaufmoment  $M_A^* = 166,7 \text{ Nm}$  gemessen. Der Statorwiderstand sowie Eisen-, Reibungs- und Zusatzverluste sind vernachlässigbar (vereinfachtes Ersatzschaltbild).

3.4 Bestimmen Sie die Polpaarzahl  $p$  und den Nennschlupf  $s_N$ . [2 P]

3.5 Wie groß ist das Nennmoment  $M_N$ ? [1 P]

3.6 Bestimmen Sie den Leistungsfaktor  $\cos \varphi_N$  und den Wirkungsgrad  $\eta_N$  bei Nennbetrieb. [2 P]

3.7 Wie groß ist das Anlaufmoment  $M_A$  bei Nennspannung? [1 P]

3.8 Wie groß sind das Kippmoment  $M_k$  und der Kippschlupf  $s_k$  der Maschine? [3 P]



#### 4 Vollpol-Synchronmaschine

- 4.1 Zeichnen Sie das Zeigerdiagramm einer Vollpol-Synchronmaschine für den übererregten Generatorbetrieb am starren Netz ( $R_s = 0$ ). Bezeichnen Sie die Spannungsabfälle und tragen Sie den Polradwinkel und den Phasenwinkel ein. [3 P]
- 4.2 Wie kann bei einer am starren Netz arbeitenden Synchronmaschine die Blindleistungsabgabe beeinflusst werden? [1 P]
- 4.3 Welche Funktion erfüllt ein Dämpferkäfig bei Synchronmaschinen? [1 P]

Eine zwölfpolige Vollpol-Synchronmaschine wird in Sternschaltung am 400V/50Hz-Drehstromnetz betrieben. Von der Maschine sind folgende Daten bekannt:

synchrone Reaktanz:  $X_d = 11 \Omega$

Polradspannung je Strang:  $U_{p,N} = 110 \text{ V}$  bei Nennerergerstrom  $I_{f,N}$

Verluste können vernachlässigt werden ( $R_s = 0$ ).

Die Maschine wird bei Nennerregung und mechanisch unbelastet als Phasenschieber betrieben:

- 4.4 Welchen Wert hat die Strangspannung  $U_s$  und wie groß ist der Strangstrom  $I_s$ ? [2 P]
- 4.5 Wird die Maschine über- oder untererregt betrieben? Begründen Sie Ihre Antwort? [1 P]
- 4.6 Um welchen Faktor muss der Erregerstrom verändert werden, damit der Strangstrom  $I_s = 0$  wird? [2 P]
- 4.7 Welcher Strangstrom  $I_k$  würde sich im Kurzschlussfall bei Nennerregung ergeben? [2 P]

Die Maschine wird nun mechanisch belastet:

- 4.8 Berechnen Sie für den Betrieb mit Nennerregung im Kippunkt das Drehmoment  $M_k$  und die aus dem Netz aufgenommene elektrische Wirkleistung  $P_k$ . [2 P]
- 4.9 Welcher Polradwinkel  $\vartheta$  stellt sich bei Nennerregung und einem Lastmoment  $M_L = 71 \text{ Nm}$  ein? [1 P]