

Schriftliche Prüfung

Elektrische Maschinen und Stromrichter

Prof. Dr.-Ing. Michael Braun

Prof. Dr.-Ing. Marc Hiller

Dennis Bräcke

Daniel Bernet

Felix Hoffmann

– Aufgaben zur Prüfung Nr. 138 am 15. April 2019 –

---

Vorname:

Nachname:

Matrikelnummer:

## Lösungsblatt

Diagramm für Aufgabe 1c)

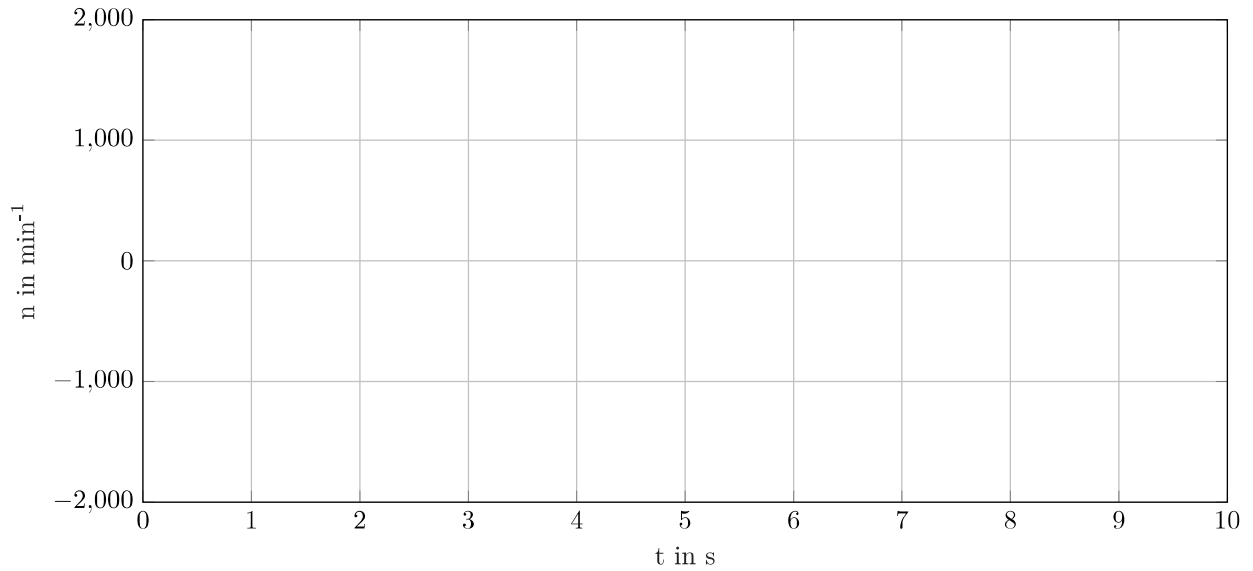
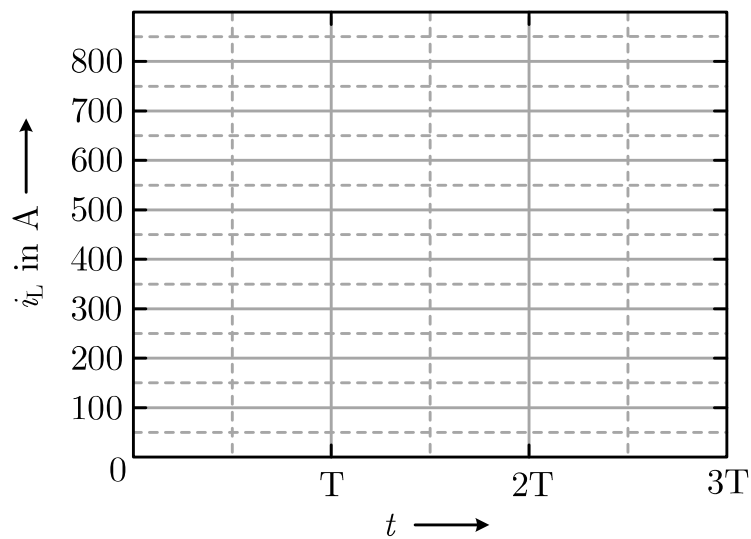
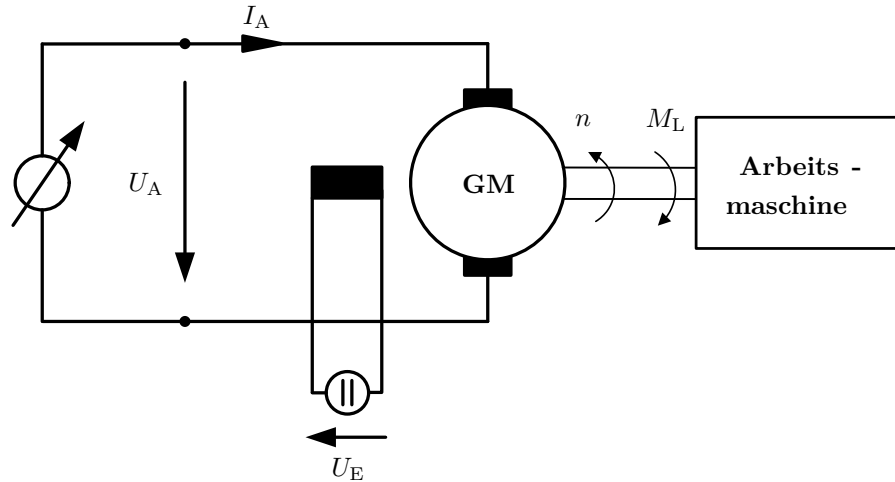


Diagramm für Aufgabe 3f)



# 1 Stromrichtergespeiste Gleichstrommaschine

Eine fremderregte Gleichstrommaschine wird von einer steuerbaren Gleichspannungsquelle gespeist.



Folgende Daten der Gleichstrommaschine sind gegeben:

|          |   |                        |                                                                   |
|----------|---|------------------------|-------------------------------------------------------------------|
| $U_{AN}$ | = | 500 V                  | Ankernennspannung                                                 |
| $I_{AN}$ | = | 40 A                   | Ankernennstrom                                                    |
| $n_N$    | = | 1500 min <sup>-1</sup> | Nenndrehzahl                                                      |
| $M_N$    | = | 120 N m                | Nenndrehmoment                                                    |
| $J$      | = | 1,5 kg m <sup>2</sup>  | Gesamtträgheitsmoment von Gleichstrommaschine und Arbeitsmaschine |
| $M_L$    | = | 50 N m                 | Lastmoment                                                        |

**Vereinfachende Annahmen:**

- Bis auf die Stromwärmeverluste im Ankerkreis treten keine weiteren Verluste auf.
- Die Wirkung der Induktivität im Ankerkreis und im Erregerkreis kann vernachlässigt werden.

## Aufgaben

Die Gleichstrommaschine wird mit Nennerregung betrieben.

- Die Gleichstrommaschine soll zusammen mit der angekuppelten Arbeitsmaschine mit konstantem Drehmoment vom Stillstand auf Nenndrehzahl beschleunigt werden. Berechnen Sie den Wert des erforderlichen inneren Drehmoments  $M_{iH}$  der Gleichstrommaschine, wenn der Hochlauf  $T_H = 3$  s dauern soll. Bestimmen Sie die Anzahl der für den Hochlauf erforderlichen Umdrehungen  $z_H$ .
- Berechnen Sie die für den Betrieb mit konstanter Nenndrehzahl  $n_N$  und Lastmoment  $M_L$  einzustellende Ankerspannung  $U_A$ .

Während des Betriebs nach b) wird die Erregerspannungsquelle  $U_E$  durch einen Bruch der Leitung abgetrennt.

- Geben Sie dazu den sich stationär einstellenden Ankerstrom  $I_A$  sowie den zeitlichen Verlauf der Drehzahl  $n$  beginnend bei  $t = 0$  s bis  $t = 10$  s an (Deckblatt).  
Erläutern Sie, ob in diesem Fall die mit  $M_L$  belastete Gleichstrommaschine durch einen zu hohen Ankerstrom oder eine zu hohe Drehzahl oder beides gefährdet ist. Geben Sie dazu eine kurze Begründung an.

## Lösungsvorschlag

a) Das erforderliche Drehmoment kann aus der Bewegungsgleichung ermittelt werden:

$$\frac{d\Omega}{dt} = \frac{1}{J} \cdot (M_i - M_L) \quad (1)$$

Da das Drehmoment während der Beschleunigung konstant gehalten werden soll, kann die Bewegungsgleichung als Differenzengleichung ausgewertet werden:

$$\frac{\Delta\Omega}{\Delta t} = \frac{1}{J} \cdot (M_i - M_L) \quad (2)$$

$$\Rightarrow M_{iH} = M_L + J \cdot \frac{2\pi \cdot n_N}{60 \cdot T_H} = 128,54 \text{ N m} \quad (3)$$

Während des Beschleunigungsvorgangs wird der Winkel  $\alpha$  überstrichen:

$$\alpha = \int_0^{T_H} \Omega(t) dt \quad (4)$$

Der Verlauf der Drehzahl lautet

$$\Omega(t) = \frac{\Omega_N}{T_H} \cdot t \quad (5)$$

Damit ergibt sich  $\alpha$  zu

$$\alpha = \int_0^{T_H} \frac{\Omega_N}{T_H} \cdot t dt = \frac{\Omega_N}{T_H} \cdot \frac{1}{2} \cdot t^2 \Big|_0^{T_H} = \frac{1}{2} \cdot \Omega_N \cdot T_H = 235,62 \text{ rad} \quad (6)$$

Die Anzahl der erforderlichen Umdrehungen ergibt sich dann zu

$$z_H = \frac{\alpha}{2\pi} = 37,5 \quad (7)$$

b) Die Ankerspannung beträgt

$$U_A = R_A \cdot I_A + c\phi_N \cdot \Omega, \quad (8)$$

wobei die Drehzahl der Nenndrehzahl entspricht. Der Ankerwiderstand, die Nennerregung und der Ankerstrom müssen noch ermittelt werden, um die Spannung zu berechnen.

Die Nennerregung lässt sich aus dem Nennmoment bestimmen zu

$$c\phi_N = \frac{M_N}{I_{AN}} = \frac{120 \text{ N m}}{40 \text{ A}} = 3 \text{ V s} \quad (9)$$

Der für das Lastmoment benötigte Ankerstrom beträgt damit

$$I_A = \frac{M_L}{c\phi_N} = \frac{50 \text{ N m}}{3 \text{ V s}} = 16,67 \text{ A} \quad (10)$$

Der Ankerwiderstand lässt sich aus dem Nennbetrieb berechnen:

$$R_A = \frac{U_{AN} - c\phi_N \cdot \Omega_N}{I_{AN}} = 719 \text{ m}\Omega \quad (11)$$

Die einzustellende Spannung beträgt damit

$$U_A = R_A \cdot I_A + c\phi_N \cdot \Omega_N = 483,22 \text{ V} \quad (12)$$

- c) Wird die Erregerwicklung abgetrennt, so wird die induzierte Spannung  $u_{\text{ind}} = 0 \text{ V}$ . Somit folgt für die Spannungsgleichung im stationären Fall der Gleichstrommaschine im Nennbetrieb

$$U_A = R_A \cdot I_A. \quad (13)$$

Der Ankerstrom ergibt sich zu

$$I_A = \frac{U_A}{R_A} = 672,1 \text{ A}. \quad (14)$$

Der Ankerstrom  $I_A$  überschreitet den Nennstrom  $I_{\text{AN}} = 40 \text{ A}$  um mehr als das 15-fache, wodurch die Maschine gefährdet wird. Da die induzierte Spannung  $u_{\text{ind}} = 0 \text{ V}$  ist, wird auch kein inneres Moment der Maschine erzeugt. Die Bewegungsgleichung vereinfacht sich dadurch zu

$$\dot{\omega} = \frac{-1}{J} \cdot M_L = -33,33 \text{ rad s}^{-1} \quad (15)$$

Skizziert man nun den Geschwindigkeitsverlauf über die Zeit, erhält man den in Abbildung 1 gezeigten Verlauf. Bei einem konstanten Lastmoment ist die Maschine auch durch eine zu hohe Drehzahl gefährdet, da sie zuerst abgebremst und dann immer weiter beschleunigt wird.

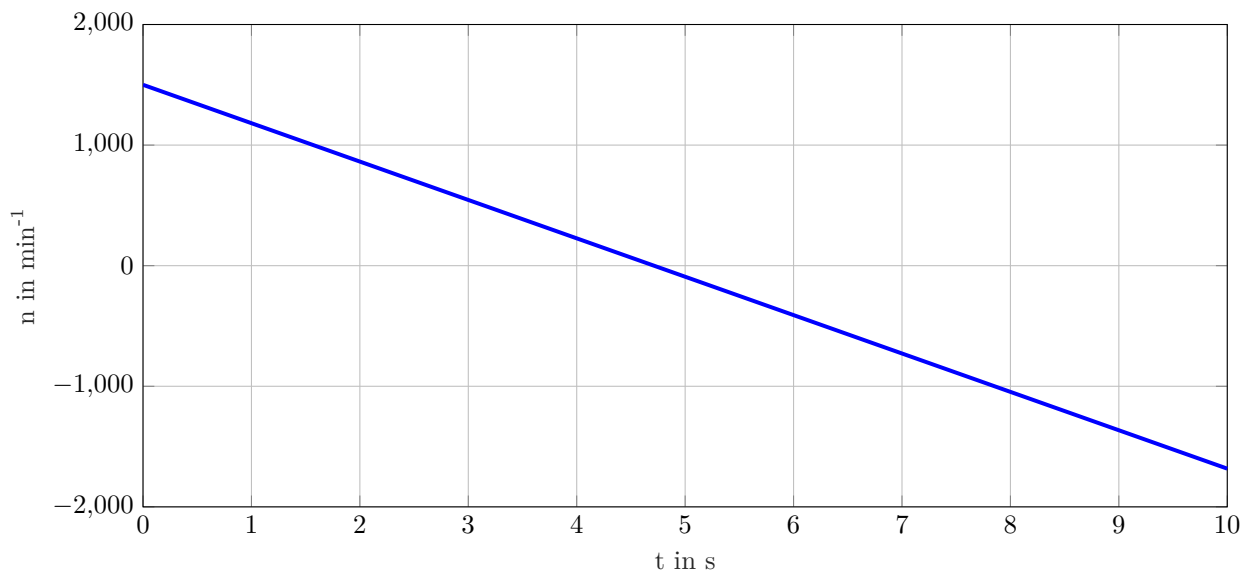
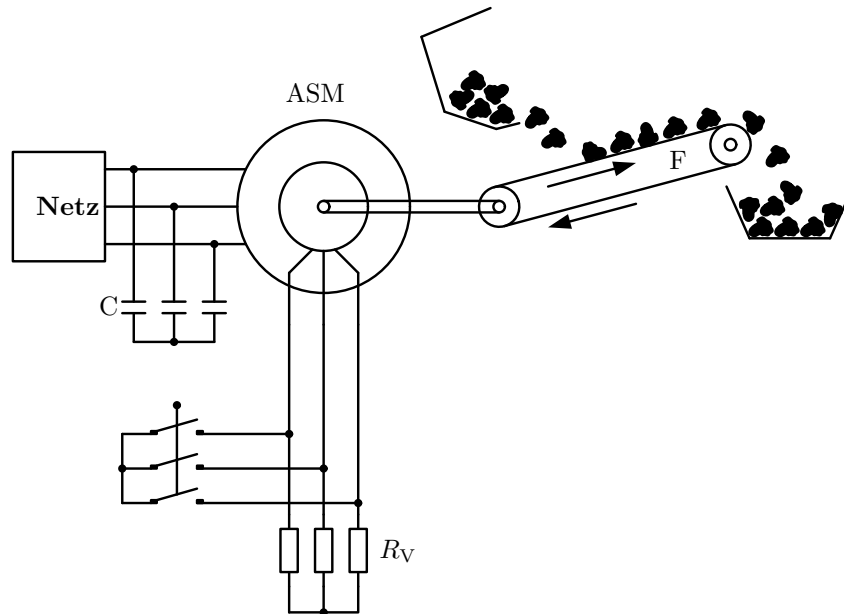


Abbildung 1: Drehzahlverlauf der Gleichstrommaschine

## 2 Asynchronmotor mit Schleifringläufer

Ein 8-poliger Asynchronmotor (ASM) mit Schleifringläufer treibt ein Förderband  $F$  an. Im Dauerbetrieb werden die Läuferwiderstände  $R_V$  mit dem Schalter  $S_1$  kurzgeschlossen.



Folgende Daten des Drehstromasynchronmotors sind gegeben:

|                  |   |       |                                                                     |
|------------------|---|-------|---------------------------------------------------------------------|
| $f_N$            | = | 50 Hz | Nennfrequenz des Netzes                                             |
| $s_N$            | = | 2 %   | Nennschlupf des Asynchronmotors                                     |
| $I_N$            | = | 600 A | Statorseitiger Nennstrom des Asynchronmotors (Effektivwert)         |
| $U_N$            | = | 400 V | Statorseitige Nennleiterspannung des Asynchronmotors (Effektivwert) |
| $R_S$            | = | 10 mΩ | Statorwiderstand je Phase                                           |
| $R_R$            | = | 5 mΩ  | Rotorwiderstand je Phase                                            |
| $\cos \varphi_N$ | = | 0,85  | Nennleistungsfaktor                                                 |
| $p$              | = | 4     | Polpaarzahl                                                         |

### Vereinfachende Annahmen:

- Eisen- und Reibungsverluste können vernachlässigt werden.

## Aufgaben

Der Schalter  $S_1$  sei geöffnet (Anfahrvorgang).

- Berechnen Sie den Wert des Läuferwiderstands  $R_V$  so, dass das innere Drehmoment beim Anfahren aus dem Stillstand für  $n = 0$  dem Nennmoment entspricht.
- Geben Sie die Frequenz der Ströme im Läuferwiderstand  $R_V$  bei  $n = 0$  an.
- Berechnen Sie den Wert der Verlustleistung  $P_{RR}$  im Rotor und den Wert der Verlustleistung  $P_{RV}$  in den Vorwiderständen bei Nennleistung und Stillstand.

Der Schalter  $S_1$  sei geschlossen (Dauerbetrieb).

- d) Bestimmen Sie die Nenndrehzahl in Umdrehungen pro Minute.
- e) Bestimmen Sie den Kapazitätswert  $C$  der Kondensatoren so, dass die vom Motor im Nennbetrieb aufgenommene Blindleistung aus dem Netz gerade kompensiert wird.

## Lösungsvorschlag

- a) Wert des Läuferwiderstands berechnen:

$$\frac{s^*}{s} = \frac{R_R + R_V}{R_R} \quad (16)$$

$$R_V = R_R \cdot \left( \frac{s^*}{s} - 1 \right) \quad (17)$$

$s = s_N$  ist der Nennschlupf, auf den sich das Nennmoment bezieht. Im Stillstand gilt  $s^* = 1$ . Damit lässt sich der Wert von  $R_V$  berechnen:

$$R_V = 245 \text{ m}\Omega \quad (18)$$

- b) Im Stillstand entspricht die Frequenz der Rotorströme der Frequenz der Statorströme. Die Frequenz der Rotorströme findet sich auch in den Vorwiderständen wieder.

$$f_R = f_S = f_N = 50 \text{ Hz} \quad (19)$$

- c) Drehfeldleistung bei Nennmoment und damit Nennstrom berechnen:

$$P_D = P_{el} - P_{VS} = \sqrt{3} \cdot U_N \cdot I_N \cdot \cos(\varphi_N) - 3 \cdot R_S \cdot I_N^2 = 342,54 \text{ kW} \quad (20)$$

Im Stillstand wird keine mechanische Leistung abgegeben. Damit entspricht die Summe der Verlustleistungen im Rotor und in den Rotorvorwiderständen der Drehfeldleistung.

$$P_{RR} + P_{RV} = P_D \quad (21)$$

Das Verhältnis zwischen  $P_{RR}$  und  $P_{RV}$  lässt sich aus dem Verhältnis der Widerstandswerte bestimmen:

$$\frac{P_{RR}}{P_{RV}} = \frac{R_R}{R_V} \quad (22)$$

Die Verluste ergeben sich aus (21) und (22):

$$P_{RV} = \frac{P_D}{\left( \frac{R_R}{R_V} + 1 \right)} = 335,69 \text{ kW} \quad (23)$$

$$P_{RR} = P_D - P_{RV} = 6,85 \text{ kW} \quad (24)$$

- d) Zuerst muss die synchrone Drehzahl berechnet werden. Anschließend kann die Nenndrehzahl bei Nennschlupf bestimmt werden:

$$n_{\text{syn}} = \frac{f_N}{p} = 750 \text{ min}^{-1} \quad (25)$$

$$s = \frac{n_{\text{syn}} - n}{n_{\text{syn}}} \quad (26)$$

$$n_N = n_{\text{syn}} \cdot (1 - s_N) = 735 \text{ min}^{-1} \quad (27)$$

- e) Aufgenommene induktive Blindleistung der Asynchronmaschine im Nennbetrieb:

$$Q = S \cdot \sin(\varphi) \quad (28)$$

$$Q = \sqrt{3} \cdot U_N \cdot I_N \cdot \sin(\varphi_N) \approx 218,98 \text{ kvar} \quad (29)$$

Aufgenommene kapazitive Blindleistung der Kondensatoren:

$$I_C = \omega \cdot C \cdot U_C \quad (30)$$

$$Q = 3 \cdot U_C \cdot I_C = 3 \cdot U_C^2 \cdot \omega \cdot C \quad (31)$$

$$U_C = U_{SN} = \frac{U_N}{\sqrt{3}} \quad (32)$$

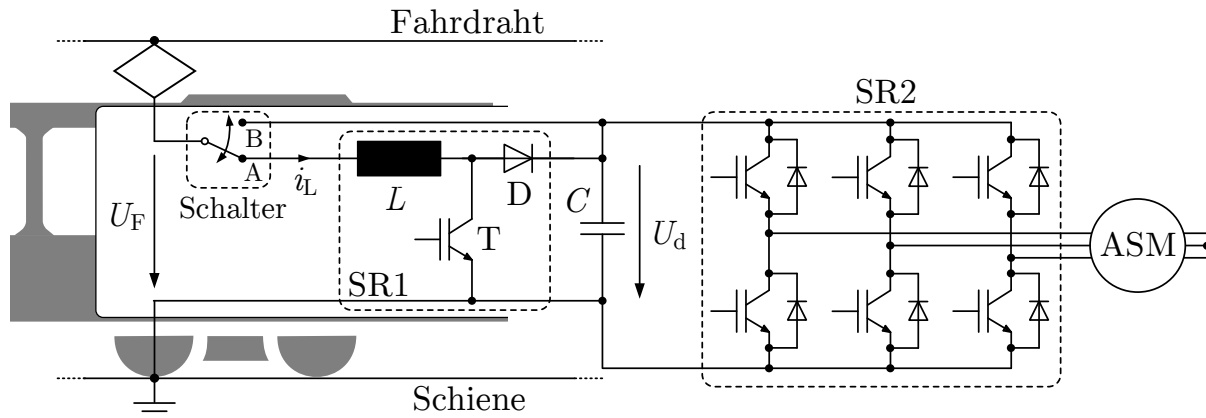
$$Q = U_N^2 \cdot \omega \cdot C \quad (33)$$

Benötigte Kapazität:

$$C = \frac{Q}{U_N^2 \cdot \omega} \approx 4357 \mu\text{F} \quad (34)$$

### 3 Antriebssystem für eine Mehrsystemlokomotive

Ein Lokomotivantrieb mit Drehstromasynchronmaschine als Fahrmotor soll wahlweise an 750 V Gleichspannung oder 1500 V Gleichspannung betrieben werden. Die Fahrdrachtspannung  $U_F$  wird mit einem Schalter entweder direkt oder über den Stromrichter SR1 zur Speisung einer selbstgeführten Drehstrombrückenschaltung SR2 benutzt.



#### Vereinfachende Annahmen

- die Leistungshalbleiter seien ideal
- die Gleichspannung  $U_d$  sei ideal glatt ( $C \rightarrow \infty$ )

#### Folgende Daten sind gegeben

|           |   |                   |                             |
|-----------|---|-------------------|-----------------------------|
| $U_F$     | = | 750 V oder 1500 V | Fahrdrachtspannung          |
| $U_d$     | = | 1500 V            | Zwischenkreisspannung       |
| $P_{elN}$ | = | 450 kW            | Nennleistung des Fahrmotors |
| $L$       | = | 1,25 mH           | Induktivität                |

#### Aufgaben

- Geben Sie die Schalterstellung für  $U_F = 750 \text{ V}$  und  $U_F = 1500 \text{ V}$  an.
- Wie heißt die Schaltung des Stromrichters SR1? Welche Funktion übernimmt SR1 im Antriebssystem der Mehrsystemlokomotive?
- Berechnen Sie die Einschaltdauer  $T_{\text{ein}}$  des Transistors  $T$  für  $U_F = 750 \text{ V}$ , Nennbelastung des Fahrmotors und eine Schaltfrequenz von  $f = 1 \text{ kHz}$ .
- Berechnen Sie den Mittelwert  $\bar{i}_L$  des Spulenstroms für den Betrieb nach c).
- Berechnen Sie die Stromwelligkeit  $\Delta i_L$  für den Betrieb nach c).
- Skizzieren Sie in das Diagramm auf der Rückseite Ihres Deckblatts maßstäblich den Zeitverlauf des Stromes  $i_L$  für den Betrieb nach c). Kennzeichnen Sie darin den Mittelwert  $\bar{i}_L$  und die Stromwelligkeit  $\Delta i_L$ .
- Berechnen Sie den maximalen Effektivwert der Grundschiwingung der Leiter-Leiter-Spannung an der Asynchronmaschine für Blocktaktung und Raumzeigermodulation.
- Geben Sie an, mit welchem Verfahren nach g) die maximale Höchstgeschwindigkeit erreicht werden kann. Begründen Sie Ihre Antwort.

## Lösungsvorschlag Aufgabe 3

3 a)

**A** ist für den Betrieb an 750 V und

**B** für den Betrieb an 1500 V.

3 b) Stromrichter SR1 ist ein Hochsetzsteller. Im Betrieb mit 750 V setzt er die Spannung mit einem Übersetzungsverhältnis von 2 hoch, um unabhängig von der Fahrdrachtspannung eine Zwischenkreisspannung von  $U_d = 1500$  V zu ermöglichen.

3 c) Aus dem erforderlichen Übersetzungsverhältnis

$$\ddot{u} = \frac{U_d}{U_F} = \frac{1}{1-a} = 2 \quad (35)$$

ergibt sich das Tastverhältnis zu

$$a = \frac{1}{2} \quad (36)$$

Daraus folgt die Einschaltzeit

$$T_{\text{ein}} = aT = \frac{a}{f} = 0,5 \text{ ms} \quad (37)$$

3 d) Der Mittelwert lässt sich über die aufgenommene Wirkleistung des Fahrmotors berechnen. Aus dem Leistungsgleichgewicht

$$P_F = P_{\text{elN}} = U_F \bar{i}_L \quad (38)$$

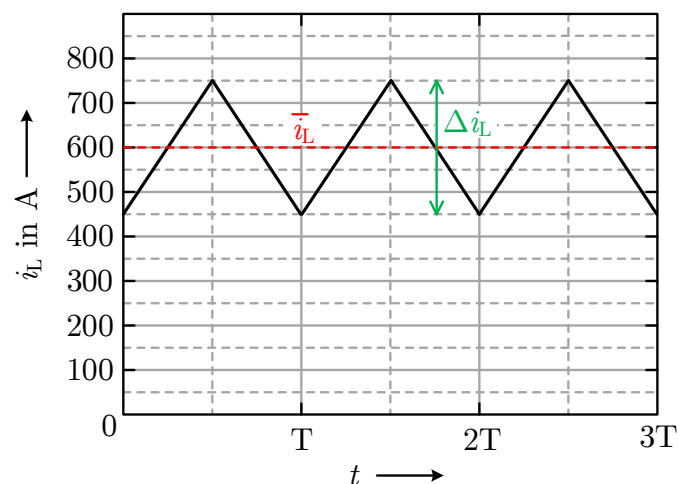
folgt

$$\bar{i}_L = \frac{P_{\text{elN}}}{U_F} = 600 \text{ A} \quad (39)$$

3 e) Mit der berechneten Einschaltzeit ergibt sich die Stromwelligkeit zu

$$\Delta i_L = \frac{U_F T_{\text{ein}}}{L} = 300 \text{ A} \quad (40)$$

3 f)



3 g)

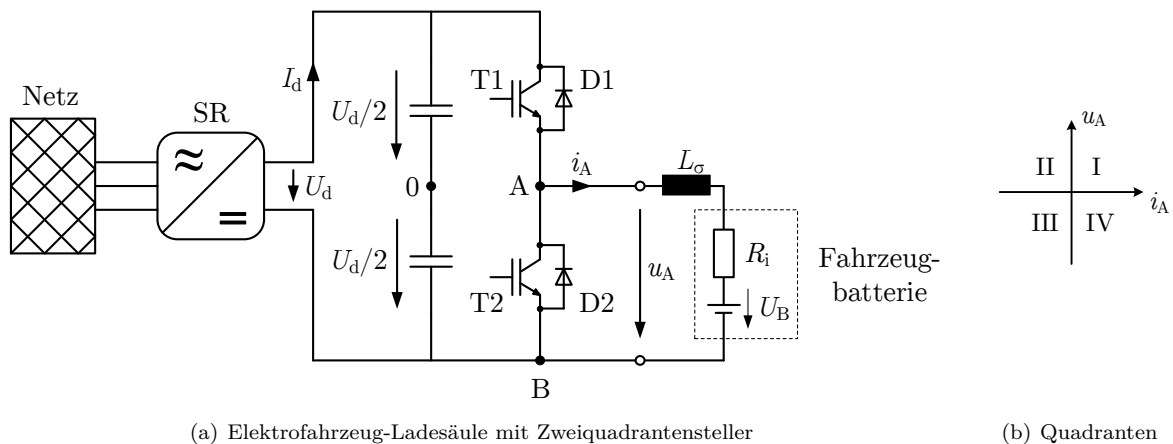
**Blocktaktung:**  $U_{1ab} = U_{1bc} = U_{1ca} = \frac{\sqrt{6}}{\pi} U_d = 1170 \text{ V}$

**Raumzeigermodulation:**  $U_{1ab} = U_{1bc} = U_{1ca} = \frac{1}{\sqrt{2}} U_d = 1061 \text{ V}$

3 h) Wegen  $U \sim f$  hängt die erreichbare Höchstgeschwindigkeit von der maximal erreichbaren Spannung ab. Gemäß g) wird die maximale Spannung mit Blocktaktung erreicht.

## 4 Elektrofahrzeug-Ladesäule mit Zweiquadrantensteller

Als Ladesäule für Elektrofahrzeuge kommt ein Zweiquadrantensteller zum Einsatz, der über den Ladeanschluss mit der Fahrzeugbatterie verbunden wird. Der Zweiquadrantensteller wird durch einen netzseitigen Stromrichter SR gespeist, der sowohl Energie aus dem Netz entnehmen als auch ins Netz zurückspeisen kann.



### Vereinfachende Annahmen

- Die Leistungshalbleiter sind ideale Schalter.
- Der Stromrichter SR ist ideal.
- Die Gleichspannung  $U_d$  ist konstant.
- Der Ausgangsstrom  $i_A$  ist ideal geglättet.

### Folgende Daten sind gegeben

|              |   |              |                                                  |
|--------------|---|--------------|--------------------------------------------------|
| $U_d$        | = | 400 V        | Eingangsgleichspannung                           |
| $U_B$        | = | 300 V        | Batteriespannung                                 |
| $R_i$        | = | 0,1 $\Omega$ | Innenwiderstand der Batterie                     |
| $i_{HL,max}$ | = | 100 A        | Maximal zulässiger Strom der Leistungshalbleiter |

### Aufgaben

Der Zweiquadrantensteller wird mit bipolarer Taktung mit zwei möglichen Schaltzuständen betrieben: In Schaltzustand 1 ist T1 ein- und T2 ausgeschaltet, in Schaltzustand 2 ist T1 aus- und T2 eingeschaltet.

- Nennen Sie alle möglichen Ausgangsspannungen  $u_A$  und geben Sie den jeweils zugehörigen Schaltzustand an.
- Geben Sie alle Quadranten gemäß Abbildung (b) an, in denen die Schaltung betrieben werden kann.
- Berechnen Sie den arithmetischen Mittelwert  $\bar{u}_A$  der Ausgangsspannung als Funktion der Eingangsgleichspannung  $U_d$  und des Tastverhältnisses  $d = \frac{T_{ein}}{T}$  des IGBTs T1.

Zur Netzstützung soll aus der Batterie eines geparkten Fahrzeugs eine Leistung von  $P_d = U_d I_d = -21 \text{ kW}$  ins Netz eingespeist werden.

- Berechnen Sie die erforderliche Ausgangsspannung  $\bar{u}_A$ .
- Geben Sie alle Halbleiter an, die bei diesem Betrieb Strom führen.

## Lösungsvorschlag Aufgabe 4

4 a)

$u_A = U_d$  für Schaltzustand 1 (T1 ein, T2 aus)

$u_A = 0$  für Schaltzustand 2 (T1 aus, T2 ein)

4 b) Die Schaltung kann in den Quadranten I und II betrieben werden.

4 c) In Schaltzustand 1 ist IGBT T1 eingeschaltet, sodass für die Einschaltzeit  $T_{\text{ein}}$  die Spannung  $u_A = U_d$  am Ausgang anliegt. Für Schaltzustand 2 ist IGBT T1 ausgeschaltet und es liegt die Spannung  $u_A = 0$  am Ausgang an. Daraus berechnet sich das Steuergesetz des Zweiquadrantenstellers zu

$$\bar{u}_A = \frac{1}{T} (T_{\text{ein}} \cdot U_d + T_{\text{aus}} \cdot 0) = \frac{T_{\text{ein}}}{T} U_d = d U_d \quad . \quad (41)$$

4 d) Der Zweiquadrantensteller arbeitet in Quadrant II mit einem negativen Ausgangsstrom  $i_A < 0$ . Um die Verluste im Innenwiderstand  $R_i$  der Batterie nicht zu vernachlässigen, muss am am Ausgang des Zweiquadrantenstellers

$$\bar{u}_A i_A = P_d \quad (42)$$

gelten. Da beide Größen zunächst unbekannt sind, wird der Strom durch

$$i_A = \frac{\bar{u}_A - U_B}{R_i} \quad (43)$$

ersetzt. Einsetzen in die Leistungsgleichung liefert die quadratische Gleichung

$$\bar{u}_A^2 - \bar{u}_A B_B - P_d R_i = 0 \quad . \quad (44)$$

Auflösen der Gleichung liefert die beiden möglichen Ergebnisse

$$\bar{u}_{A1,2} = \begin{cases} 292,8 \text{ V} \\ 7,2 \text{ V} \end{cases}$$

An dieser Stelle muss der maximal zulässige Strom der Leistungshalbleiter  $i_{\text{HL,max}}$  beachtet werden. Für den resultierenden Ausgangsstrom für beide mögliche Ausgangsspannungen ergibt sich

$$i_{A1,2} = \begin{cases} -71,7 \text{ A} < i_{\text{HL,max}} \\ -2928 \text{ A} >> i_{\text{HL,max}} \end{cases}$$

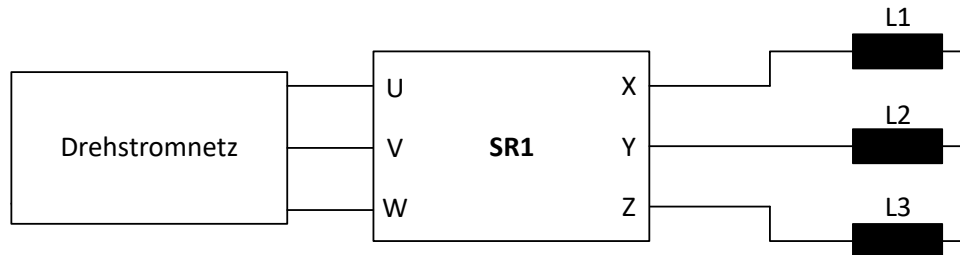
weshalb die Ausgangsspannung

$$\bar{u}_A = \bar{u}_{A1} = 292,8 \text{ V} \quad (45)$$

zu verwenden ist.

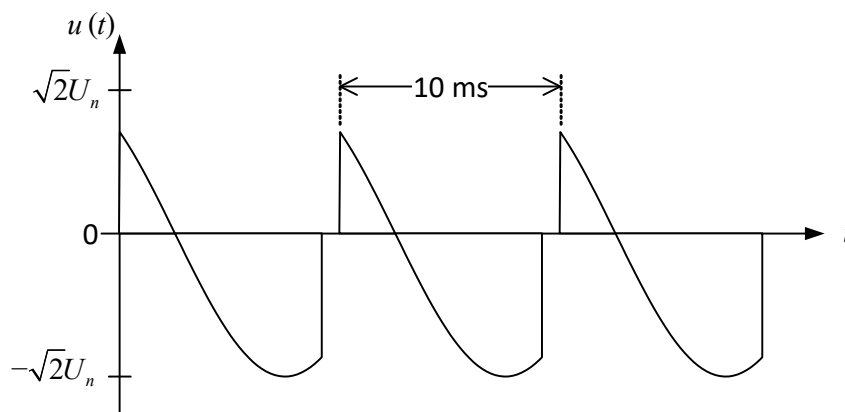
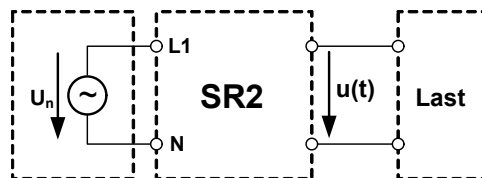
4 e) Für  $i_A < 0$  sind abwechselnd die Halbleiter D1 und T2 stromführend.

## 5 Stromrichterschaltungen für unterschiedliche Anforderungen



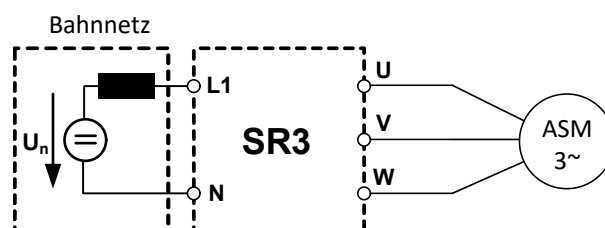
- a) Ein Stromrichter SR1 soll zur Belastung eines Drehstromnetzes mit induktivem Blindstrom benutzt werden. Im Leistungsteil des Stromrichters werden Thyristoren eingesetzt, mit denen der Blindstrom gesteuert werden kann. Zeichnen Sie das Prinzipschaltbild des Stromrichters SR1. Wie heißt diese Schaltung?

- b) Am Ausgang eines Stromrichters SR2 wird ein Spannungsverlauf  $u(t)$  wie folgt gemessen:



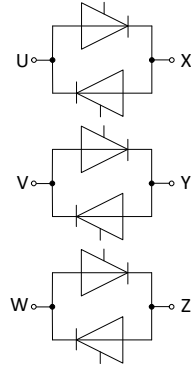
Zeichnen Sie das Prinzipschaltbild des Stromrichters SR2 einschließlich einer typischen Last und geben Sie die Bezeichnung der Schaltung an.

- c) Eine Drehstrom-Asynchronmaschine ASM soll als drehzahlveränderbarer Lokomotivantrieb aus dem 750 V Straßenbahnnetz gespeist werden. Skizzieren und benennen Sie das Prinzipschaltbild des Stromrichters SR3 zwischen den Anschlussklemmen L<sub>1</sub>, N und U, V, W. Die Leistung des Stromrichters beträgt ca. 500 kW.

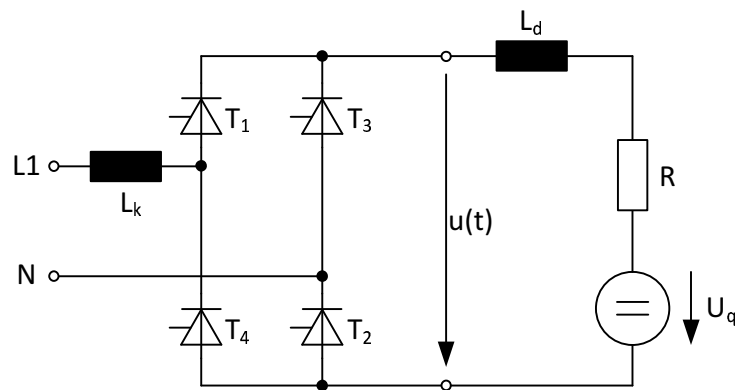


## Lösung

- a) SR1 ist ein Drehstromsteller.  
Prinzipschaltbild:



- b) SR2 ist eine netzgeführte Wechselstrombrückenschaltung.  
Prinzipschaltbild:



- c) SR3 ist eine selbstgeführte Drehstrombrückenschaltung.  
Prinzipschaltbild:

