

# Probeklausur

## Elektrische Antriebe 1

### SoSe 2013

- Die Klausur besteht aus 3 Aufgaben. Pro richtig beantworteter Teilaufgabe 1), 2) oder 3) sind unabhängig vom Schwierigkeitsgrad jeweils (-) Punkte erreichbar.
- Die einzelnen Fragen können weitgehend unabhängig voneinander beantwortet werden.
- Bei 44 von 44 erreichbaren Punkten wird die Note 1,0 gegeben; entsprechend bei 22 Punkten eine 4,0. **Halbe Punkte werden nicht gegeben.**
- zulässige Hilfsmittel: Zirkel, Lineal, Winkelmesser, nicht kommunikationsfähiger Taschenrechner, 1 Blatt doppelseitig handbeschriebene A4 Formelsammlung
- Dauer der Klausur: 2 h

Name (in Blockbuchstaben):

Matrikelnummer:

Studienrichtung:

Unterschrift:

---

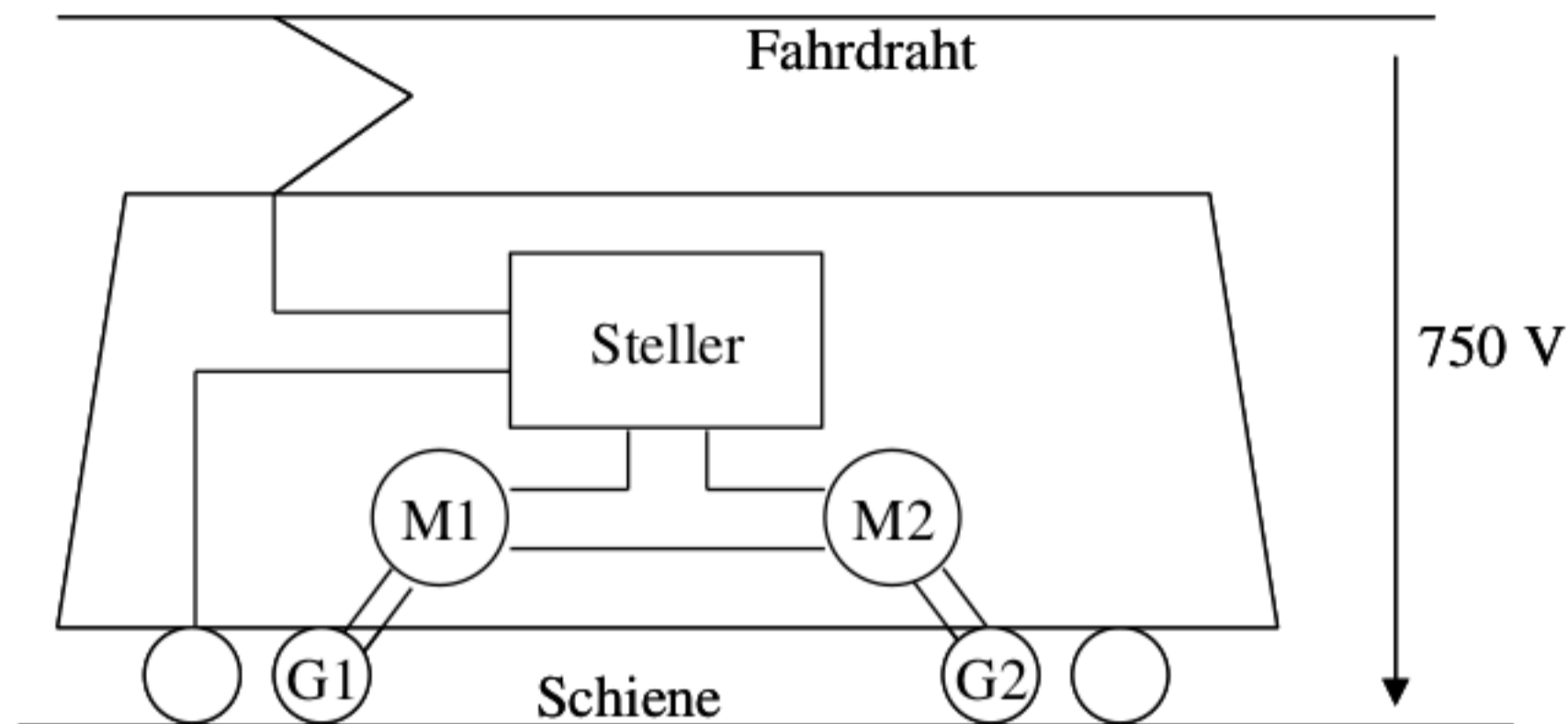
Bereich für die Korrektur

| Aufgabe | Punkte |  |
|---------|--------|--|
| 1       |        |  |
| 2       |        |  |
| 3       |        |  |
| 4       |        |  |
| 5       |        |  |
| Summe   |        |  |
| Note    |        |  |

Aufgabe 1:

- pro richtig beantworteter Frage sind 5 Punkte erreichbar

Ein Triebwagen einer Straßenbahn wird von zwei fremderregten Gleichstrom-Motoren angetrieben. Die Anker- und Feldkreise werden jeweils in Reihe geschaltet und über einen Zweiquadrantensteller (2QS) im Ankerkreis sowie einen Tiefsetzsteller (TSS) im Feldkreis an die Fahrspannung angeschlossen. Jeder Motor treibt über je ein verlustbehaftetes Getriebe je eine Achse an. Alle Getriebe haben die gleiche Übersetzung  $\ddot{u}$ .



Die Komponenten haben folgende Nenndaten:

Triebwagen:

Der mechanische Schlupf zwischen Treibrad und Schiene darf zu Null angenommen werden. Die Zugkraft wird vollständig vom Rad auf die Schiene übertragen.

Nenn-Raddurchmesser:  $d_{\text{RadN}} = 550 \text{ mm}$

Höchstgeschwindigkeit:  $v_{\text{max}} = 70 \text{ km h}^{-1}$

Nenn-Fahrdrahtspannung (konstant):  $U_{\text{ZK}} = 750 \text{ V}$

Getriebe:

Wirkungsgrad (im ges. Betriebsbereich konstant):  $\eta_{\text{G}} = \ddot{u} \cdot \frac{M_{\text{Achse}}}{M_{\text{Motor}}} = 98\%$

Übersetzung:  $\ddot{u} = \frac{n_{\text{Achse}}}{n_{\text{Motor}}} = \frac{1}{7,4}$

Motor:

Nennleistung:  $P_{\text{N}} = 90 \text{ kW}$

Nenndrehzahl:  $n_{\text{N}} = 1800 \text{ min}^{-1}$

Wirkungsgrad im Nennpunkt:  $\eta_{\text{N}} = 90\%$

Nenn-Ankerspannung:  $U_{\text{N}} = 375 \text{ V}$

Nenn-Erregerspannung:  $U_{\text{fN}} = 300 \text{ V}$

Nenn-Erregerstrom:  $I_{\text{fN}} = 5 \text{ A}$

Ankerinduktivität:  $L_{\text{a}} = 1 \text{ mH}$

Die Eisen- und Reibungsverluste sind vernachlässigbar.

Zweiquadrantensteller im Ankerkreis:

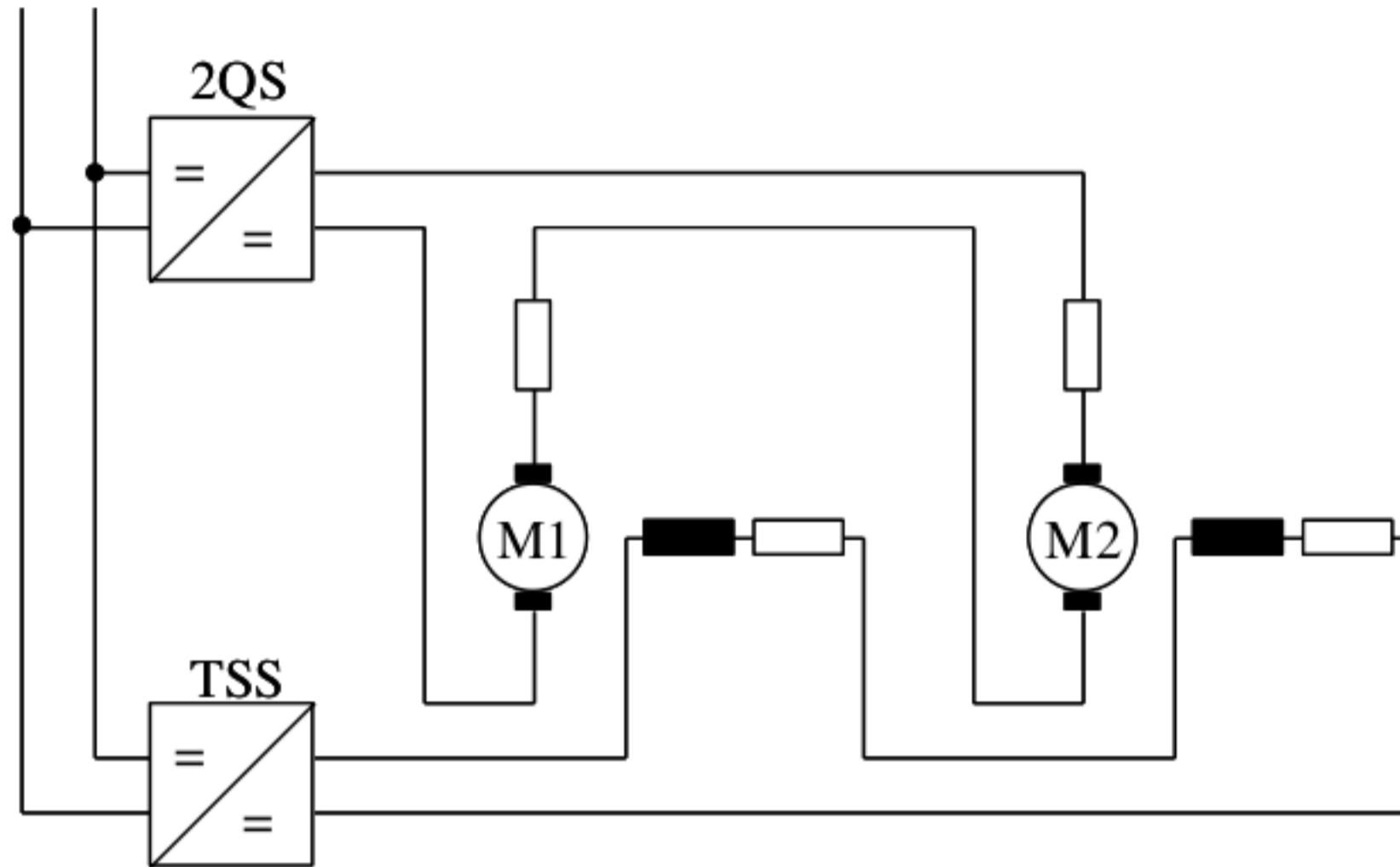
Der Steller darf als verlustfrei betrachtet werden.

zulässiger Strom

$$I_{SMax} = 400 \text{ A}$$

Schaltfrequenz

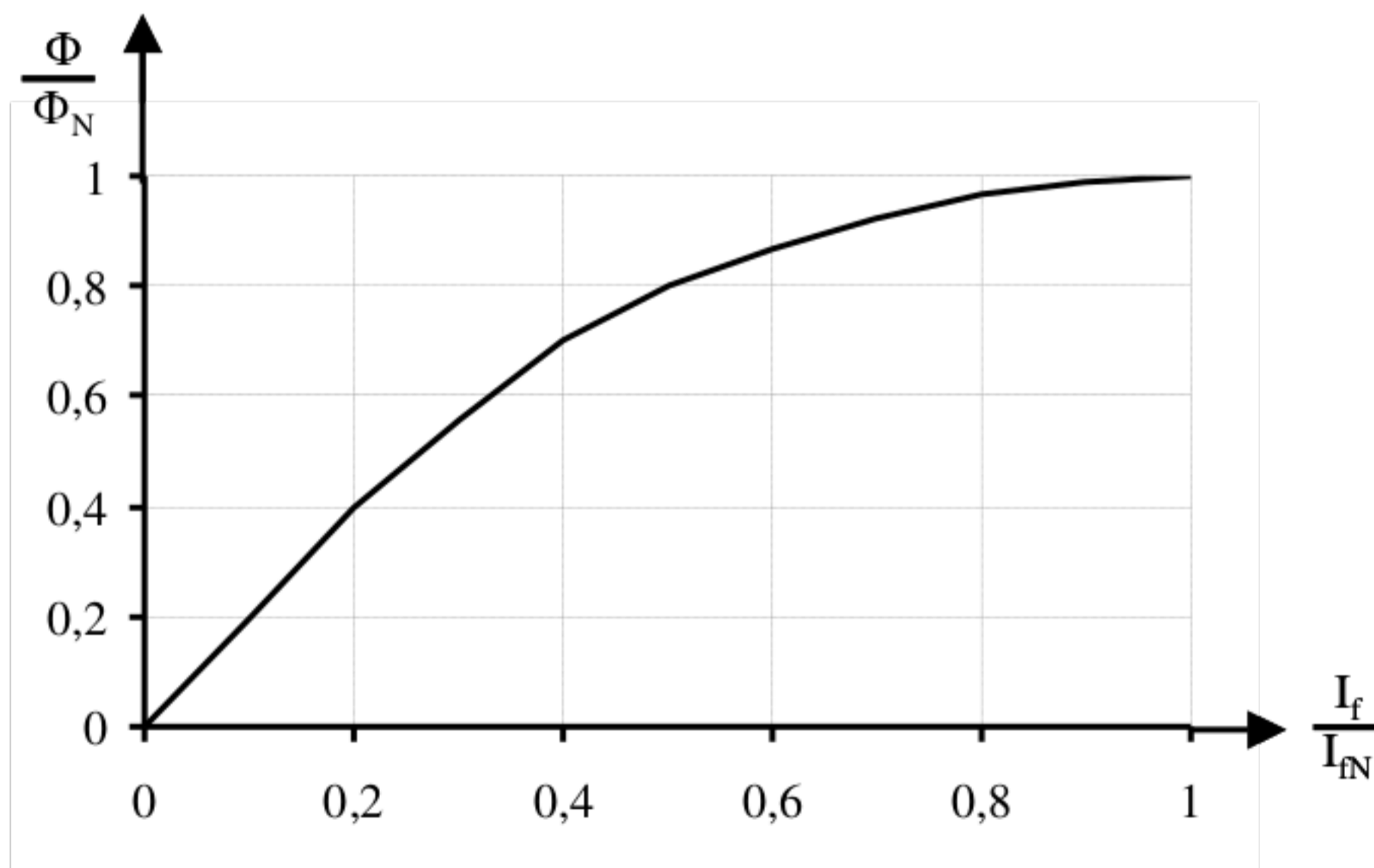
$$f_S = 1 \text{ kHz}$$



Fragen:

Zunächst wird nur ein Motor betrachtet.

1. Wie groß sind das Bemessungs-Drehmoment  $M_N$  und der Bemessungs-Ankerstrom  $I_{aN}$  eines Motors?
2. Wie groß sind die induzierte Spannung im Bemessungspunkt  $U_{iN}$  und der Ankerwiderstand  $R_a$  eines Motors?
3. Wie groß ist die Zugkraft des Fahrzeugs  $F_{ZN}$  bei Nennbetrieb beider Motoren?
4. Der Fluss der Maschine hängt entsprechend der Skizze vom Erregerstrom ab.



Welche Motordrehzahl  $n_{max}$  stellt sich bei der Höchstgeschwindigkeit von  $v_{max} = 70 \text{ km h}^{-1}$  ein? Welcher Erregerstrom  $I_{fmax}$  ist bei  $v_{Max}$  und Nennleistung einzustellen?

5. Welche Anfahrzugkraft  $F_0$  hat das Fahrzeug, wenn beide Motoren mit Nenn-Erregerfluss betrieben werden und der maximal zulässige Umrichterstrom ausgenutzt wird? Welcher Modulationsgrad  $a_0$  ist im eingeschwungenen Zustand am Zweiquadrantensteller einzustellen, wenn mit dieser maximalen Anfahrzugkraft bei der Drehzahl Null angefahren wird?
6. Berechnen Sie mittels harmonischer Analyse die Amplitude der Schaltfrequenten Spannungskomponente  $\hat{u}_{1\text{ kHz}}$  des Umrichters im eingeschwungenen Zustand für den unter 5. ermittelten Anfahrzustand! Wie groß wird dann der Betrag der Schaltfrequenten Drehmoment-Schwingung  $M_{1\text{ kHz}}$  an der Motorwelle?
7. Wie verändert sich die Gesamt-Zugkraft  $F_{ZV}$  bei Nennstrom, wenn die Räder einer Achse aufgrund des Verschleißes nur mehr einen Durchmesser von  $d_{\text{RadV}} = 520\text{ mm}$  aufweisen (die übrigen Durchmesser betragen nach wie vor  $d_{\text{RadN}} = 550\text{ mm}$ )? Welche Drehzahlen ergeben sich, wenn keiner der Motoren schneller als mit Nenndrehzahl betrieben wird? Welcher Modulationsgrad  $a_V$  muss in diesem Betriebszustand eingestellt werden?

### Regelung:

In den folgenden Aufgaben soll die Regelung von einer einzelnen Gleichstrommaschine M1 oder M2 betrachtet werden. Die Punktevergabe pro Aufgabe ist hier noch variabel.

8. Leiten Sie aus 2 Differenzialgleichungen für die Gleichstrommaschine das regelungstechnische Blockschaltbild her! Stellen Sie hierzu die Gleichungen in Integralform dar und zeichnen Sie dann das Blockschaltbild. Kennzeichnen Sie alle Signalpfade und beschriften Sie die Blöcke.
9. Als was für ein Element wirkt der 2QSteller regelungstechnisch gesehen? Wie kann hierfür eine regelungstechnische Vereinfachung gefunden werden? Stellen Sie diese mit den Parametern dar! Was ist Ein- und Ausgangsgröße?
10. Entwerfen Sie einen Stromregler! Die Messrückführung wird hier als ideal angenommen. Zeichnen Sie hierzu den Stromregelkreis auf und geben Sie für jeden Block die Übertragungsfunktion im Laplace-Bereich an! Nennen Sie allgemein zwei mögliche Reglerauslegungsverfahren und wenden Sie eines der beiden an! Das Überschwingen der Führungssprungantwort soll unter 10% liegen und die Anstiegszeit unter 6ms (Anstiegszeit=Zeit von 0 bis zum ersten Erreichen des Sollwerts). Weiterhin soll der Regler Störgrößen ausregeln können. Wie werden die Reglerparameter  $K_P$  und  $T_I$  gewählt? Geben Sie die Formel und die Werte an! Geben Sie die Übertragungsfunktion des offenen Stromregelkreises  $G_O(s)|_{U_i=0}$  an!
11. Wie kann aus dem Stromregler ein einfacher Drehmomentregler gemacht werden, ohne das Drehmoment direkt zu messen? Zeichnen Sie ein Blockschaltbild zur Erläuterung! Zeichnen Sie qualitativ die Führungssprungantwort des Drehmomentregelkreises über die Zeit!
12. Die Fahrdrahtspannung ist begrenzt. Was kann dies für Folgen bezüglich der Strom bzw. Drehmomentregelung haben und warum? Wie kann man die Regelung verbessern? Zeichnen sie ein entsprechendes Blockschaltbild! Zeichnen Sie qualitativ die Führungssprungantwort des Drehmomentregelkreises über die Zeit unter der Annahme, dass Sie die volle Fahrdrahtspannung bis zum Erreichen des Sollwerts an der Maschine anliegen haben (weitere Annahmen: Drehzahl=0U/min und  $R_1=0\Omega$ ) !

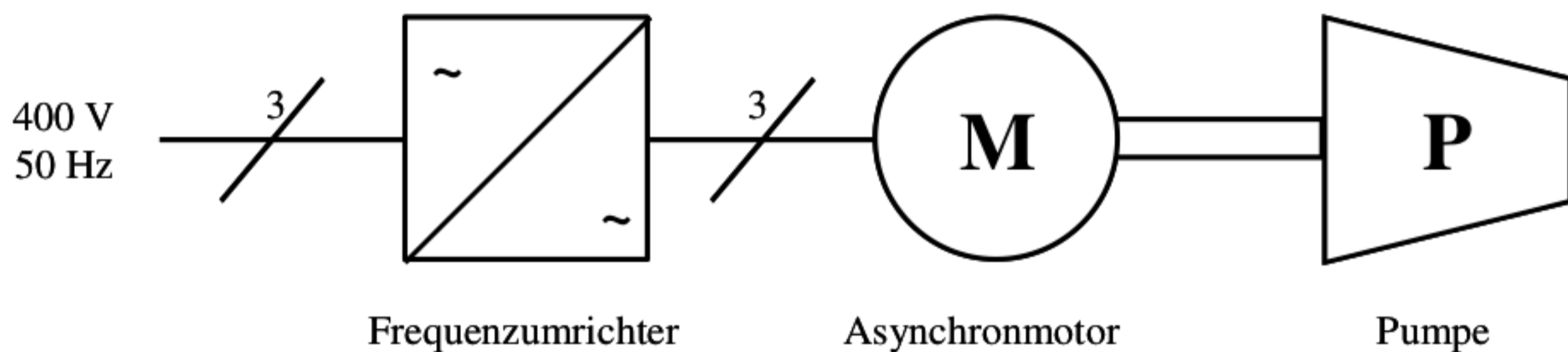
Aufgabe 2:

Eine Pumpe soll im Nennpunkt 5000 l Wasser pro Minute auf eine Höhe von 10 m fördern. Die Förderleistung wird bei einer Drehzahl von  $1200 \text{ min}^{-1}$  und bei einem Wirkungsgrad von 50 % erreicht. Die Fördermenge soll begrenzt zwischen 1000 l/min und 5000 l/min dauernd einstellbar sein. Die Dichte des Wassers beträgt  $\rho_w = 1 \text{ kg l}^{-1}$  und die Erdbeschleunigung  $9,81 \text{ ms}^{-2}$ .

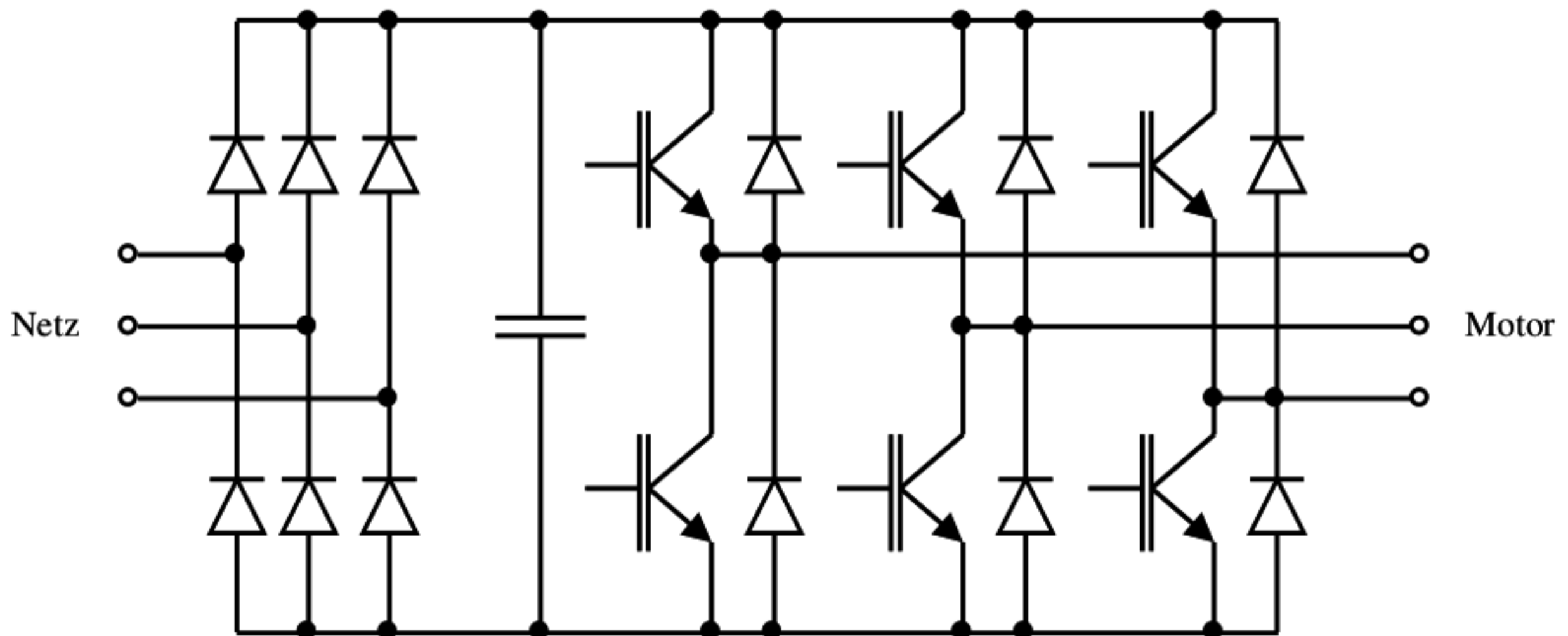
Für die Antriebsaufgabe steht ein Asynchronmotor mit den folgenden Typenschilddaten zur Verfügung:

|                 |                         |       |           |
|-----------------|-------------------------|-------|-----------|
| $P_N$           | 22 kW                   | $I_N$ | 40 A      |
| $n_N$           | $1470 \text{ min}^{-1}$ | $U_N$ | 230/400 V |
| $\cos\varphi_N$ | 0,86                    | $f_N$ | 50 Hz     |

Zusätzlich stehen im Datenblatt des Motorherstellers folgende Angaben:  $M_{\text{Kipp}}/M_N = 2,5$ . Für die Berechnungen dürfen der Statorwiderstand, die Eisen- und die Reibungsverluste vernachlässigt werden.



Der Motor soll an einem 400 V-Drehstromnetz über einen Frequenzumrichter mit einer vernachlässigbar hohen Pulsfrequenz von 3 kHz betrieben werden. Der Frequenzumrichter weist auf der Netzseite eine Diodenbrücke als Gleichrichter auf, auf der Motorseite werden IGBTs mit antiparallelen Dioden verwendet. Die Leistungsschalter dürfen als ideal betrachtet werden.



1. Berechnen Sie das Drehmoment  $M_{P,5000}$  der Pumpe, das zur Förderung von 5000 l/min benötigt wird! Welches Drehmoment ist zum Anlauf der Pumpe erforderlich (grobe Angabe)? Geben Sie den Verlauf der Drehzahl-Drehmoment-Kennlinie  $M_p = f(n_p)$  der Pumpe an! Geben Sie den Verlauf der Fördermengen-Drehzahl-Kennlinie  $\dot{V} = f(n_p)$  an!

...

2. Wie groß ist die Zwischenkreisspannung  $U_{dN}$ , wenn diese gleich dem Mittelwert der gleichgerichteten Spannung ist? Welche maximale Ausgangsspannung  $U_{1,max}$  lässt sich als verketteter Wert am Motor einstellen, wenn das Unterschwingungsverfahren (Sinus-Dreieck Modulation) ohne Aufschaltung von Harmonischen zur Modulation genutzt wird?
3. Der Motor soll mit Stator-Nennflussverkettung am Frequenzumrichter betrieben werden. Ist der Motor in Stern oder in Dreieck zu schalten? Welcher Umrichterstrom wird bei maximaler Pumpenleistung  $P_{P,5000}$  benötigt? (Hinweis: Bei graphischer Lösung konstruieren Sie zunächst das Dreieck aus Nullpunkt, Nennpunkt und dem Mittelpunkt der Ortskurve.)
4. Wie groß sind die Grundfrequenz und die Statorspannung bei Nennleistung der Pumpe?
5. Berechnen Sie Drehzahl und Drehmoment der Pumpe bei einer Fördermenge von 1000 l/min! Welche Spannung und Frequenz sind nun einzustellen, wenn die Maschine mit konstanter Statorflussverkettung betrieben werden soll?
6. Die Netzspannung bricht um 15 % ein. Kann der Antrieb noch das geforderte Drehmoment bei maximaler Pumpendrehzahl aufbringen?

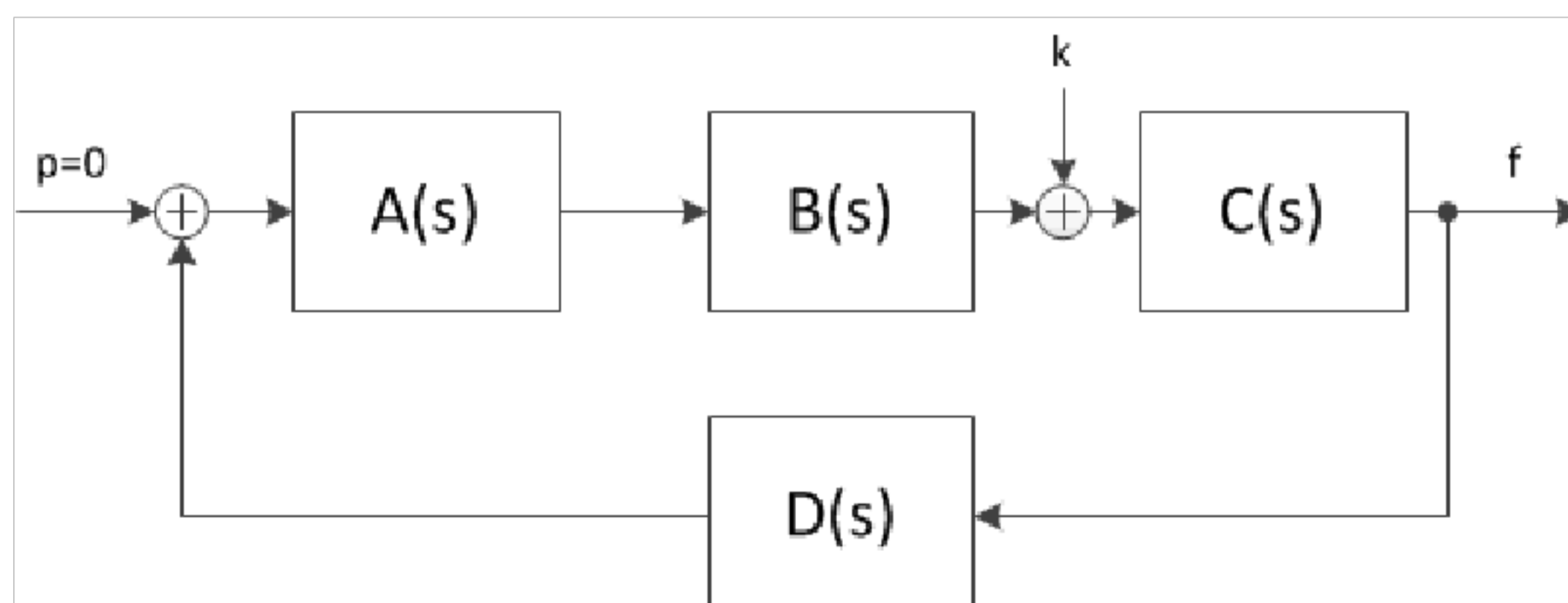
Aufgabe 3:

1. Welches Maschinenelement aus Stahl ( $\rho = 7,86 \text{ kg/l}$ ) hat das höchste Trägheitsmoment?
  - Rundstab mit 20 mm Durchmesser und 400 mm Länge
  - Rohr mit 25 mm Außendurchmesser, 3 mm Dicke und und 400 mm Länge
  - Rundstab mit 40 mm Außendurchmesser und 50 mm Länge
2. Geben Sie die Hangabtriebskraft eines reibungslos gelagerten Wagens mit 1 t Masse an, der 20 % Steigung hinauffahren soll!
3. Was ist eine Induktivität?
4. Wie groß würden Sie den Feldschwächbereich (Drehzahlverhältnis bei konstanter Leistung) bei einem Lüfter wählen?
5. Welche Zeitkonstante beim fremderregten Gleichstrommotor ist im allgemeinen größer?
  - Ankerzeitkonstante  $T_a$
  - Feldzeitkonstante  $T_f$
  - Beide ähnlich
6. Welche Aussage trifft für einen permanentenerregten Gleichstrommotor zu, der mit einem Spannungssprung beaufschlagt wird?
  - Der Strom schwingt immer über.
  - Der Strom schwingt nie über.
  - Das Stromüberschwingen hängt vom Verhältnis von Ankerzeitkonstante  $T_a$  und mechanischer Zeitkonstante  $T_m$  ab.
7. Wie verändert sich das Kippdrehmoment eines Asynchronmotors, wenn bei gleichbleibender Stator-Spannungsamplitude die Statorfrequenz verdoppelt wird?

8. Wie verändert sich die maximal vom Netz aufgenommene Leistung eines Asynchronmotors mit Käfigläufer, wenn der bisherige Motorschutzschalter durch einen Frequenzumrichter ersetzt wird (kein stationärer Betrieb)?
9. Welche Statorfrequenz muss bei einem Asynchronmotor mit Käfigläufer und  $n_N = 1460 \text{ min}^{-1}$  bei  $f_N = 50 \text{ Hz}$  eingestellt werden, damit dieser mit Bemessungsdrehmoment und Bemessungsflussverkettung anläuft?
10. Wie muss die Phasenlage des Statorstroms bezüglich der Polradspannung bei einer permanent erregten Synchronmaschine eingestellt werden, damit diese ein maximales Drehmoment pro Stromeinheit liefert?
11. In einem Tiefsetzsteller soll eine Ausgangsspannung  $U_{1,av} = U_d/3$  eingestellt werden. Geben Sie Aussteuergrad sowie Ein- und Ausschaltzeiten des Transistors bei einer Schaltfrequenz  $f_p = 2 \text{ kHz}$  an!
12. Welche Oberschwingungsfrequenzen erwarten Sie bei einer B6-Brückenschaltung am amerikanischen 60 Hz-Netz im Gleichstromkreis?
13. Welche Größen beeinflussen die Dimensionierung des Zwischenkreiskondensators in einem Frequenzumrichter?
  - Pulszahl des Netzgleichrichters
  - Aussteuergrad des Maschinenumrichters
  - Effektivwert der Netzharmonischen
14. Wie kann ein Tiefsetzsteller regelungstechnisch modelliert werden?
15. Eine Regelstrecke besteht aus zwei  $PT_1$  Gliedern stark unterschiedlicher Zeitkonstanten. Welche Nachstellzeit wählen Sie bei einem PI-Regler?



16. Sie haben einen Regler nach dem symmetrischen Optimum ausgelegt. Vorsichtshalber beginnen Sie mit der Einstellung einer Verstärkung, die etwa  $1/10$  des berechneten Werts beträgt. Ist dieses Vorgehen sinnvoll?
17. In einem Roboterantrieb werden die Motorzeitkonstante  $T_a = 3 \text{ ms}$  und die mechanische Zeitkonstante  $T_m = 5 \text{ ms}$  ermittelt. Empfehlen Sie eine Kaskadenstruktur für die Regelung?
18. Mit welcher Stellgröße beeinflussen Sie das Drehmoment einer Asynchronmaschine?
19. Welchen Vorteil kann bei Kleinstantrieben der Betrieb eines Längstransistors auf der Kennlinie anstelle einer PWM haben?
20. Geben Sie die für einen I-Regler die Ausgangsgröße  $y(t)$  in Abhängigkeit der Eingangsgröße  $x(t)$  im Zeitbereich an! Transformieren Sie diese in den Laplacebereich und geben Sie die Übertragungsfunktion an! Zeichnen Sie qualitativ den Amplituden- und Phasengang über die Kreisfrequenz sowie die Sprungantwort über die Zeit!
21. Geben Sie die Übertragungsfunktion  $F(s)/K(s)$  für folgendes Blockschaltbild an!



22. An einem Laborprüfstand wird ein Thyristorrichter in Gegenparallelschaltung als 4-Quadrantensteller für die Gleichstrommaschine GM1 verwendet. Der Thyristorrichter ist am Drehstromnetz angeschlossen. An der anderen Seite der Welle wird eine andere Gleichstrommaschine GM2 mit einem separaten 4-Quadrantensteller mit IGBTs und Dioden betrieben. Netzseitig ist dieser 4QSteller über einen Zwischenkreis mit einer einfachen B6-Brückenschaltung verbunden. GM1 wird drehzahl geregelt in positiver Drehrichtung betrieben. Die GM2 wird drehmoment geregelt betrieben. Welche Richtung des Drehmoments von GM2 ist zulässig und warum?
23. Eine H-Brücke wird an einen Zwischenkreis mit  $U_0 = \text{const.}$  angeschlossen. Der Aussteuergrad wird zu  $\frac{3}{4}$  eingestellt bei einer Pulsfrequenz von 1kHz und bipolarem Betrieb. Zeichnen Sie den Verlauf der Ausgangsspannung  $u(t)$  für 2 Pulsperioden! Zeichnen Sie auch den Mittelwert von  $u(t)$  ein!