

Klausur zum Modul Fahrzeugmechatronik

SoSe 15

05.10.2015

Fachgebiet Kraftfahrzeuge

Prof. Dr.-Ing. Steffen Müller

TU Berlin

Name	
Vorname	
Matrikel-Nr.	
Studiengang	

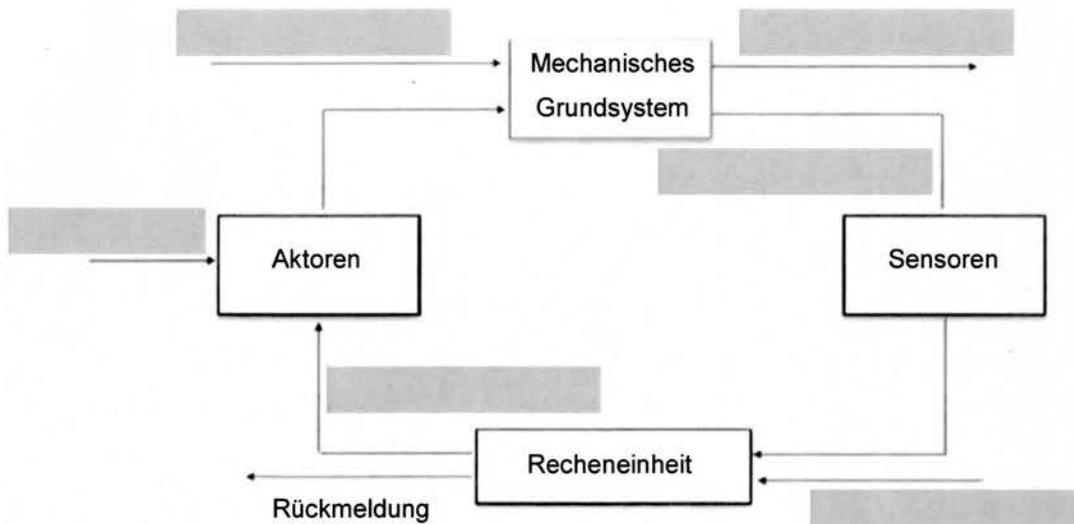
Punkte	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	Summe	Note
Max.	6	12	8	14	9	16	10	75	
Ist									

Mit Ihrer Unterschrift erklären Sie, dass Sie sich prüfungsfähig fühlen (§ 39 Abs.10 Satz 8-9 AllgPO vom 15. Januar 2014). Des Weiteren bestätigen Sie durch Ihre Unterschrift, dass Sie die Klausur selbständig und ohne unerlaubte Hilfsmittel bearbeitet haben.

Unterschrift

Aufgabenteil 1: Allgemeines zur Fahrzeugmechatronik (6 Punkte)

- a) Beschriften Sie die grau markierten Felder des Blockschaltbilds eines allgemeinen mechatronischen Systems.
(3 Punkte)

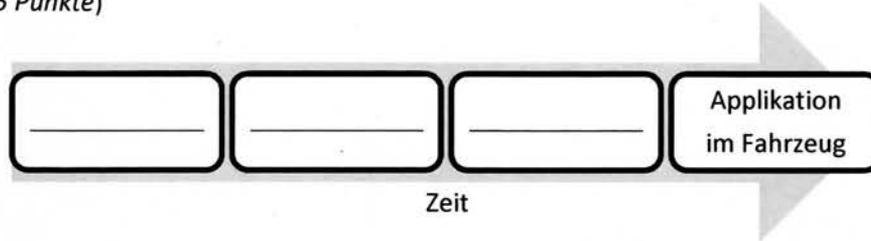


- b) „Mechatronik ermöglicht neue Produktaufgaben oder kann bisherige Aufgaben besser lösen“. Nennen Sie drei Beispiele, die diese Aussage belegen.
(1,5 Punkte)

c) Ordnen Sie folgende Begriffe nach ihrer zeitlichen Reihenfolge bei einer Entwicklung fahrzeugmechatronischer Systeme:

- HiL
- MiL
- SiL

(1,5 Punkte)



Aufgabenteil 2: Aktoren (12 Punkte)

Aufgabe 2.1: Allgemeiner Fragenteil (3 Punkte)

- a) Vervollständigen Sie die Tabelle der Energiewandler. (1,5 Punkte)

p_{ab} / p_{zu}	mechanisch translatorisch	mechanisch rotatorisch
mechanisch		
elektrisch		Elektromotor
fluidisch		

- b) Wie ist der Schlupf bei Asynchronmaschinen definiert? Skizzieren Sie anschließend qualitativ eine typische M- ω Kennlinie eines Asynchronmotors. Kennzeichnen Sie dabei das Kippmoment und die Synchron-Winkelgeschwindigkeit. (1,5 Punkte)

Aufgabe 2.2: Quasistatische Grundauslegung eines Motorpumpen-Aggregats für eine elektrohydraulische Lenkung (9 Punkte)

Die elektrohydraulische Lenkung (EHPS) unterscheidet sich von der konventionellen Servolenkung in dem Antrieb der Hydraulikpumpe. Während bei der konventionellen Servolenkung die mechanische Leistung der Hydraulikpumpe durch den Verbrennungsmotor zur Verfügung gestellt wird, treibt bei einer EHPS ein Elektromotor die Hydraulikpumpe an. Dadurch bieten EHPS Kraftstoffeinsparungen, da die Energieaufnahme bedarfsgerecht erfolgt.

Abbildung 1a) zeigt einen vereinfachten Schaltplan für das Motorpumpen-Aggregat (MPA) bestehend aus einer Hydraulikpumpe, einem Gleichstrommotor und einem DC-DC-Wandler, der die Sollmotorspannung U_M am Motor stellt. Die Aufgabe ist nun, das MPA quasistatisch auszulegen.

In einem Lenksystem treten die höchsten Zahnstangenkräfte typischerweise beim Parkieren. Für die quasistationäre Grundauslegung wird daher ein Parkiervorgang als Auslegungsszenario gewählt.

Für das Auslegungsszenario sind folgende Daten bekannt:

Zahnstangenkraft F_Z [N]	10500
Lenkgeschwindigkeit ω_L [rad/s]	10
Lenkgetriebeübersetzung i_L [mm/rad]	7,02

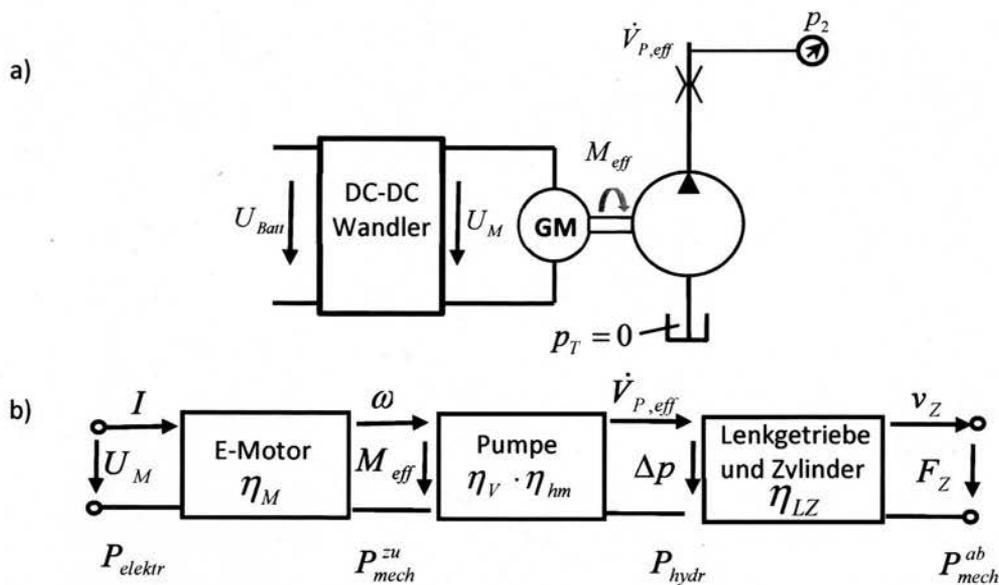


Abbildung 1: a) Vereinfachter Schaltplan für das MPA

b) Wirkungsgradkette einer EHPS

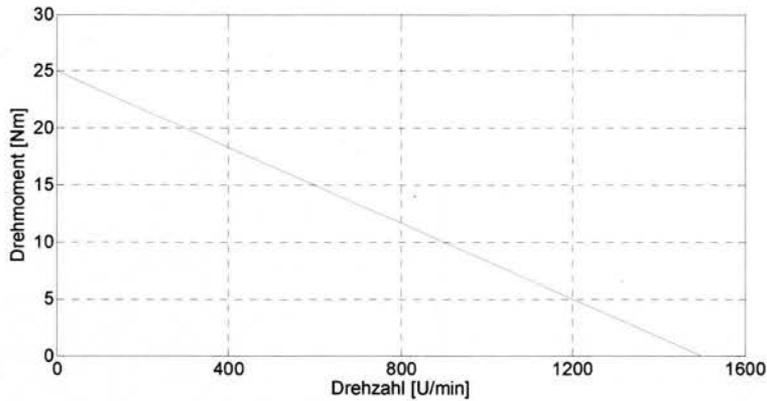
Des Weiteren sind folgende Parameter bekannt:

Batteriespannung:	$U_{Batt} = 13,5 \text{ V}$
Volumetrischer Wirkungsgrad:	$\eta_V = 0,96$
Hydraulisch-mechanischer Wirkungsgrad:	$\eta_{hm} = 0,91$
Wirkungsgrad des elektr. Motors:	$\eta_M = 0,80$
Blendenfaktor	$B = \alpha \cdot A = 0,540 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$
Öldichte	$\rho = 880 \text{ kg/m}^3$
Verdrängungsvolumen der Pumpe	$q = 15,01 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$
Gemessener Druck	$p_2 = 80 \text{ bar}$

Bearbeiten Sie folgende Aufgaben:

- a) Beim Parkiervorgang stellt sich am Pumpenausgang ein Betriebsdruck p_p in Höhe von 95,1 bar ein. Berechnen Sie den Volumenstrom $\dot{V}_{p,eff}$ durch die Blende. Wie groß wäre dabei der theoretisch mögliche Volumenstrom $\dot{V}_{p,theo}$ der Hydraulikpumpe? (1,5 Punkte)
- b) Ermitteln Sie den Wirkungsgrad η_{LZ} des Lenkgetriebe-Zylinder-Systems, siehe Abbildung 1b). Wie groß ist der gesamte Wirkungsgrad der EHPS? (1,5 Punkte)

- c) Für die Bereitstellung der erforderlichen mechanischen Leistung der Hydraulikpumpe kommt ein Gleichstrommotor mit der Drehzahl-Drehmoment-Kennlinie gemäß der nachfolgenden Abbildung in Frage. Erfüllt dieser Gleichstrommotor die Anforderungen des Auslegungsszenarios? Begründen Sie Ihre Antwort. (2,5 Punkte)

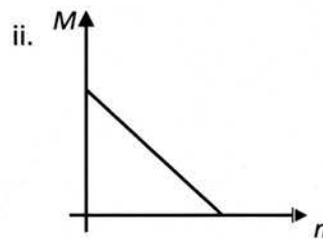
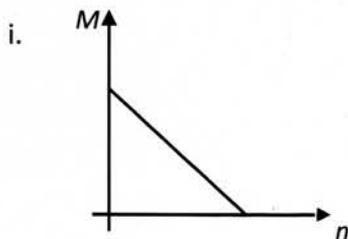


- d) Welche elektrische Leistung P_{elektr} muss dem Gleichstrommotor zur Verfügung gestellt werden, um den Parkiervorgang zu ermöglichen? Wie groß ist dabei der Ankerstrom, wenn der DC-DC-Wandler, die maximal mögliche Spannung am Gleichstrommotor anlegt? (1 Punkt)

e) Welche Möglichkeiten gibt es, die Drehzahl eines Gleichstrommotors zu regeln? Betrachten Sie hierfür die Differentialgleichung des Ankerstroms im stationären Betrieb. (1,5 Punkte)

f) Die Drehzahl-Drehmoment-Kennlinie eines Gleichstrommotors hängt von vielen Faktoren ab. Zeichnen Sie qualitativ in die vorgegebenen Kennlinien die neue Kennlinie, wenn:

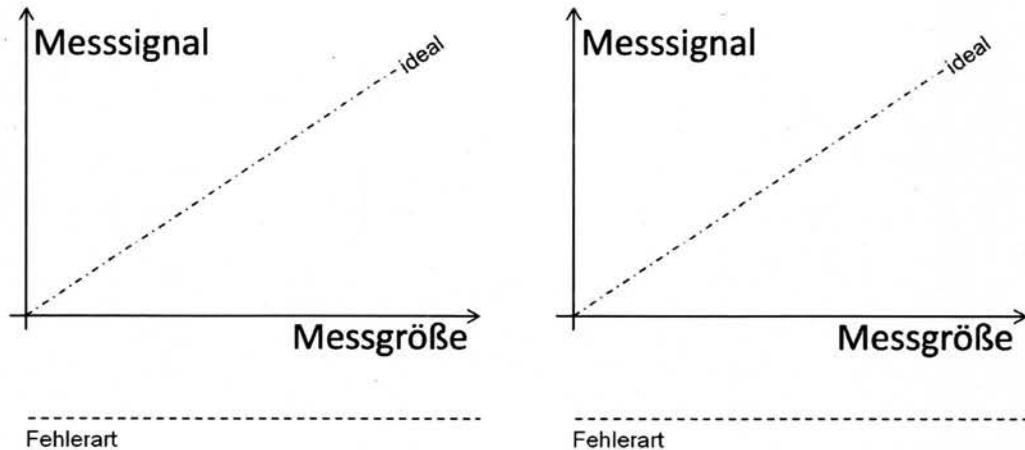
- i. der Ankerwiderstand verkleinert wird ($R_{neu} < R$)
 - ii. die Batteriespannung erhöht wird ($U_{Batt,neu} > U_{Batt}$)
- (1 Punkt)



Aufgabenteil 3: Sensoren und Signalverarbeitung (8 Punkte)

Aufgabe 3.1: Allgemeiner Fragenteil (3 Punkte)

- a) Verdeutlichen Sie grafisch die Kennlinien von zwei typischen Sensorfehlerarten und benennen Sie diese. (2 Punkte)



- b) Abbildung 2 zeigt die in einem Induktivegeber induzierte Spannung bei der Messung einer konstanten Drehzahl. Das Impulsrad (Zahnrad) hat 33 Zähne. Wie hoch ist die gemessene Drehzahl in [1/s]? (1 Punkt)

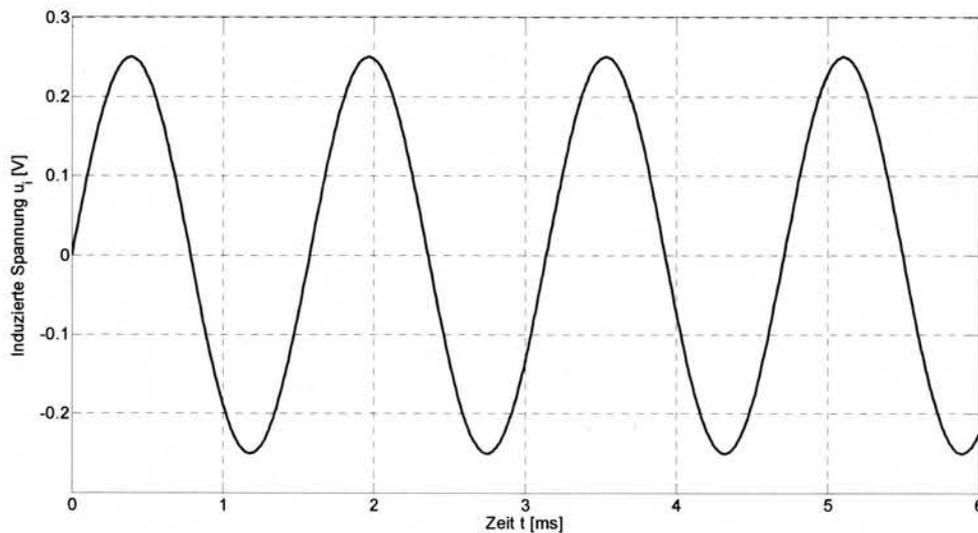


Abbildung 2: Induzierte Spannung bei einer Drehzahlmessung

Aufgabe 3.2: Elektrische Realisierung eines Filters (5 Punkte)

Ein 4Bit A/D-Wandler wird verwendet, um Schwingungen einer elektrischen Spannung aufzuzeichnen. Der Wandler tastet das Signal mit der Frequenz f_{tast} ab und besitzt einen Messbereich U_R von 0 bis 10V. Um Aliasingeffekte zu vermeiden, muss dem A/D-Wandler ein Tiefpassfilter vorgeschaltet werden, dessen Grenzfrequenz f_{grenz} gleich der Nyquistfrequenz f_{nyq} ist. Elektrisch kann sich ein solches Filter durch eine Reihenschaltung von einer Spule und einem ohmschen Widerstand realisieren lassen (RL-Filter), wobei die Spule hier als ideale Induktivität angenommen werden kann.

Das Signal tritt als Eingangsspannung U_E in den Filter ein und verlässt ihn als Ausgangsspannung U_A .

Gegeben sei die Formel

$$2^{n_D} = \frac{U_R}{U_{\text{aufl}}} + 1,$$

die den Zusammenhang zwischen der Auflösung U_{aufl} und der Bit-Anzahl des Wandlers beschreibt.

a) Zeichnen Sie das elektrische Ersatzschaltbild des RL-Filters. (1 Punkt)

b) Stellen Sie die dazugehörige DGL auf. (1 Punkt)

- c) Überführen Sie die DGL in den Laplaceraum und ermitteln Sie die Übertragungsfunktion

$$G(s) = \frac{U_A(s)}{U_E(s)} = \frac{I(s)}{U_E(s)}$$

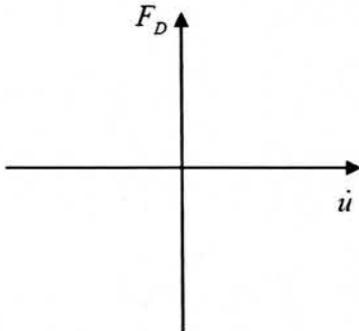
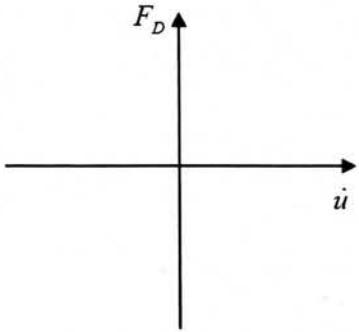
(2 Punkte)

- d) Ermitteln Sie für einen 4Bit A/D-Wandler die Auflösung U_{auf} des Signals für den Messbereich von 0 bis 10V. (1 Punkt)

Aufgabenteil 4: Modellbildung und Kennwertermittlung (14 Punkte)

Aufgabe 4.1: Allgemeiner Fragenteil (4 Punkte)

- a) Skizzieren Sie den Dämpfungskraftverlauf über die Geschwindigkeit für die in der unten stehenden Tabelle angegebenen Modellierungsansätze von Dämpfungskräften. Wie lautet die jeweils dazugehörige Berechnungsvorschrift? (2 Punkte)

Modellierungsansatz / Berechnungsvorschrift	Dämpfungskraftverlauf über Geschwindigkeit
<p>Coulombsche Reibung</p> <p>Berechnungsvorschrift:</p> <p>_____</p>	
<p>Viskose Dämpfung</p> <p>Berechnungsvorschrift:</p> <p>_____</p>	

- b) Nennen Sie zwei Verfahren zur Bestimmung der Schwerpunktlage eines Körpers. Kennzeichnen Sie hierbei, ob es sich um eine experimentelle oder analytische Methode zur Kennwertermittlung handelt. (2 Punkte)

Aufgabe 4.2: Aufstellen der Bewegungsdifferentialgleichung mittels Schwerpunktsatz und Drallsatz
(10 Punkte)

Das vereinfachte Modell einer PKW-Achse ist in Abbildung 3 dargestellt. Der masselose Achsträger ist im Punkt A gelagert und im Abstand l_1 mit dem Rad verbunden. Das Rad besitzt die Masse m_R und den Massenträgheitstensor J_R bezogen auf seinen Schwerpunkt S. Des Weiteren ist das System über ein Feder-Dämpferelement mit der Karosserie verbunden. *Gewichtskraft darf vernachlässigt werden (wie in Übungsaufgaben)*

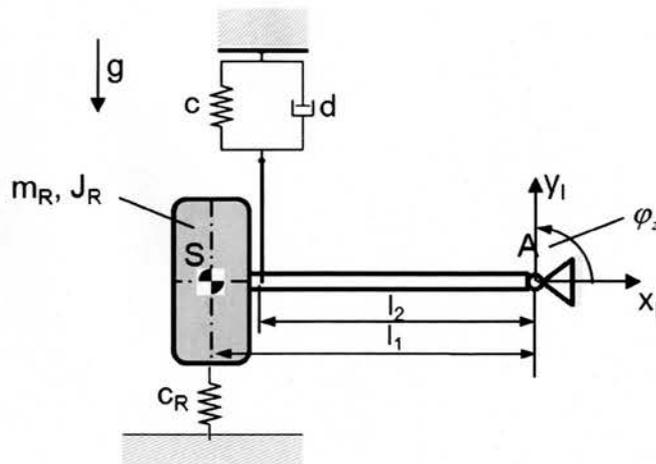


Abbildung 3: Mechanisches Ersatzmodell einer PKW-Achse

Folgende Parameter können als bekannt angenommen werden:

$$m_R, J_R, l_1, l_2, c, d, c_R$$

$$\mathbf{J}_R = \begin{bmatrix} J_1 & 0 & 0 \\ 0 & J_2 & 0 \\ 0 & 0 & J_3 \end{bmatrix} \text{ ist gegeben für das körperfeste Koordinatensystem } (x_i, y_i, z_i).$$

Bearbeiten Sie die Aufgabe nach den folgenden Arbeitsschritten.

a) Schneiden Sie den Körper frei und tragen Sie alle freigeschnittenen Kräfte ein.
(1 Punkt)

b) Ermitteln Sie die auf die PKW-Achse wirkenden Federkräfte und die Dämpferkraft für kleine Drehwinkel φ_z um den Lagerpunkt A. (2 Punkte)

- c) Ermitteln Sie die lineare Bewegungsdifferentialgleichung um den Drehpunkt A, in Abhängigkeit von φ_z , mittels Schwerpunktsatz und Drallsatz. (7 Punkte)

Aufgabenteil 5: Beschreibung und Verhalten von Mehrgrößensystemen
(9 Punkte)

Aufgabe 5.1: Allgemeiner Fragenteil (3 Punkte)

a) Was versteht man unter Polen bei SISO- und MIMO-Systemen? (2 Punkte)

b) Gegeben ist ein System mit der diagonalähnlichen Systemmatrix

$$A = \begin{bmatrix} 5 & 2 \\ 0 & -1 \end{bmatrix}$$

Wie lautet die transformierte Systemmatrix \tilde{A} , wenn das System in die Kanonische Normalform transformiert wird? (1 Punkt)

$$\tilde{A} =$$

Aufgabe 5.2: Phasenportraits linearer Systeme (6 Punkte)

Gegeben sind folgende Systeme:

System (1):

$$A = \begin{bmatrix} 2 & 2 \\ 4 & 0 \end{bmatrix}$$

System (2):

$$A = \begin{bmatrix} -1 & 2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

System (3):

$$A = \begin{bmatrix} -1 & 2 \\ 0 & -1 \end{bmatrix}$$

Abbildung 4 zeigt die zugehörigen Phasenportraits.

Ordnen Sie die Phasenportraits den Systemen 1, 2 und 3 zu. (Auswahl muss begründet werden!)

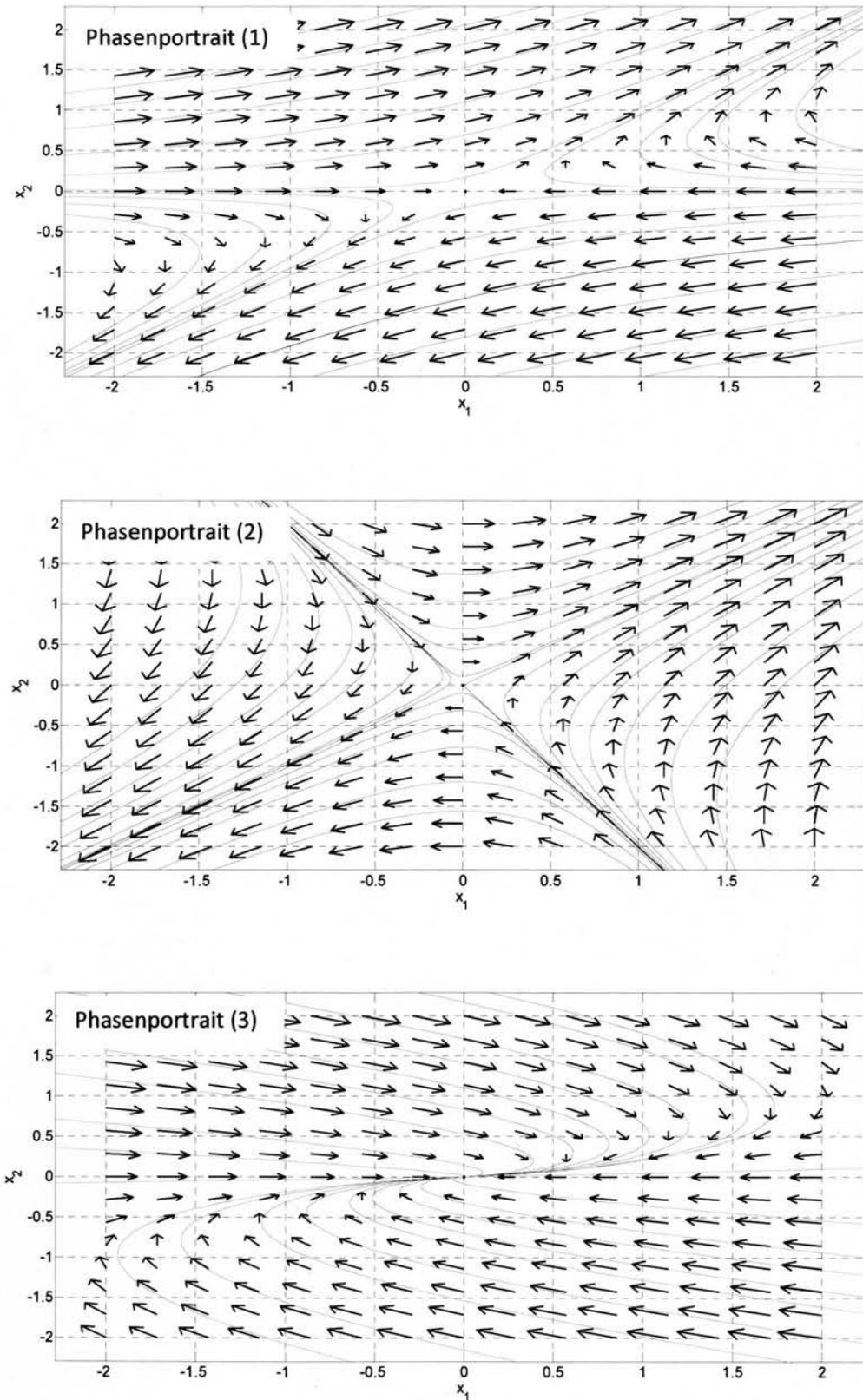


Abbildung 4: Phasenportraits 1, 2 und 3

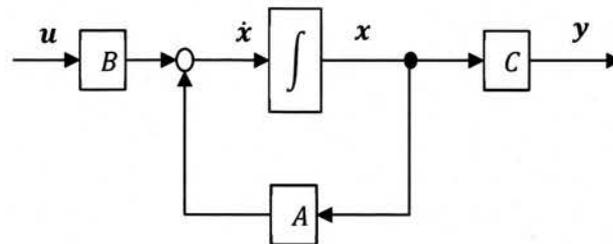
Aufgabenteil 6: Eigenschaften und Analyse von Mehrgrößensystemen (16 Punkte)

Aufgabe 6.1: Allgemeiner Fragenteil (4 Punkte)

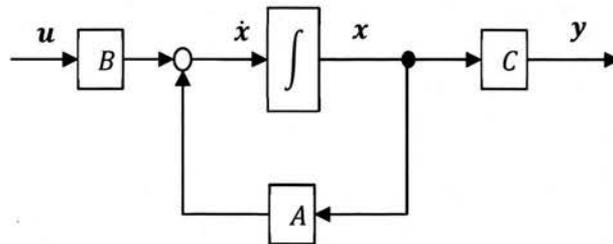
a) Was muss für die Realisierung einer Störgrößenaufschaltung bekannt sein? (1 Punkt)

b) Ergänzen Sie folgende Blockschaltbilder

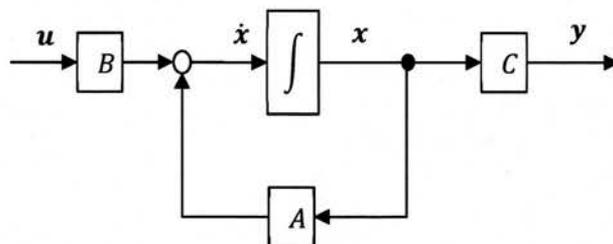
i. mit einer Zustandsrückführung und einem Vorfilter (1 Punkt)



ii. mit einer Ausgangsrückführung (1 Punkt)



iii. mit einem PI-Mehrgrößenregler (1 Punkt)



Aufgabe 6.2: Steuerbarkeit und Beobachtbarkeit (6 Punkte)

Gegeben ist das System:

$$\begin{aligned}\dot{x}_1 &= -2x_1 + u \\ \dot{x}_2 &= 4x_1 - zx_2 - 2u \\ y &= x_1 + x_2\end{aligned}\quad z \in \mathbb{R}^1$$

a) Für welche Werte von z ist das System nach Kalman nicht steuerbar? (2 Punkte)

b) Für welche Werte von z ist das System nach Kalman nicht beobachtbar? (2 Punkte)

- c) Zeigen Sie, dass für $z = 2$ das System in die kanonische Normalform nicht transformiert werden kann. (2 Punkte)

Aufgabe 6.3: Linearisierung der DGL einer permanentenerregten Synchronmaschine (PMSM) (6 Punkte)

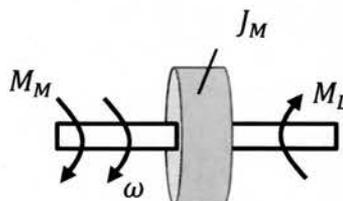
Aufgrund von vielen Vorteilen der PMSM kommen sie bei Elektrofahrzeugen (z.B. BMW i3) zum Einsatz. PMSM gehören zu Drehfeldmaschinen und werden aufgrund regelungstechnischer Vorteile mit Hilfe von komplexen Raumzeigern mathematisch beschrieben. Dabei werden die Wechselgrößen (Ströme und Spannungen) in Gleichgrößen transformiert.

Das nichtlineare Spannungs-Dgl.-System einer sinuskommutierten PMSM lautet im rotorfesten dq-Koordinatensystem

$$U_d = RI_d + L_d \frac{d}{dt} I_d - L_q p \omega I_q$$

$$U_q = RI_q + L_q \frac{d}{dt} I_q + L_d p \omega I_d + p \hat{\Psi}_{PM} \omega$$

Mit Hilfe des unten dargestellten mechanischen Ersatzmodells kann die Differentialgleichung für die Winkelgeschwindigkeit ω hergeleitet werden

$$J_M \dot{\omega} = M_M - M_L$$


Für das Drehmoment des Motors M_M gilt:

$$M_M = \frac{3}{2} p \cdot [\hat{\Psi}_{PM} \cdot I_q + (L_d - L_q) \cdot I_d \cdot I_q]$$

Darin sind R , L_x , p und $\hat{\Psi}_{PM}$ der Strangwiderstand, die -induktivität, die Polpaarzahl und die Amplitude der Flussverketung der Permanentmagnete.

Zweck Stabilitätsuntersuchungen werden die Differentialgleichungen von Drehfeldmaschinen um ihren Arbeitspunkten linearisiert. Linearisieren Sie die Differentialgleichungen der PMSM um den Arbeitspunkt

$$I_{d,AP} = 0, \quad I_{q,AP} = I_{q,0} \quad \text{und} \quad \omega_{AP} = \omega_0$$

so, dass die linearisierten Differentialgleichungen die Form

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{u}$$

bekommen, mit

$$\mathbf{x} = [I_d \quad I_q \quad \omega]^T \quad \text{und} \quad \mathbf{u} = [U_d \quad U_q \quad M_L]^T$$

Aufgabenteil 7: Regler- und Beobachterentwurf (10 Punkte)

Aufgabe 7.1: Allgemeiner Fragenteil (3 Punkte)

- a) Nennen Sie einen Vorteil von Kalman-Filter gegenüber Luenberger Beobachter. (1 Punkt)
- b) Bei einer Zustandsrückführung wird unter anderem vorausgesetzt, dass alle Zustände messbar sind. Bei vielen technischen Systemen ist die Messung von allen Zuständen technisch nicht möglich oder mit hohen Kosten verbunden.
Nennen Sie zwei mögliche Reglerstrukturen mit denen die Regelung solcher Systeme ermöglicht wird. (1 Punkt)

Aufgabe 7.2: Kalman-Filter (7 Punkte)

Gegeben sei das LTI-System mit dem Prozessrauschen $\varepsilon(t)$ sowie dem Messrauschen $v(t)$:

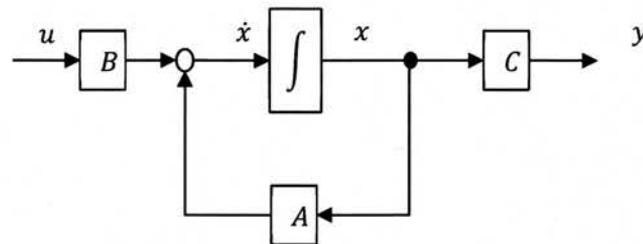
$$\dot{x}(t) = 2x(t) + u(t) + \varepsilon(t)$$

$$y(t) = 4x(t) + v(t)$$

Das LTI-System wird mit dem optimalen Regler K stabilisiert

$$K = 4$$

- a) Ergänzen Sie das folgende Blockschaltbild um die Störgrößen ε und v sowie einen Linear-quadratic-gaussian-Regler (LQG-Regler). Kennzeichnen Sie dabei die Signalpfade \hat{y} , \hat{x} und $\dot{\hat{x}}$. (3 Punkte)



- b) Bestimmen Sie die Rückführmatrix L des Kalman-Filters für den Fall, dass die Varianzmatrizen von Prozess- und Messrauschen durch $Q = 2, R = 1$ gegeben sind.
(2 Punkte)

- c) Welche Eigenwerte hat der geschlossene Regelkreis inklusive Kalman-Filter?
(2 Punkte)