Prüfungsklausur Mess- und Regelungstechnik 2 (MRT2)

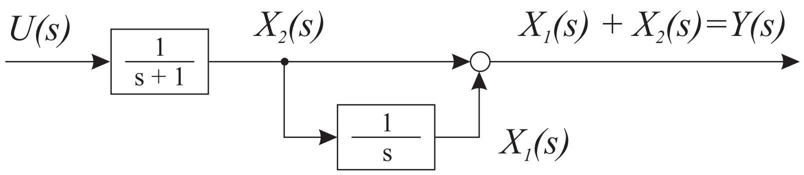
Prof. Dr.-Ing. O. Nelles
Institut für Mechanik und Regelungstechnik
Universität Siegen

8. Oktober 2007

Name:	Punkte	A1	A2	A3	A4	A5	Ges.
Mat.-Nr.:	Soll:	10	20	20	30	20	100
Note:	Ist:						

Aufgabe 1: Zustandsgleichungen

Gegeben sei das Blockschaltbild einer Regelstrecke im Bildbereich.



Stellen Sie die Zustandsgleichungen im Zeitbereich auf. Ermitteln Sie $\mathbf{A}$, $\mathbf{b}$ und $\mathbf{c}^T$.

Aufgabe 2: Zustandsbeobachter

Gegeben ist folgende Regelstrecke in Zustandsform:

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \begin{bmatrix} 0 & 2 \\ 0 & -4 \end{bmatrix} \mathbf{x}(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ 2 \end{bmatrix} u(t), \qquad \mathbf{y}(t) = \begin{bmatrix} 1 & 1 \end{bmatrix} \mathbf{x}(t)$$

a) Ermitteln Sie die Pole des Systems. Ist das System stabil?

b) Zeigen Sie, dass das System vollständig zustandssteuerbar ist.

c) Zeigen Sie, dass das System vollständig zustandsbeobachtbar ist.

d) Entwerfen Sie einen Zustandsbeobachter derart, dass die Eigenwerte (Pole) des Beobachters bei $s = -4$ liegen. Geben Sie die Beobachtergleichungen an!

Aufgabe 3: Verständnisfragen

Bei den nachfolgenden Fragen sind die richtigen Antworten deutlich zu kennzeichnen.
Jede Frage hat entweder eine oder zwei richtige Antworten!
Für jede richtige Antwort gibt es einen Punkt. Wird bei einer Frage eine richtige und eine falsche Antwort angekreuzt, gibt es für diese Frage keinen Punkt.

a) Was versteht man unter einer Hammerstein- oder Wiener-Struktur?

- ☐ Ein System, das sich in eine Reihenschaltung aus einem dynamischen linearen und einem statischen nichtlinearen Teilsystem zerlegen lässt.
- ☐ Besondere Reglerstrukturen für den optimalen Reglerentwurf.
- ☐ Beide Begriffe bedeuten das Gleiche und bezeichnen eine besondere nichtlineare Streckenstruktur.

b) Was ist eine Phasenebene?

- ☐ Sie stellt die Phasenverschiebung eines Systems im Frequenzgang dar.
- ☐ Die Darstellung zweier Zustandsgrößen eines Systems in einem Diagramm.
- ☐ Ein anderes Wort für die Zustandsebene.

c) Regt man ein nichtlineares System mit Sinusschwingungen unterschiedlicher Frequenz an ...

- ☐ ist die Verstärkung der Amplitude stets nur von der Frequenz abhängig.
- ☐ kann die Phasenverschiebung von der Amplitude abhängig sein.
- ☐ kann sich die Frequenz und die Signalform der Schwingung ändern.

d) Welche dieser Systeme sind nichtlinear?

- ☐ Lose
- ☐ Hysterese
- ☐ Totzeit

e) Was trifft für die Zustandsgleichungen in Regelungsnormalform zu?

- ☐ Die Systemmatrix $\mathbf{A}$ hat eine spezielle Form; von den $n \times n$ Elementen sind nur n Elemente der letzten Zeile vom System abhängig.
- ☐ Die Regelungsnormalform weist dasselbe Ein-/Ausgangsverhalten wie die Beobachtungsnormalform auf.
- ☐ Die Regelungsnormalform ist ungeeignet für numerische Methoden.

f) Welche Aussagen treffen auf die Diagonalform der Systemmatrix $\mathbf{A}$ zu?

- ☐ Die Diagonalform von $\mathbf{A}$ wird auch Modalform genannt.
- ☐ Eine Transformation der Systemmatrix $\mathbf{A}$ in Diagonalform ist immer möglich.
- ☐ Die Diagonalelemente von $\mathbf{A}$ sind gleichzeitig die Eigenwerte λ_i von $\mathbf{A}$.

g) Was gilt für die Zustände eines dynamischen Systems?

- ☐ Es gibt nur eine beschränkte Anzahl von Wahlmöglichkeiten für den Zustandsvektor, damit dasselbe Ein-/Ausgangsverhalten erreicht wird.
- ☐ Der Zustandsvektor kann mehr Elemente enthalten als nötig.
- ☐ Im Zustandsvektor muss alle innere Information über das System enthalten sein.

h) Welche Eigenschaften weisen Zustandsraummethoden im Allgemeinen auf?

- ☐ Eine DGL n. Ordnung kann zu einem System aus n DGLs jeweils 1. Ordnung umformuliert werden.
- ☐ Zustandsraummethoden sind ausschließlich für lineare Systeme geeignet.
- ☐ Zustandsraummethoden sind ausschließlich für Eingrößensysteme geeignet.

i) Wie lautet die **ideale** Vorsteuerung für die Strecke $G(s) = \frac{1}{(s+1)^2} \cdot e^{-2s}$?

- ☐ $(s+1)^2 \cdot e^{2s}$
- ☐ $(s+1)^2$
- ☐ $(s+1)^2 \cdot e^{-2s}$

j) Wie lautet eine **realisierbare** Vorsteuerung für $G(s) = \frac{1}{(s+1)^2} \cdot e^{-2s}$, wenn der zukünftige Verlauf der Führungsgröße unbekannt ist?

- ☐ $(s+1)^2$
- ☐ $\left(\frac{s+1}{1+Ts}\right)^2$
- ☐ $\frac{(s+1)^2}{(1+Ts)^2} \cdot e^{2s}$

k) Was ist der Zweck der Entkopplung eines Mehrgrößenregelkreises?

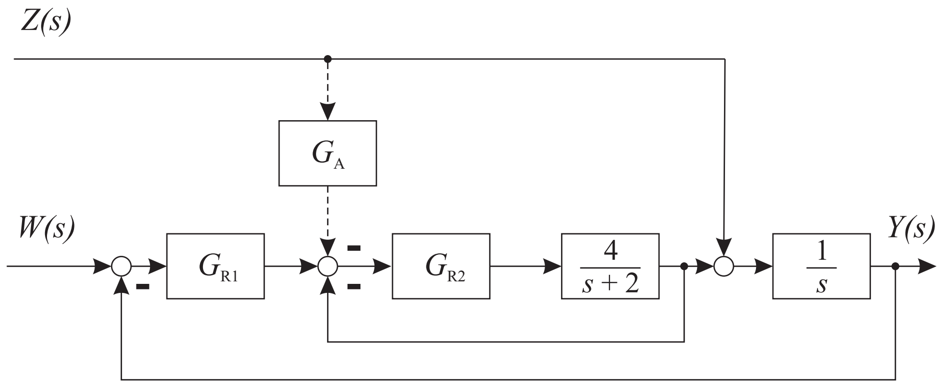
- ☐ Die Entkopplung verhindert, dass sich Störungen auf die Regelgröße auswirken.
- ☐ Die Umwandlung des gekoppelten Regelkreises in mehrere voneinander unabhängige Regelkreise.
- ☐ Die Verwendung der bekannten Reglerentwurfsmethoden für einschleifige Regelkreise zu ermöglichen.

l) Was ist eine Kaskadenregelung?

- ☐ Eine Regelung, die aus einem inneren und mindestens einem umschließenden äußeren Regelkreis besteht.
- ☐ Eine Reihenschaltung zweier Regelkreise.
- ☐ Eine insbesondere in der Antriebstechnik sehr häufig verwendete Reglerstruktur.

Aufgabe 4: Kaskadenregelung und Störgrößenaufschaltung

Gegeben ist folgender Regelkreis in Kaskadenstruktur mit Störgrößenaufschaltung $G_A(s)$. Die Übertragungsfunktionen der Regler $G_{R1}(s)$ und $G_{R2}(s)$ seien zunächst unbekannt. Außerdem nehmen Sie zunächst an, die Störgrößenaufschaltung sei nicht vorhanden.



a) Berechnen Sie die Übertragungsfunktion des inneren Regelkreises.

b) Berechnen Sie die Führungsübertragungsfunktion $G_W(s)$ und die Störübertragungsfunktion $G_Z(s)$ des gesamten Regelkreises mit Hilfe der unter a) bestimmten Übertragungsfunktion des inneren Regelkreises.

c) Zeigen Sie, dass unabhängig von der Wahl der Regler $G_{R1}(s)$ und $G_{R2}(s)$ (Stabilität vorausgesetzt), bei sprungförmiger Änderung der Führungsgröße $w(t) = \sigma(t)$ kein bleibender Regelfehler auftritt $y(t \to \infty) = 0$.

d) Betrachten Sie weiterhin den Regelkreis ohne Störgrößenaufschaltung. Zur Regelung soll ein PI-Regler $G_{R1}(s) = K_{PI}\frac{T_n s+1}{T_n s}$ und ein P-Regler $G_{R2}(s) = K_P$ verwendet werden. Zeigen Sie rechnerisch, dass der Regelfehler für $t \to \infty$ bei einer sprungförmigen Störung $z(t) = \sigma(t)$ bei dieser Reglerwahl verschwindet.

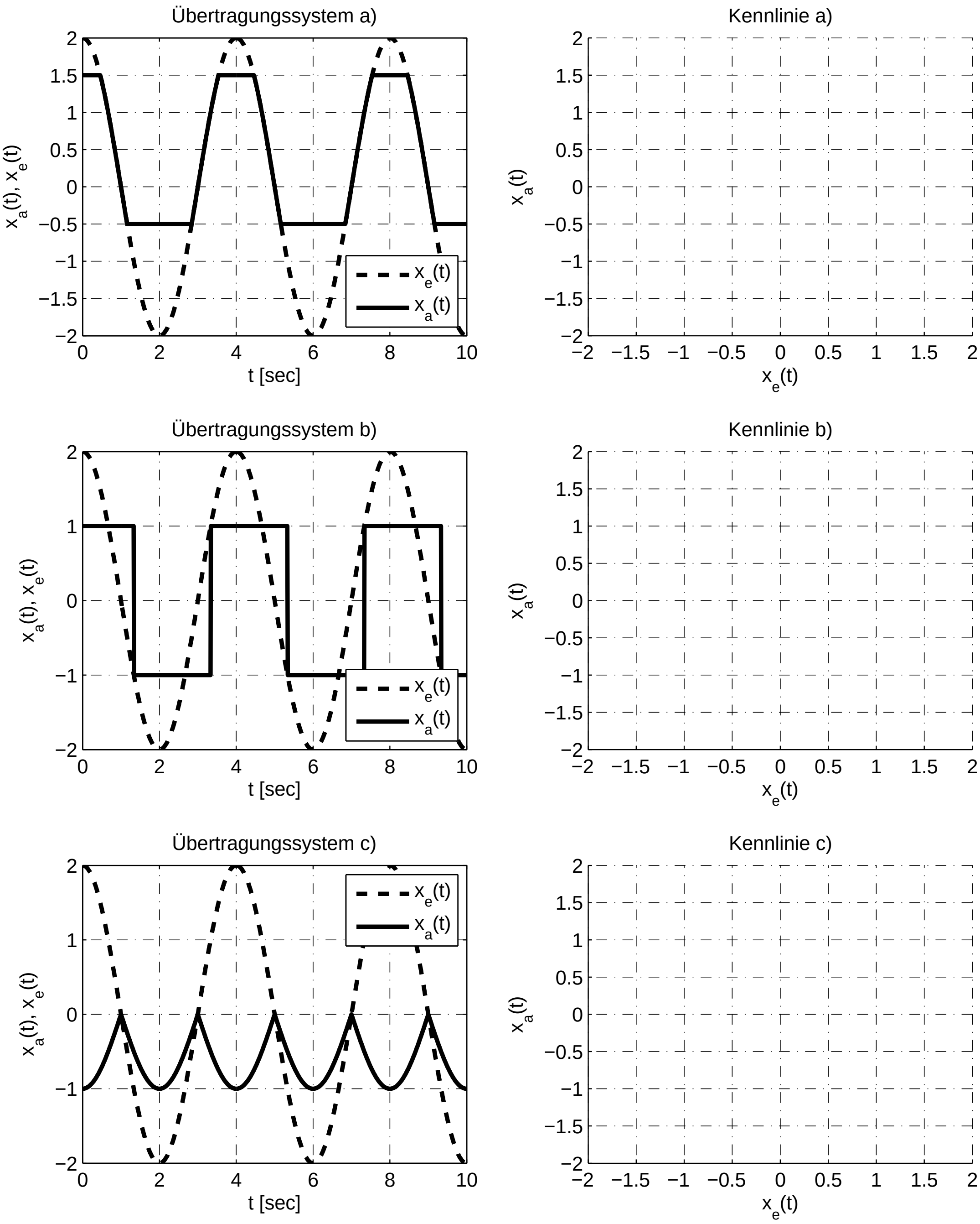
e) Verwendet man für G_{R1} einen P-Regler und für G_{R2} einen PI-Regler, verschwindet der Regelfehler nicht. Wie kann man dies mit Hilfe des Inneren-Modell-Prinzips begründen?

f) Ermitteln Sie durch Ablesen aus dem Blockschaltbild die Übertragungsfunktion der Störgrößenaufschaltung $G_A(s)$ für den Fall, dass $G_{R2}(s) = K_P$ gewählt wurde. Benutzen Sie hierzu die Übertragungsfunktion aus a). Zeigen Sie, dass $G_A(s)$ nicht realisierbar ist und schlagen Sie eine näherungsweise Realisierung vor.

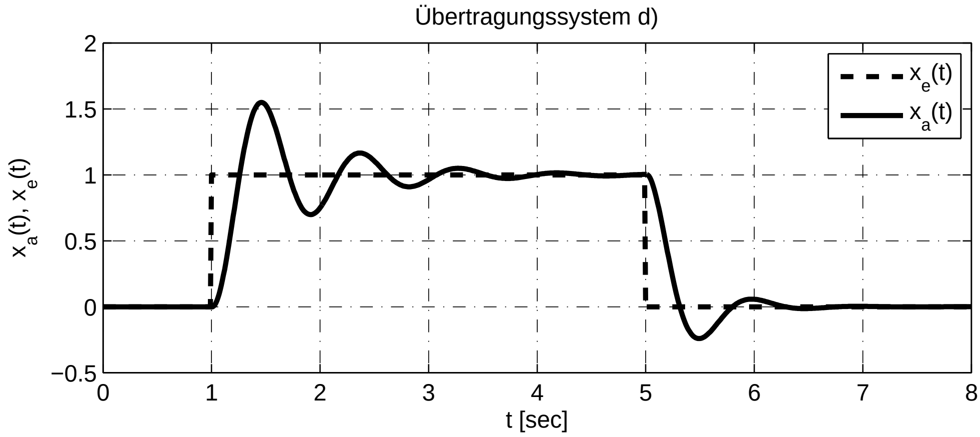
g) Es wurde $G_{R1}(s)$ als PI-Regler und $G_{R2}(s)$ als P-Regler gewählt. Alle Pole des geschlossenen Regelkreises sollen bei $s = -1$ liegen. Ermitteln Sie die nötigen Reglerparameter K_P, K_{PI} und T_n.

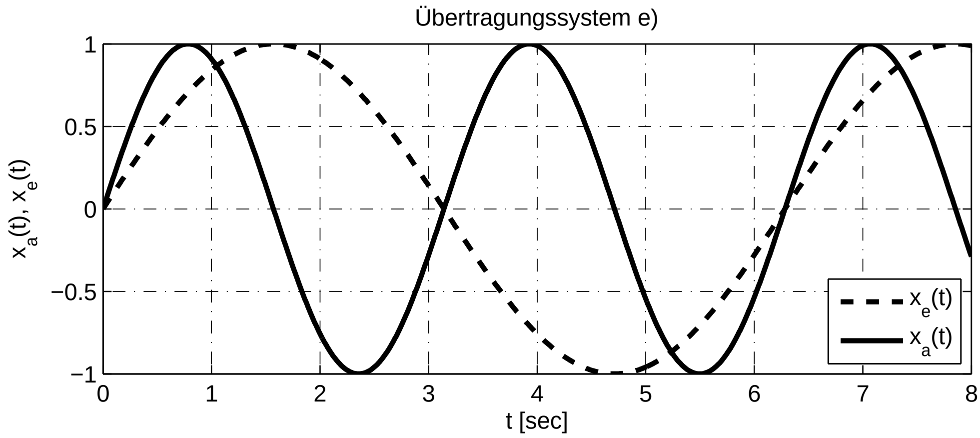
Aufgabe 5: Nichtlineare Systeme

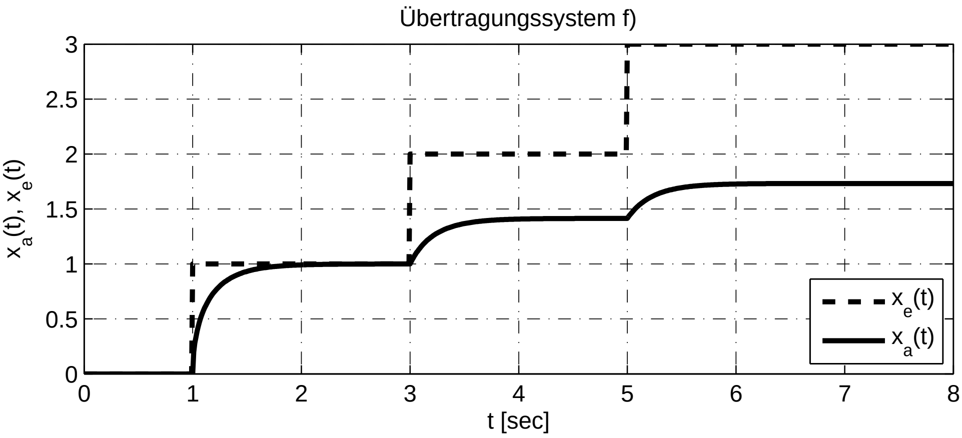
a) Gegeben sind die Systemantworten $x_a(t)$ nichtlinearer Regelkreiselemente auf ein gegebenes Eingangssignal $x_e(t)$. Zeichnen Sie die Kennlinien der nichtlinearen Übertragungssysteme a) bis c) in die vorbereiteten Diagramme und geben Sie an, ob es sich jeweils um eine **eindeutige** oder **mehrdeutige** Kennlinie handelt.



b) Für drei **nichtlineare** Systeme d) bis f) wurden die unten abgebildeten Verläufe der Ein- und Ausgangsgröße gemessen. Begründen Sie anhand der Zeitverläufe, warum es sich um nichtlineare Systeme handeln muss.







Lösungen:

Aufgabe 1: Zustandsgleichungen

Zustandsgleichungen im Bildbereich:

$$X_1(s) = \frac{1}{s} X_2(s) \quad \Leftrightarrow \quad \underline{s X_1(s) = X_2(s)}$$ $\boxed{1}$

$$X_2(s) = \frac{1}{s+1} U(s) \quad \Leftrightarrow \quad \underline{s X_2(s) = -X_2(s) + U(s)}$$ $\boxed{1}$

$$\underline{Y(s) = X_1(s) + X_2(s)}$$ $\boxed{1}$

Zustandsgleichungen im Zeitbereich:

$$\dot{x}_1(t) = x_2(t)$$ $\boxed{1}$

$$\dot{x}_2(t) = -x_2(t) + u(t)$$ $\boxed{1}$

$$y(t) = x_1(t) + x_2(t)$$ $\boxed{1}$

$$\boxed{\dot{\mathbf{x}}(t) = \underbrace{\begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -1 \end{bmatrix}}_{\mathbf{A}} \mathbf{x}(t) + \underbrace{\begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}}_{\mathbf{b}} u(t), \qquad \mathbf{y}(t) = \underbrace{\begin{bmatrix} 1 & 1 \end{bmatrix}}_{\mathbf{c}^T} \mathbf{x}(t)}$$ $\boxed{4}$

$\boxed{\sum 10}$

Aufgabe 2: Zustandsbeobachter

a) Stabilität:

$$\det[s\mathbf{I} - \mathbf{A}] = 0$$

$$\begin{vmatrix} s & -2 \\ 0 & s+4 \end{vmatrix} = 0 \quad \Rightarrow \underline{s(s+4) = 0}$$ $\boxed{2}$

<u>Pole:</u> $s_1 = 0; \quad s_2 = -4$ $\boxed{2}$

Das System ist grenzstabil, da der Pol $s_1 = 0$ auf der imaginären Achse liegt. $\boxed{1}$

b) Zustandssteuerbarkeit:

Steuerbarkeitsmatrix $\mathbf{S}_S = [\mathbf{b} \;\; \mathbf{Ab}], \quad \mathbf{b} = \begin{bmatrix} 0 \\ 2 \end{bmatrix}$

$$\mathbf{S}_S = \begin{bmatrix} 0 & 4 \\ 2 & -8 \end{bmatrix} \quad \Rightarrow \quad \det[\mathbf{S}_S] = -8 \neq 0 \quad \Rightarrow \quad \text{Rang}[\mathbf{S}_S] = 2$$ $\boxed{3}$

Das System ist **vollständig zustandssteuerbar**. $\boxed{1}$

c) Zustandsbeobachtbarkeit:

Beobachtbarkeitsmatrix $\mathbf{S}_B = \begin{bmatrix} \mathbf{c}^T \\ \mathbf{c}^T \cdot \mathbf{A} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{c}^T = [1 \ \ 1]$

$\mathbf{S}_B = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 0 & -2 \end{bmatrix} \quad \Rightarrow \quad \det[\mathbf{S}_B] = -2 \neq 0 \quad \Rightarrow \quad \text{Rang}[\mathbf{S}_B] = 2$ $\boxed{3}$

Das System ist **vollständig zustandsbeobachtbar**. $\boxed{1}$

d) Zustandsbeobachter vollständiger Ordnung:

$$\dot{\hat{\mathbf{x}}}(t) = \left(\mathbf{A} - \mathbf{l} \cdot \mathbf{c}^T\right) \cdot \hat{\mathbf{x}}(t) + \mathbf{l} \cdot \mathbf{y}(t) + \mathbf{b} \cdot \mathbf{u}(t), \qquad \hat{\mathbf{y}}(t) = \mathbf{c}^T \cdot \hat{\mathbf{x}}(t)$$

hier: $\mathbf{l} = \begin{bmatrix} l_1 \\ l_2 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{c}^T = [1 \ \ 1], \quad \mathbf{b} = \begin{bmatrix} 0 \\ 2 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{l} \cdot \mathbf{c}^T = \begin{bmatrix} l_1 & l_1 \\ l_2 & l_2 \end{bmatrix}$

$\Rightarrow \dot{\hat{\mathbf{x}}}(t) = \begin{bmatrix} -l_1 & 2 - l_1 \\ -l_2 & -4 - l_2 \end{bmatrix} \cdot \hat{\mathbf{x}}(t) + \begin{bmatrix} l_1 \\ l_2 \end{bmatrix} \cdot y(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ 2 \end{bmatrix} \cdot u(t)$ $\boxed{3}$

Beobachterentwurf:

$$\det[s\mathbf{I} - \mathbf{A} + \mathbf{l} \cdot \mathbf{c}^T] = \begin{vmatrix} s + l_1 & -2 + l_1 \\ l_2 & s + 4 + l_2 \end{vmatrix} = (s + l_1) \cdot (s + 4 + l_2) - l_2 \cdot (-2 + l_1) = 0$$

$\Rightarrow s^2 + (4 + l_1 + l_2)s + (4l_1 + 2l_2) = 0$ $\boxed{1}$

Vorgabe: alle Pole bei -4 $\Rightarrow (s + 4)^2 = s^2 + 8s + 16$ $\boxed{1}$

Koeffizientenvergleich ergibt: $\boxed{\mathbf{l} = \begin{bmatrix} 4 \\ 0 \end{bmatrix}}$ $\boxed{1}$

Beobachtergleichungen:

$\Rightarrow \dot{\hat{\mathbf{x}}}(t) = \begin{bmatrix} -4 & -2 \\ 0 & -4 \end{bmatrix} \cdot \hat{\mathbf{x}}(t) + \begin{bmatrix} 4 \\ 0 \end{bmatrix} \cdot y(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ 2 \end{bmatrix} \cdot u(t)$ $\boxed{1}$

$\hat{\mathbf{y}}(t) = [1 \ \ 1] \cdot \hat{\mathbf{x}}(t)$

$\boxed{\sum 20}$

Aufgabe 3: Verständnisfragen

a) Was versteht man unter einer Hammerstein- oder Wiener-Struktur?

■ Ein System, das sich in eine Reihenschaltung aus einem dynamischen linearen und einem statischen nichtlinearen Teilsystem zerlegen lässt.

☐ Besondere Reglerstrukturen für den optimalen Reglerentwurf.

☐ Beide Begriffe bedeuten das Gleiche und bezeichnen eine besondere nichtlineare Streckenstruktur.

b) Was ist eine Phasenebene?

☐ Sie stellt die Phasenverschiebung eines Systems im Frequenzgang dar.

■ Die Darstellung zweier Zustandsgrößen eines Systems in einem Diagramm.

■ Ein anderes Wort für die Zustandsebene.

c) Regt man ein nichtlineares System mit Sinusschwingungen unterschiedlicher Frequenz an …

☐ ist die Verstärkung der Amplitude stets nur von der Frequenz abhängig.

■ kann die Phasenverschiebung von der Amplitude abhängig sein.

■ kann sich die Frequenz und die Signalform der Schwingung ändern.

d) Welche dieser Systeme sind nichtlinear?

■ Lose

■ Hysterese

☐ Totzeit

e) Was trifft für die Zustandsgleichungen in Regelungsnormalform zu?

■ Die Systemmatrix $\mathbf{A}$ hat eine spezielle Form; von den $n \times n$ Elementen sind nur n Elemente der letzten Zeile vom System abhängig.

■ Die Regelungsnormalform weist dasselbe Ein-/Ausgangsverhalten wie die Beobachtungsnormalform auf.

☐ Die Regelungsnormalform ist ungeeignet für numerische Methoden.

f) Welche Aussagen treffen auf die Diagonalform der Systemmatrix $\mathbf{A}$ zu?

■ Die Diagonalform von $\mathbf{A}$ wird auch Modalform genannt.

☐ Eine Transformation der Systemmatrix $\mathbf{A}$ in Diagonalform ist immer möglich.

■ Die Diagonalelemente von $\mathbf{A}$ sind gleichzeitig die Eigenwerte λ_i von $\mathbf{A}$.

g) Was gilt für die Zustände eines dynamischen Systems?

☐ Es gibt nur eine beschränkte Anzahl von Wahlmöglichkeiten für den Zustandsvektor, damit dasselbe Ein-/Ausgangsverhalten erreicht wird.

■ Der Zustandsvektor kann mehr Elemente enthalten als nötig.

■ Im Zustandsvektor muss alle innere Information über das System enthalten sein.

h) Welche Eigenschaften weisen Zustandsraummethoden im Allgemeinen auf?

■ Eine DGL n. Ordnung kann zu einem System aus n DGLs jeweils 1. Ordnung umformuliert werden.

☐ Zustandsraummethoden sind ausschließlich für lineare Systeme geeignet.

☐ Zustandsraummethoden sind ausschließlich für Eingrößensysteme geeignet.

i) Wie lautet die **ideale** Vorsteuerung für die Strecke $G(s) = \frac{1}{(s+1)^2} \cdot e^{-2s}$?

■ $(s+1)^2 \cdot e^{2s}$

□ $(s+1)^2$

□ $(s+1)^2 \cdot e^{-2s}$

j) Wie lautet eine **realisierbare** Vorsteuerung für $G(s) = \frac{1}{(s+1)^2} \cdot e^{-2s}$, wenn der zukünftige Verlauf der Führungsgröße unbekannt ist?

□ $(s+1)^2$

■ $\left(\frac{s+1}{1+Ts}\right)^2$

□ $\frac{(s+1)^2}{(1+Ts)^2} \cdot e^{2s}$

k) Was ist der Zweck der Entkopplung eines Mehrgrößenregelkreises?

■ Die Umwandlung des gekoppelten Regelkreises in mehrere voneinander unabhängige Regelkreise.

■ Die Verwendung der bekannten Reglerentwurfsmethoden für einschleifige Regelkreise zu ermöglichen.

□ Die Entkopplung verhindert, dass sich Störungen auf die Regelgröße auswirken.

l) Was ist eine Kaskadenregelung?

■ Eine Regelung, die aus einem inneren und mindestens einem umschließenden äußeren Regelkreis besteht.

□ Eine Reihenschaltung zweier Regelkreise.

■ Eine insbesondere in der Antriebstechnik sehr häufig verwendete Reglerstruktur.

$\boxed{\sum 20}$

Aufgabe 4: Kaskadenregelung und Störgrößenaufschaltung

a) Mit Hilfe der Gleichung für die Kreisschaltung berechnet man zunächst die Übertragungsfunktion des inneren Regelkreises $G_{IR}(s)$:

$$G_{IR}(s) = \frac{\frac{4G_{R2}(s)}{s+2}}{1 + \frac{4G_{R2}(s)}{s+2}} = \frac{4G_{R2}(s)}{s+2+4G_{R2}(s)}$$

b) Aus dem Blockschaltbild liest man ab:

$$Y(s) = \left(\left(W(s) - Y(s)\right) G_{R1}G_{IR}(s) + Z(s)\right) \frac{1}{s}$$

Einsetzen von G_{IR} und auflösen nach $Y(s)$ ergibt:

$$Y(s) = \boxed{\underbrace{\frac{4G_{R1}G_{R2}}{s^2 + (2+4G_{R2})s + 4G_{R1}G_{R2}}}_{G_W(s)}} \cdot W(s) + \boxed{\underbrace{\frac{s+2+4G_{R2}}{s^2 + (2+4G_{R2})s + 4G_{R1}G_{R2}}}_{G_Z(s)}} \cdot Z(s)$$

$\boxed{5}$

c) Der Endwertsatz für die Sprungantwort $h(t \to \infty) = \lim_{s\to 0} G_W(s)$ führt auf:

$$h(t \to \infty) = \frac{4G_{R1}G_{R2}}{0 + 0 + 4G_{R1}G_{R2}} = 1 \Rightarrow \boxed{e(t \to \infty) = 0}$$ 2

d) Mit $G_{R1}(s) = K_{PI}\frac{T_n s+1}{T_n s}$ und $G_{R2}(s) = K_P$ ergibt sich für das Störverhalten:

$$G_Z(s) = \frac{s + 2 + 4K_P}{s^2 + (2 + 4K_P)s + 4K_P K_{PI}\frac{T_n s+1}{T_n s}}$$

$$\Leftrightarrow G_Z(s) = \frac{s(s + 2 + 4K_P)}{s^3 + (2 + 4K_P)s^2 + 4K_P K_{PI}s + \frac{4K_P K_{PI}}{T_n}}$$

Der Endwertsatz für einen Störsprung ergibt:

$$h(t \to \infty) = \lim_{s\to 0} G_Z(s) = \frac{0 \cdot (0 + 2 + 4K_P)}{0 + 0 + 0 + \frac{4K_P K_{PI}}{T_n}} = 0 \Rightarrow \boxed{e(t \to \infty) = 0}$$ 4

e) Die Störung wird vom inneren Regelkreis nicht erfasst, daher muss sie mit Hilfe des äußeren Reglers G_{R1} ausgeregelt werden. Das Innere-Modell-Prinzip fordert, dass die Übertragungsfunktion der Störung am Ausgang im offenen Regelkreis enthalten sein muss. Verlegt man die Störung an den Ausgang ergibt sich doppeltes I-Verhalten. Die äußere Regelstrecke hat nur einfaches I-Verhalten, der innere Regelkreis P-Verhalten, deshalb muss der äußere Regler ebenfalls I-Verhalten aufweisen, um insgesamt doppeltes I-Verhalten zu erzeugen. 2

f) Aus dem Blockschaltbild liest man ab:

$$Z(s) - G_A(s)G_{IR}Z(s) = 0 \Leftrightarrow G_A(s) = \frac{1}{G_{IR}} \Rightarrow \boxed{= \frac{s + 2 + 4K_P(s)}{4K_P(s)}}$$ 3

$G_A(s)$ ist nicht realisierbar, da die Zählerordnung ($m = 1$) größer als die Nennerordnung ($n = 0$) ist. Mögliche Näherungslösungen mit $n = m$:

$$G_A(s) \approx \lim_{s\to 0} G_A(s) \Rightarrow \boxed{G_A \approx \frac{1}{2K_P}}$$ **statische Aufschaltung** ($n = m = 0$)

$$\boxed{G_A(s) \approx \frac{s + 2}{4K_P(1 + Ts)}, \quad T \ll 1}$$ **dynamische Aufschaltung** ($n = m = 1$) 2

g) Polvorgabe:

$$(s + 1)^3 = s^3 + 3s^2 + 3s + 1 = 0$$ 1

Die charakteristische Gleichung lautet:

$$s^3 + (2 + 4K_P)s^2 + 4K_P K_{PI}s + \frac{4K_P K_{PI}}{T_n} = 0$$ 1

Der Koeffizientenvergleich ergibt:

$$2 + 4K_p = 3 \Leftrightarrow \boxed{K_p = \frac{1}{4}}, \qquad 4K_p K_{PI} = 3 \Rightarrow 4 \cdot \frac{1}{4}K_{PI} = 3 \Leftrightarrow \boxed{K_{PI} = 3}$$ 6

$$\frac{4K_P K_{PI}}{T_n} = 1 \Rightarrow \frac{4 \cdot \frac{1}{4} \cdot 3}{T_n} = 1 \Leftrightarrow \boxed{T_n = 3}$$

$\sum 30$