Prüfungsklausur Mess- und Regelungstechnik 2 (MRT2)

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

27. Juli 2009

Name:	Punkte	A1	A2	A3	A4	Ges.
Mat.-Nr.:	Soll:	20	29	-	-	100
Note:	Ist:					

Aufgabe 1: Lösung 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) Der Smith-Prädiktor wird angewendet, um ...
- ☐ die Totzeit einer Strecke zu eliminieren.
- ☐ den Reglerentwurf einer Strecke mit Totzeit zu vereinfachen.
- ☐ die Phase im Frequenzgang anzuheben, wenn die Strecke eine Totzeit besitzt.

b) Für eine gegebene Strecke $G_S(s) = \frac{3}{(1+4s)(1+5s)}\, e^{-2s}$ ...
- ☐ ist die Steuerung $G_R(s) = \frac{(1+4s)(1+5s)}{3}\, e^{2s}$ ideal.
- ☐ ist die Steuerung $G_R(s) = \frac{(1+4s)(1+5s)}{3}\, \frac{1}{(1+T\,s)^2}$ realisierbar.
- ☐ ist die Steuerung $G_R(s) = \frac{(1+4s)(1+5s)}{3}\, e^{2s}$ ideal und realisierbar.

c) Für nichtlineare Systeme ...
- ☐ gilt im Allgemeinen das Verstärkungsprinzip.
- ☐ gilt im Allgemeinen das Superpositionsprinzip nicht.
- ☐ gibt es keine geschlossene Theorie, so wie für lineare Systeme.

d) Welche Eigenschaften hat eine Störgrößenaufschaltung?

- ☐ Je geringer die Verzögerung ist, mit der eine Störung auf die Regelgröße einwirkt, um so schwieriger ist es, sie zu kompensieren.
- ☐ Eine Störgrößenaufschaltung ist nur möglich, wenn die Störgröße gemessen werden kann.
- ☐ Eine Störgrößenaufschaltung ist möglich, auch wenn die Störgröße nicht gemessen werden kann.

e) Zu den Vorteilen des Zustandsreglers zählt:

- ☐ Die erreichbare Regelgüte ist sehr hoch.
- ☐ Die Lage aller Pole kann beliebig verschoben werden, auch wenn das System nicht steuerbar ist.
- ☐ Reglerparameter können im Allgemeinen einfach interpretiert werden.

f) Welche der folgenden Aussagen über Rückkopplung ist korrekt?

- ☐ Rückkopplung wirkt nur im Mitkopplungsbereich.
- ☐ Durch Rückkopplung können alle idealen Regler realisiert werden.
- ☐ Im Mitkopplungsbereich werden Störungen verstärkt.

g) Zu den Eigenschaften des optimalen Zustandsreglers zählen:

- ☐ Es müssen alle Zustände gemessen werden.
- ☐ Der Regler hat einen Phasenrand von maximal 60°.
- ☐ Der Regler hat PD_{n-1}-Verhalten.

h) Zu den Eigenschaften der Kaskadenregelung zählt, dass ...

- ☐ nur der äußerste Regelkreis aggressiv ausgelegt sein muss, damit ein schnelles Regelverhalten möglich ist.
- ☐ jeder innere Regelkreis einen I-Anteil aufweisen muss, damit eine bleibende Regelabweichung verhindert wird.
- ☐ der Entwurf eines inneren Reglers darüber entscheidet, wie schwierig die Regelaufgabe für den nächst äußeren Regelkreis wird.

i) Beim Umschalten zwischen zwei Reglern wünscht man sich ein stoßfreies Umschalten. Das bedeutet, im Moment des Umschaltens ...

- ☐ soll die Stellgröße möglichst gleich bleiben.
- ☐ soll die Stellgröße einen Sprung mit einer definierten Höhe machen.
- ☐ wird eine Stellgrößenbeschränkung ignoriert.

j) Welche Eigenschaften weisen Zustandsraummethoden im Allgemeinen auf?

- ☐ Zustandsraummethoden sind ausschließlich für zeitvariante Systeme geeignet.
- ☐ Ein mathematisches Modell der Regelstrecke ist erforderlich.
- ☐ Mehrgrößensysteme sind übersichtlich darstellbar.

k) Welche Aussagen treffen auf die Diagonalform der Systemmatrix **A** zu?

- ☐ Das entsprechende System liegt in Modalform vor.
- ☐ Eine Transformation der Systemmatrix **A** in Diagonalform ist nicht immer möglich.
- ☐ Die Diagonalelemente von **A** sind niemals die Eigenwerte λ_i von **A**.

l) Welche Eigenschaften besitzt eine prädiktive Regelung?

- ☐ Aus der Optimierung ergibt sich automatisch eine Kombination von Vorsteuerung und Regelung.
- ☐ Auch bei Optimierung eines nichtlinearen Systems ist das Finden eines globalen Optimums sichergestellt.
- ☐ Es wird keine Reglerstruktur vorgegeben.

m) Welche dieser Systeme sind linear?

- ☐ Lose
- ☐ Hysterese
- ☐ Totzeit

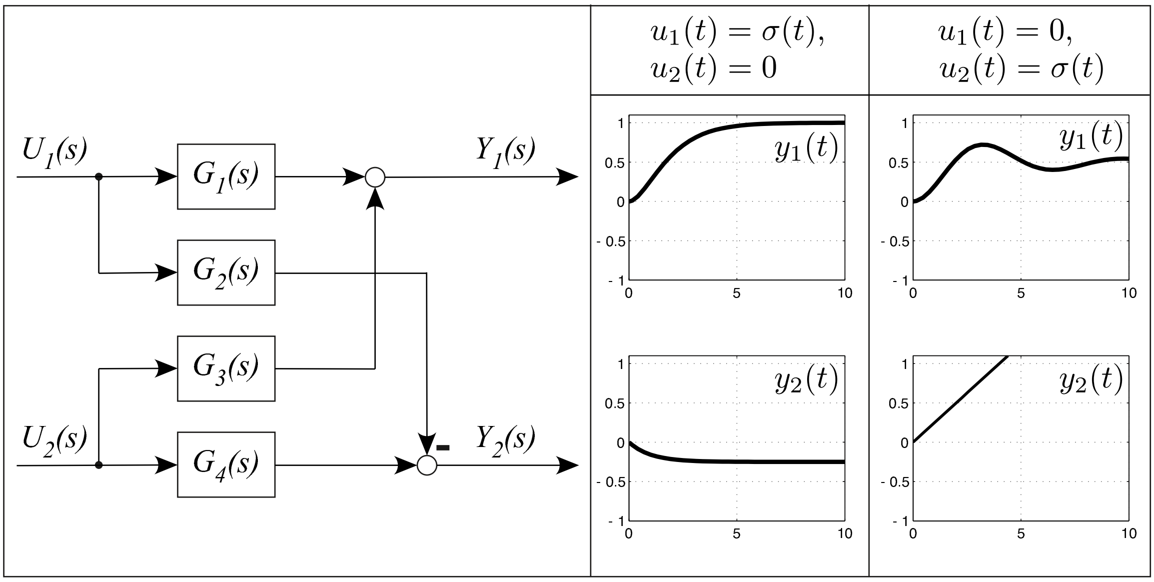
Aufgabe 2: Mehrschleifige Regelkreise

Hinweis: Alle drei Unteraufgaben sind unabhängig voneinander lösbar!

a) Eine Regelstrecke mit 2 Eingängen (u_1, u_2) und 2 Ausgängen (y_1, y_2) besteht aus 4 Übertragungsfunktionen (G_1 bis G_4). Diese Übertragungsfunktionen lauten:

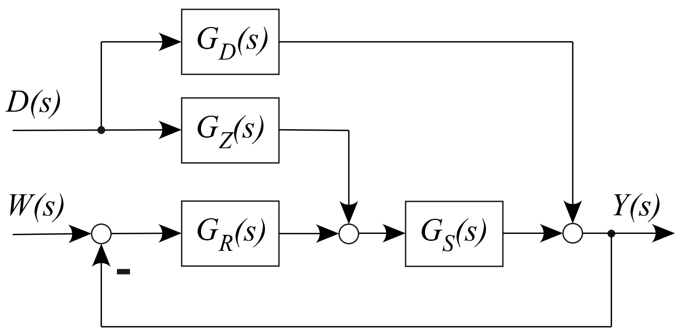
$$\frac{0{,}5}{s^2+0{,}5s+1}, \quad \frac{1}{(s+1)^2}, \quad \frac{0{,}25}{s}, \quad \frac{0{,}25}{s+1}$$

Weiterhin sind die Verläufe der Ausgangsgrößen $y_1(t)$ und $y_2(t)$ für 2 verschiedene Eingangsgrößenkombinationen angegeben. Die Strecke wird einmal nur über u_1 und einmal nur über u_2 wird mit einem Einheitssprung angeregt.



Ordnen Sie mit Hilfe der Zeitverläufe der Ausgangsgrößen die gegebenen 4 Übertragungsfunktionen den Blöcken G_1, G_2, G_3 und G_4 im Schaltbild zu und begründen Sie kurz Ihre Wahl!

b) Gegeben ist ein Regelkreis mit Störgrößenaufschaltung. Lesen Sie an Hand des Blockschaltbildes die Übertragungsfunktion der Störgrößenaufschaltung G_Z ab, die nötig ist, um die Störgröße vollständig zu kompensieren (keine Berechnung der Störübertragungsfunktion des Regelkreises nötig)!

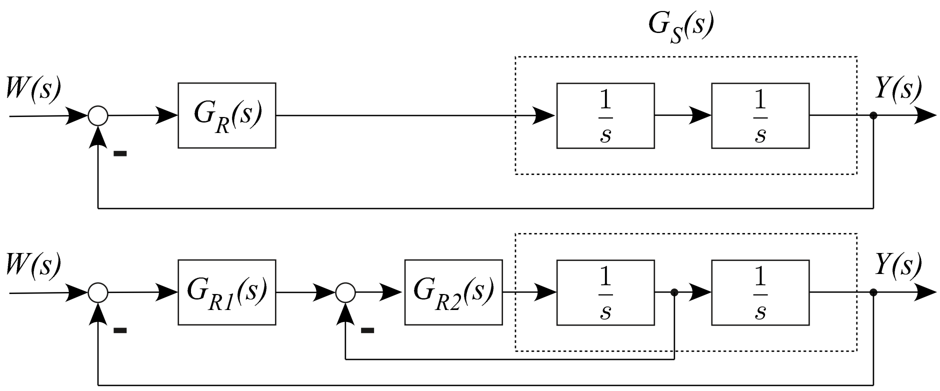


Die Übertragungsfunktionen der Regelstrecke $G_S(s)$ und der Störung $G_D(s)$ lauten:

$$G_S(s) = \frac{1}{s^2 + 4s + 4}, \quad G_D(s) = \frac{1}{s+1}$$

Zeigen Sie, dass die Störgrößenaufschaltung $G_Z(s)$ nicht realisierbar ist und schlagen Sie eine statische und eine näherungsweise dynamische Aufschaltung vor, die sich realisieren lässt!

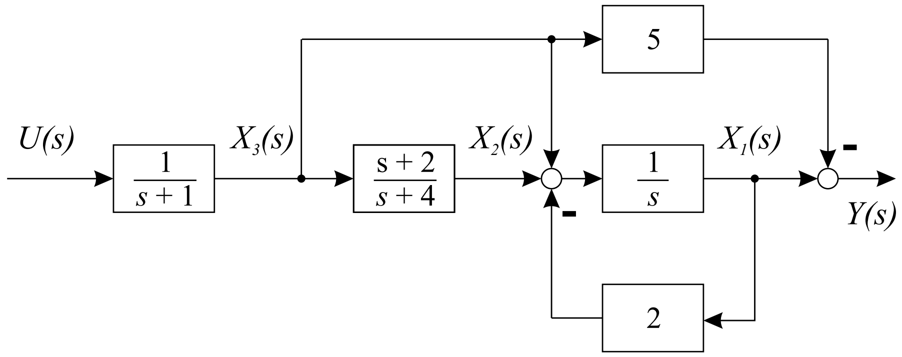
c) Es soll eine zweifach integrierende Regelstrecke $G_S(s)$ mit P-Reglern $G_{Ri}(s) = K_i$ geregelt werden. Zeigen Sie, dass sich mit dem einschleifigen Regelkreis (oberes Blockschaltbild) die Regelstrecke mit einem P-Regler $G_R = K$ nicht stabilisieren lässt!



Betrachten Sie nun den zweischleifigen Regelkreis (unteres Blockschaltbild). Wie bezeichnet man die hier verwendete Regelkreisstruktur? Zeigen Sie, dass nun eine Stabilisierung mit zwei P-Reglern möglich ist und dass unabhängig von der Wahl von K_1 und K_2 der Regelfehler für $t \to \infty$ verschwindet (Stabilität vorausgesetzt).

Aufgabe 3: Zustandsgleichungen

Gegeben sei das Blockschaltbild einer Regelstrecke im Bildbereich.



a) Leiten Sie die Zustandsgleichungen im Zeitbereich her. Ermitteln Sie $\mathbf{A}$, $\mathbf{b}$ und $\mathbf{c}^T$.

b) Gehen Sie nun von einem in die Modalform transformierten System aus. Die Zustandsgleichungen lauten:

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \begin{bmatrix} -2 & 0 & 0 \\ 0 & -4 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \mathbf{x}(t) + \begin{bmatrix} -0.5 \\ 0.4 \\ 2 \end{bmatrix} u(t), \qquad \mathbf{y}(t) = \begin{bmatrix} 2 & -1 & -2 \end{bmatrix} \mathbf{x}(t)$$

Ermitteln Sie die Pole des Systems. Treffen Sie begründete Aussagen zur Stabilität.

c) Welche Vorteile ergeben sich durch die vorliegende Modalform der Zustandsgleichungen?

Aufgabe 4: Zustandsbeobachter

Gegeben ist folgende Regelstrecke in Zustandsform:

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

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

b) Entwerfen Sie einen Zustandsbeobachter $\mathbf{l} = \begin{bmatrix} l_1 \\ l_2 \end{bmatrix}$ derart, dass alle Eigenwerte (Pole) des Beobachters bei $s = -5$ liegen.

c) Ist das System noch vollständig zustandsbeobachtbar, wenn statt Zustand $x_1(t)$ der Zustand $x_2(t)$ gemessen wird? Begründen Sie Ihre Aussage.

d) Vervollständigen Sie das vorgegebene Blockschaltbild, so dass sich ein Zustandsregler mit Beobachter ergibt. Beschriften Sie außerdem jeden Pfeil mit der zugehörigen Signalbezeichnung.
(**Hinweis**: Dieser Aufgabenteil kann unabhängig von den anderen Teilaufgaben bearbeitet werden.)

Lösungen:

Aufgabe 1: Lösung Verständnisfragen

a) Der Smith-Prädiktor wird angewendet, um ...

- ☐ die Totzeit einer Strecke zu eliminieren.
- ■ den Reglerentwurf einer Strecke mit Totzeit zu vereinfachen.
- ☐ die Phase im Frequenzgang anzuheben, wenn die Strecke eine Totzeit besitzt.

b) Für eine gegebene Strecke $G_S(s) = \frac{3}{(1+4s)(1+5s)}\, e^{-2s}$ ...

- ■ ist die Steuerung $G_R(s) = \frac{(1+4s)(1+5s)}{3}\, e^{2s}$ ideal.
- ■ ist die Steuerung $G_R(s) = \frac{(1+4s)(1+5s)}{3} \frac{1}{(1+T\,s)^2}$ realisierbar.
- ☐ ist die Steuerung $G_R(s) = \frac{(1+4s)(1+5s)}{3}\, e^{2s}$ ideal und realisierbar.

c) Für nichtlineare Systeme ...

- ☐ gilt im Allgemeinen das Verstärkungsprinzip.
- ■ gilt im Allgemeinen das Superpositionsprinzip nicht.
- ■ gibt es keine geschlossene Theorie, so wie für lineare Systeme.

d) Welche Eigenschaften hat eine Störgrößenaufschaltung?

- ■ Je geringer die Verzögerung ist, mit der eine Störung auf die Regelgröße einwirkt, um so schwieriger ist es, sie zu kompensieren.
- ■ Eine Störgrößenaufschaltung ist nur möglich, wenn die Störgröße gemessen werden kann.
- ☐ Eine Störgrößenaufschaltung ist möglich, auch wenn die Störgröße nicht gemessen werden kann.

e) Zu den Vorteilen des Zustandsreglers zählt:

- ■ Die erreichbare Regelgüte ist sehr hoch.
- ☐ Die Lage aller Pole kann beliebig verschoben werden, auch wenn das System nicht steuerbar ist.
- ☐ Reglerparameter können im Allgemeinen einfach interpretiert werden.

f) Welche der folgenden Aussagen über Rückkopplung ist korrekt?

- ☐ Rückkopplung wirkt nur im Mitkopplungsbereich.
- ☐ Durch Rückkopplung können alle idealen Regler realisiert werden.
- ■ Im Mitkopplungsbereich werden Störungen verstärkt.

g) Zu den Eigenschaften des optimalen Zustandsreglers zählen:

■ Es müssen alle Zustände gemessen werden.

☐ Der Regler hat einen Phasenrand von maximal 60°.

■ Der Regler hat PD_{n-1}-Verhalten.

h) Zu den Eigenschaften der Kaskadenregelung zählt, dass ...

☐ nur der äußerste Regelkreis aggressiv ausgelegt sein muss, damit ein schnelles Regelverhalten möglich ist.

☐ jeder innere Regelkreis einen I-Anteil aufweisen muss, damit eine bleibende Regelabweichung verhindert wird.

■ der Entwurf eines inneren Reglers darüber entscheidet, wie schwierig die Regelaufgabe für den nächst äußeren Regelkreis wird.

i) Beim Umschalten zwischen zwei Reglern wünscht man sich ein stoßfreies Umschalten. Das bedeutet, im Moment des Umschaltens ...

■ soll die Stellgröße möglichst gleich bleiben.

☐ soll die Stellgröße einen Sprung mit einer definierten Höhe machen.

☐ wird eine Stellgrößenbeschränkung ignoriert.

j) Welche Eigenschaften weisen Zustandsraummethoden im Allgemeinen auf?

☐ Zustandsraummethoden sind ausschließlich für zeitvariante Systeme geeignet.

■ Ein mathematisches Modell der Regelstrecke ist erforderlich.

■ Mehrgrößensysteme sind übersichtlich darstellbar.

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

■ Das entsprechende System liegt in Modalform vor.

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

☐ Die Diagonalelemente von $\mathbf{A}$ sind niemals die Eigenwerte λ_i von $\mathbf{A}$.

l) Welche Eigenschaften besitzt eine prädiktive Regelung?

■ Aus der Optimierung ergibt sich automatisch eine Kombination von Vorsteuerung und Regelung.

☐ Auch bei Optimierung eines nichtlinearen Systems ist das Finden eines globalen Optimums sichergestellt.

■ Es wird keine Reglerstruktur vorgegeben.

m) Welche dieser Systeme sind linear?

☐ Lose

☐ Hysterese

■ Totzeit

Aufgabe 2: Mehrschleifige Regelkreise

a) Die korrekten Zuordnungen lauten:

$$G_1(s) = \frac{1}{(s+1)^2}, \quad G_2(s) = \frac{0{,}25}{s+1}, \quad G_3(s) = \frac{0{,}5}{s^2+0{,}5s+1}, \quad G_4(s) = \frac{0{,}25}{s}$$ 8

Begründungen:
Wenn die Regelstrecke nur über u_1 angeregt wird ($u_1(t) = \sigma(t)$ und $u_2(t) = 0$), kann am Ausgang y_1 die Spungantwort von G_1 und am Ausgang y_2 die Sprungantwort von G_2 abgelesen werden. Zum Zeitverlauf von y_1 passt eine Übertragungsfunktion eines nicht schwingungsfähigen Systems 2. Ordnung (Verlauf hat einen Wendepunkt) mit Verstärkung 1. Ausgang y_2 zeigt den typischen Verlauf eines Verzögerungsgliedes mit der Verstärkung 0,25.

Anderenfalls ($u_1(t) = 0$ und $u_2(t) = \sigma(t)$), kann am Ausgang y_1 die Spungantwort von G_3 und am Ausgang y_2 die Sprungantwort von G_4 abgelesen werden. Zum Zeitverlauf von y_1 gehört die Übertragungsfunktion eines schwingungsfähigen Systems ($D = 0{,}25 < 1$) mit der Verstärkung 0,5. Ausgang y_2 zeigt den Verlauf eines Integrators.

b) Aus dem Blockschaltbild kann man aus den Pfaden der Störung und der Störgrößenaufschaltung die Bedingung für die Störgrößenkompensation direkt ablesen:

$$G_D(s) \cdot D(s) + G_Z(s) \cdot G_S(s) \cdot D(s) = 0 \Leftrightarrow \boxed{G_Z(s) = \frac{-G_D(s)}{G_S(s)}}$$ 3

Mit den gegebenen Übertragungsfunktionen ergibt sich:

$$G_Z(s) = \frac{-\frac{1}{s+1}}{\frac{1}{s^2+4s+4}} = -\frac{s^2+4s+4}{s+1} \Rightarrow \boxed{n < m, \text{ nicht realisierbar}}$$ 2

Die Nennerordnung ($n = 1$) ist kleiner als die Zählerordnung ($m = 2$), daher ist die Störgrößenaufschaltung nicht realisierbar. Für eine statische Aufschaltung wird die Übertragungsfunktion durch ihren stationären Endwert ersetzt:

$$\tilde{G}_Z(s) = \lim_{s\to 0} G_Z(s) = -\frac{0^2+4\cdot 0+4}{0+1} \Rightarrow \boxed{\tilde{G}_Z(s) = -4}$$ 2

Für die näherungsweise dynamische Aufschaltung muss durch Zufügen mindestens eines Poles $n \geq m$ erreicht werden, ohne dass sich die Verstärkung von G_Z ändert, zB.:

$$\boxed{\tilde{G}_Z(s) = -\frac{s^2+4s+4}{(s+1)(1+Ts)}}$$ 2

Für T wird ein möglichst kleiner positiver Wert gewählt.

c) Für den einschleifigen Regelkreis ergibt sich:

$$G_W(s) = \frac{Y(s)}{W(s)} = \frac{K/s^2}{1+K/s^2} = \frac{K}{s^2+K} \Rightarrow s_{1,2} = \pm\sqrt{K}\cdot i \Rightarrow \boxed{\text{grenzstabil für alle } K}$$ 3

G_W hat für alle K nur Pole auf der Imaginärachse, daher kann das System nicht stabilisiert werden.

Der zweischleifige Regelkreis hat ineinander geschachtelte Regelkreise, dies bezeichnet man als **Kaskadenregelung**. Zur Berechnung von G_W wird zunächst die Übertragungsfunktion des inneren Regelkreises G_{Wi} bestimmt: $\boxed{1}$

$$G_{Wi}(s) = \frac{K_2/s}{1 + K_2/s} = \frac{K_2}{s + K_2}$$

Damit kann nun der äußere Regelkreis bestimmt werden:

$$G_W(s) = \frac{K_1 G_{Wi}/s}{1 + K_1 G_{Wi}/s} = \frac{\frac{K_1 K_2}{s(s+K_2)}}{1 + \frac{K_1 K_2}{s(s+K_2)}} = \frac{K_1 K_2}{s^2 + K_2 s + K_1 K_2} \qquad \boxed{4}$$

Durch die zwei Reglerparameter K_1 und K_2 können nun die zwei Pole von G_W beliebig vorgegeben werden. d.h der geschlossene Regelkreis ist stabilisierbar. $\boxed{2}$

Für alle stabilen G_W gilt unabhängig von der Wahl der Reglerparameter für die Spungantwort $h(t \to \infty)$:

$$h(t \to \infty) = \lim_{s \to 0} G_W(s) = \frac{K_1 K_2}{0^2 + K_2 \cdot 0 + K_1 K_2} = 1 \qquad \boxed{2}$$

Damit gilt $y(t \to \infty) = w(t \to \infty)$, d.h. der Regelfehler verschwindet. $\boxed{\sum 29}$

Aufgabe 3: Zustandsgleichungen

a) Zustandsgleichungen herleiten:
Zustandsgleichungen im Bildbereich:

$$X_1(s) = \frac{1}{s}\left(-2X_1(s) + X_2(s) + X_3(s)\right) \quad \Leftrightarrow \quad \underline{sX_1(s) = -2X_1(s) + X_2(s) + X_3(s)} \quad \boxed{1}$$

$$X_2(s) = \frac{s+2}{s+4}X_3(s) \quad \Leftrightarrow \quad sX_2(s) = -4X_2(s) + sX_3(s) + 2X_3(s)$$

$$X_3(s) = \frac{1}{s+1}U(s) \quad \Leftrightarrow \quad \underline{sX_3(s) = -X_3(s) + U(s)} \quad \boxed{1}$$

$$\Leftrightarrow \quad \underline{sX_2(s) = -4X_2(s) + 3X_3(s) + U(s)} \quad \boxed{1}$$

$$\underline{Y(s) = X_1(s) - 5X_3(s)} \quad \boxed{1}$$

Zustandsgleichungen im Zeitbereich:

$$\dot{x}_1(t) = -2x_1(t) + x_2(t) + x_3(t) \quad \boxed{1}$$

$$\dot{x}_2(t) = -4x_2(t) + x_3(t) + u(t) \quad \boxed{1}$$

$$\dot{x}_3(t) = -x_3(t) + u(t) \quad \boxed{1}$$

$$y(t) = x_1(t) - 5x_3(t) \quad \boxed{1}$$

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \underbrace{\begin{bmatrix} -2 & 1 & 1 \\ 0 & -4 & 1 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}}_{\mathbf{A}} \mathbf{x}(t) + \underbrace{\begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix}}_{\mathbf{b}} u(t), \qquad \mathbf{y}(t) = \underbrace{\begin{bmatrix} 1 & 0 & -5 \end{bmatrix}}_{\mathbf{c}^T} \mathbf{x}(t) \quad \boxed{4}$$

b) Pole und Stabilität: Die Pole lassen sich dank der Modalform direkt anhand der Hauptdiagonalen der Matrix **A** ablesen: $s_1 = -2, s_2 = -4, s_3 = -1$.
Das System ist **stabil**, da sich alle Pole in der linken s-Halbebene befinden. $\boxed{2}$

c) Vorteile der Modalform: Die Zustandsgleichungen sind in der Modalform voneinander **entkoppelt**. Weiterhin bietet die **Diagonalform** von **A** Vorteile, z.B. bezüglich Rechenaufwand, Übersichtlichkeit, bessere Lösbarkeit der DGL, etc.. $\boxed{2}$

$\boxed{\sum 16}$

Aufgabe 4: Zustandsbeobachter

a) Zustandsbeobachtbarkeit:

Beobachtbarkeitsmatrix $\mathbf{S}_B = \begin{bmatrix} \mathbf{c}^T \\ \mathbf{c}^T \cdot \mathbf{A} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{c}^T = [1 \;\; 0]$

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

Das System ist **vollständig zustandsbeobachtbar**. 1

b) Beobachterentwurf:

$\det[s\mathbf{I} - \mathbf{A} + \mathbf{l} \cdot \mathbf{c}^T] = \begin{vmatrix} s+2+l_1 & -1 \\ l_2 & s+4 \end{vmatrix} = (s+2+l_1) \cdot (s+4) + l_2 = 0$ 2

$\Rightarrow s^2 + (6+l_1)s + (8+4l_1+l_2) = 0$

Vorgabe: alle Pole bei -5 $\Rightarrow (s+5)^2 = s^2 + 10s + 25$ 1

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

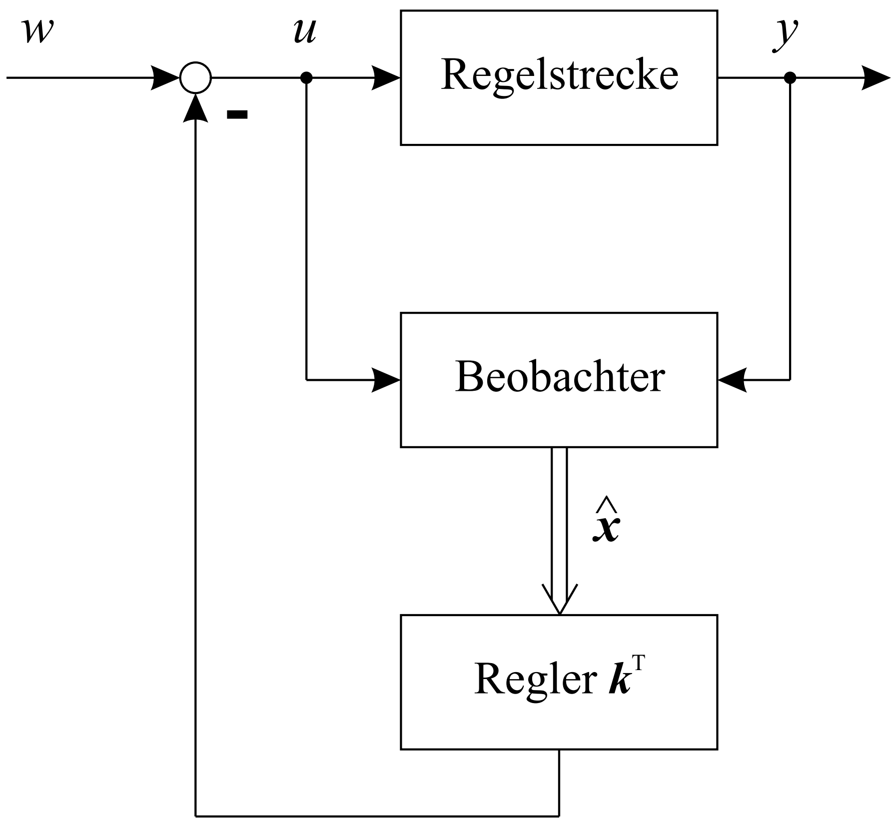
c) Zustandsbeobachtbarkeit bei Messung von Zustand $x_2(t)$:

Beobachtbarkeitsmatrix $\mathbf{S}_B = \begin{bmatrix} \mathbf{c}^T \\ \mathbf{c}^T \cdot \mathbf{A} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{c}^T = [0 \;\; 1]$

$\mathbf{S}_B = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -4 \end{bmatrix} \quad \Rightarrow \quad \det[\mathbf{S}_B] = 0 \quad \Rightarrow \quad \text{Rang}[\mathbf{S}_B] = 1$ 2

Das System ist **nicht vollständig zustandsbeobachtbar**, wenn statt des Zustandes $x_1(t)$ der Zustand $x_2(t)$ gemessen wird. 1

d) Blockschaltbild zum Zustandsregler mit Beobachter: 4



$\sum 14$