Einlesezeit

Für die Durchsicht der Klausur wird eine „Einlesezeit“ von **10 Minuten** gewährt. Während dieser Zeitdauer ist es Ihnen **nicht** gestattet, mit der Bearbeitung der Aufgaben zu beginnen. Dies bedeutet konkret, dass sich während der gesamten Dauer der Einlesezeit keinerlei Schreibgeräte (Stifte, Füller, etc.) auf dem Tisch befinden dürfen sowie die Nutzung von mitgeführten Unterlagen respektive (elektronischer) Wörterbücher bzw. tragbarer Translater strengstens untersagt ist. Nehmen Sie Ihre Schreibgeräte und Unterlagen erst zur Hand, wenn die Prüfungsaufsicht auf das Ende der Einlesezeit hingewiesen hat und füllen Sie zunächst das Deckblatt **vollständig** aus.

Viel Erfolg!

NAME	
VORNAME	
MATRIKEL-NR.	
TISCH-NR.	

Klausurunterlagen

Ich versichere hiermit, dass ich sämtliche für die Durchführung der Klausur vorgesehenen Unterlagen erhalten, und dass ich meine Arbeit ohne fremde Hilfe und ohne Verwendung unerlaubter Hilfsmittel und sonstiger unlauterer Mittel angefertigt habe. Ich weiß, dass ein Bekanntwerden solcher Umstände auch nachträglich zum Ausschluss von der Prüfung führt. Ich versichere weiter, dass ich sämtliche mir überlassenen Arbeitsunterlagen sowie meine Lösung vollständig zurück gegeben habe. Die Abgabe meiner Arbeit wurde in der Teilnehmerliste von Aufsichtsführenden schriftlich vermerkt.

Duisburg, den __________ ____________________________________

(Unterschrift der/des Studierenden)

Falls Klausurunterlagen vorzeitig abgegeben: _______________Uhr

Bewertungstabelle

Aufgabe 1	
Aufgabe 2	
Gesamtpunktzahl	
Angepasste Punktzahl	
%	
Bewertung gem. PO in Ziffern	

____

(Datum und Unterschrift 1. Prüfer, Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dirk Söffker)

____

(Datum und Unterschrift 2. Prüfer, Dr.-Ing. Yan Liu)

____

(Datum und Unterschrift des für die Prüfung verantwortlichen Prüfers, Söffker)

Fachnote gemäß Prüfungsordnung:

☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
1,0	1,3	1,7	2,0	2,3	2,7	3,0	3,3	3,7	4,0	5,0
sehr gut		gut			befriedigend			ausreichend		mangelhaft

Bemerkung: ____

Achtung: Schreiben Sie Ihre Antwort für ALLE Aufgaben direkt unter die entsprechende Aufgabe in den Aufgabenbogen!

Verwenden Sie KEINE Bleistifte oder roten Stifte für die Beantwortung von Fragen oder für Zeichnungen!
(Rote Stifte werden bei der Korrektur verwendet.)

Diese Prüfung lege ich ab als

☐ Pflichtfach
☐ Wahlfach
☐ Auflage

(Bitte EINES ankreuzen).

Maximal erreichbare Punktzahl:	**40**
Mindestprozentzahl für die Note 1,0:	**95%**
Mindestprozentzahl für die Note 4,0:	**50%**

Allgemeine Hinweise:

1) Für die Multiple-Choice and multiple-choice-ähnlichen Fragen gilt:

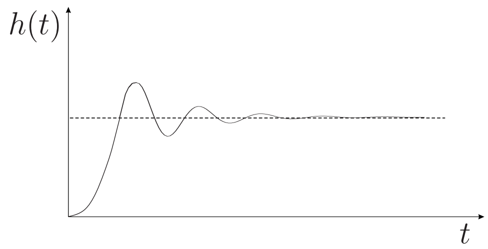
   i) Korrekte Teilantworten werden mit der vorgesehenen Teilpunktzahl bewertet.
   ii) Nichtkorrekte Teilantworten werden mit der vorgesehenen Teilpunktzahl negativ bewertet.
   iii) Keine Willensäußerung führt weder zu einer negativen noch zu einer positiven Anrechnung.
   iv) Die in einer Aufgabe anfallenden positiven wie negativen Punkte werden aufsummiert. Eine negative Gesamtpunktzahl gibt es nicht.

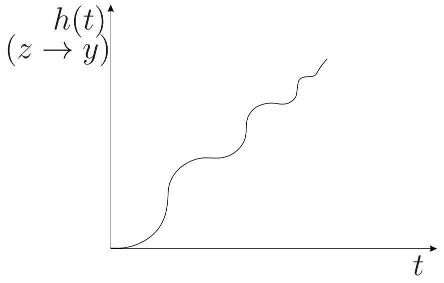
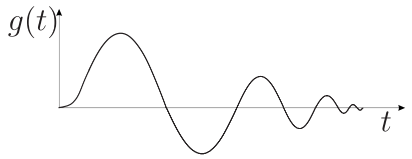
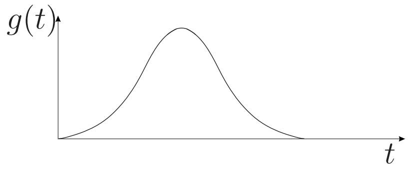
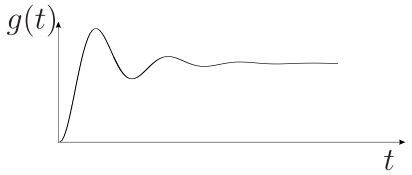
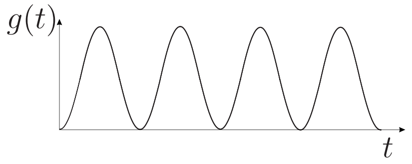
2) Sollten im Einzelfall keine zulässigen Zahlenbereiche für Zeitkonstanten, Massen etc. angegeben sein, gehen Sie immer von positiven Zahlenwerten für die Zeit und für Massen aus.

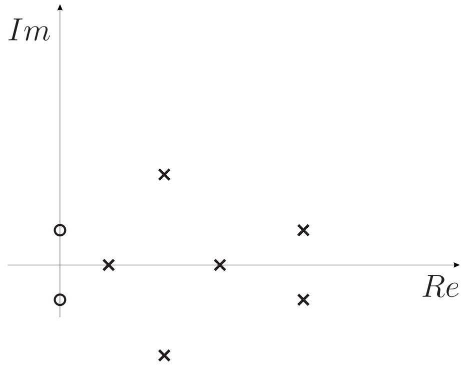
3) Sollte im Einzelfall keine Angabe zu positiver oder negativer Rückführung angegeben sein, gehen Sie immer von der üblichen negativen Rückführung aus.

Aufgabe 1 (15 Punkte)

1a) (6 Punkte)
Welche der folgenden Aussagen sind wahr und welche sind falsch? (Alle zugrundeliegenden Zusammenhänge werden im Rahmen der Veranstaltung Systemdynamik vermittelt).

Nr.	Aufgabe/Frage/Bewertung	Richtig	Falsch
1)	Bei den in der linearen Regelungstechnik betrachteten Systemen (SISO) handelt es sich um Systeme mit typischerweise max. zwei Eingängen und einem Ausgang.	⊗	○
2)	Die Führungsgröße soll der Regelungsgröße folgen.	○	⊗
3)	Steuerungen sind technisch einfacher zu realisieren als Regelungen.	⊗	○
4)	Totzeitsysteme sind typische Elemente der linearen Regelungstechnik.	○	⊗
5)	Die Dynamik eines Systems beschrieben durch eine lineare Differenzialgleichung mit konstanten Koeffizienten zeichnet sich dadurch aus, dass sich das Übertragungsverhalten dynamisch (d.h. mit der Zeit) verändert.	○	⊗
6)	Systeme zweiter Ordnung mit dem Ein-/Ausgangsverhalten $$T_2\ddot{y} + T_1\dot{y} + y = Ku$$ sind grundsätzlich und unabhängig von den Parametern $T_{1,2}$ schwingungsfähig.	○	⊗
7)	Ein System mit dem Übergangsverhalten  ist mindestens E/A-stabil.	⊗	○
8)	Die Gewichtsfunktion eines Systems lässt sich messtechnisch durch Anbringen von Gewichten an mechanischen Systemen erfassen und ist typisch für maschinenbauliche/mechanische Systeme.	○	⊗
9)	Asymptotische Stabilität nach Lyapunov lässt sich messtechnisch sehr leicht ohne Sensoren, Aktoren und Regler bestimmen (Voraussetzung: Zahl der Pole = Zahl der Eigenwerte).	⊗	○

<table>
<tr><td>10)</td><td>Ein System beschrieben durch
$$a\ddot{y} + b\dot{y} + y = K[w + \frac{1}{T_{\mathrm{I}}}\int w dt]$$
zeigt, abhängig von den Parametern a, b, K, T_{I} immer nachstehendes Störübergangsverhalten.
</td><td>○</td><td>⊗</td></tr>
<tr><td rowspan="5">11)</td><td colspan="3">Abhängig von den Parametern m, d, k kann das Übertragungssystem beschrieben durch
$$m\ddot{z} + d\dot{z} + kz = \delta(t) \text{ mit } m, d, k \geq 0$$
nachstehende Verhaltensweisen aufweisen.</td></tr>
<tr><td></td><td>⊗</td><td>○</td></tr>
<tr><td></td><td>⊗</td><td>○</td></tr>
<tr><td></td><td>○</td><td>⊗</td></tr>
<tr><td></td><td>○</td><td>⊗</td></tr>
</table>

12)	Ein System mit der nachstehenden Eigenwertverteilung ist asymptotisch stabil. 	○	$\otimes$

1b) (5 Punkte)

Geben Sie die Eigenfrequenz $\tilde{\omega}_0$ sowie die Dämpfung $\tilde{D}$ für das resultierende Übertragungssystem in Abbildung 1.1 zwischen dem Eingang u_1 und dem Ausgang f_2 an.

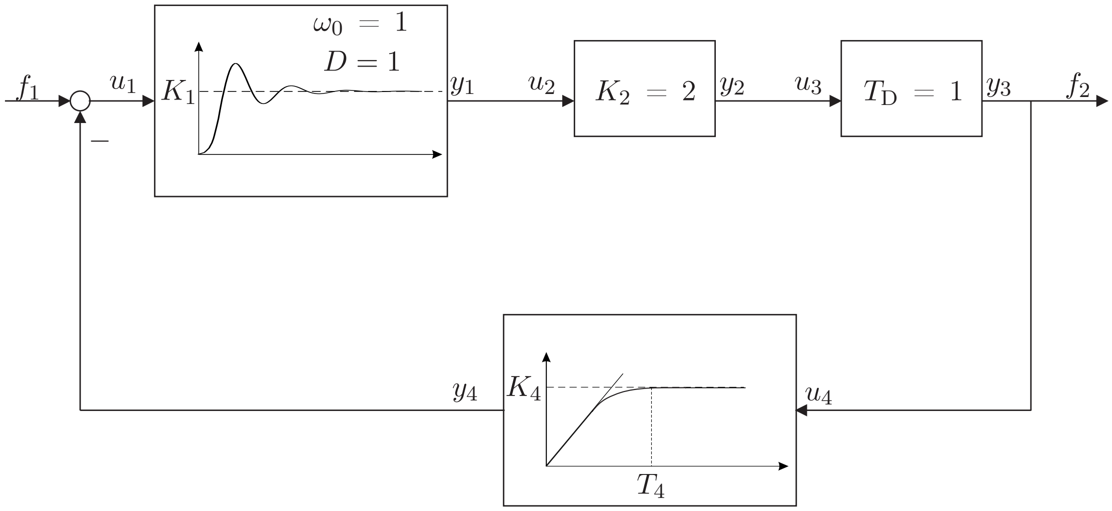


Abbildung 1.1: System

- Geben Sie die das Übertragungsverhalten des offenen Systems beschreibende Gleichung an.
- Geben Sie die das Führungsverhalten beschreibende Gleichung an ($u_4 = y_3 - w$).
- Geben Sie die das Führungs- und Störungsübertragungsverhalten des Systems beschreibende Gleichung in einer Gleichung an.

Anwort:

$$\mathrm{PT}_2 : \frac{1}{\omega_0^2}\ddot{y}_1 + \frac{2D}{\omega_0}\dot{y}_1 + y_1 = K_1 u_1 \tag{1.1}$$

$$\mathrm{P}_1 : y_2 = K_2 u_2 \tag{1.2}$$

$$\mathrm{D} : y_3 = T_D \frac{du_3}{dt} \tag{1.3}$$

$$\mathrm{PT}_1 : T_4 \dot{y}_4 + y_4 = K_4 u_4 \tag{1.4}$$

$u_2 = y_1; u_3 = y_2; y_3 = f_2$

Offenes System:

$$\text{Aus(1.3)} \Rightarrow y_3 = T_\mathrm{D}\frac{dy_2}{dt} = T_\mathrm{D}\frac{d(K_2 u_2)}{dt} = T_\mathrm{D} K_2 \frac{dy_1}{dt} \qquad \Rightarrow y_3 = T_D K_2 \dot{y}_1 \tag{1.5}$$

$$\Rightarrow \dot{y}_1 = \frac{1}{T_\mathrm{D} K_2} y_3 = \frac{1}{T_\mathrm{D} K_2} f_2 \tag{1.6}$$

$$\Rightarrow \ddot{y}_1 = \frac{1}{T_\mathrm{D} K_2} \dot{y}_3 = \frac{1}{T_\mathrm{D} K_2} \dot{f}_2 \tag{1.7}$$

$$\Rightarrow y_1 = \frac{1}{T_\mathrm{D} K_2} \int y_3 dt = \frac{1}{T_\mathrm{D} K_2} \int f_2 dt \tag{1.8}$$

(1.6),(1.7)&(1.8) in (1.1)

[redacted]

$$\Rightarrow \frac{1}{\omega_0^2 T_\mathrm{D} K_2} \ddot{f}_2 + \frac{2D}{\omega_0 T_\mathrm{D} K_2} \dot{f}_2 + \frac{1}{T_\mathrm{D} K_2} f_2 = K_1 \dot{u}_1 \tag{1.10}$$

Mit $D = \omega_0 = 1, K_2 = 2, T_\mathrm{D} = 1$

[redacted]

[redacted] $\tilde{\omega}_0 = 1$

[redacted] $\tilde{D} = 1$

Führungsverhalten : $u_1 = -y_4, u_4 = f_2 - w \Rightarrow$ in (1.4)

[redacted]

Aus (1.1)

[redacted]

Aus (1.7)

[redacted]

[redacted]

$$\frac{T_4}{2K_1}\dddot{f}_2 + \left(\frac{T_4}{K_1}+\frac{1}{2K_1}\right)\ddot{f}_2 + \left(\frac{T_4}{2K_1}+\frac{1}{K_1}+K_4\right)\dot{f}_2 + \frac{1}{2K_1}f_2 = K_4\dot{w} \quad (1.21)$$

Führungs- und Störungsverhalten: $u_1 = f_1 - y_4 \Rightarrow y_4 = f_1 - u_1, u_4 = f_2 - w$
In (1.4)

[redacted]

Aus (1.15)

[redacted]

$$\frac{T_4}{2K_1}\dddot{f}_2 + \left(\frac{T_4}{K_1}+\frac{1}{2K_1}\right)\ddot{f}_2 + \left(\frac{T_4}{2K_1}+\frac{1}{K_1}+K_4\right)\dot{f}_2 + \frac{1}{2K_1}f_2 = K_4\dot{w} + T_4\ddot{f}_1 + \dot{f}_1 \quad (1.28)$$

1c) (4 Punkte)
In der nachstehenden Abbildung sind die Eigenwerte von vier verschiedenen Systemen graphisch dargestellt. Gemessen wurden die Gewichtsfunktionen von Systemen. Beurteilen Sie die Aussagen in der nachstehenden Tabelle.

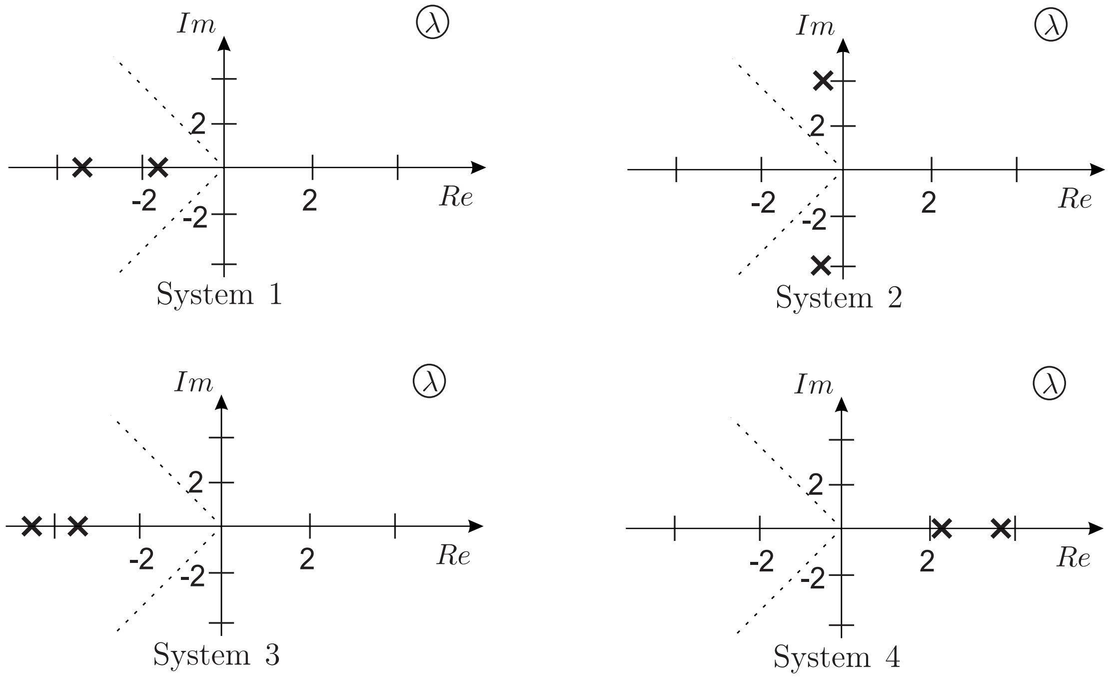


Abbildung 1.2: Eigenwertverteilungen von vier verschiedenen Systemen

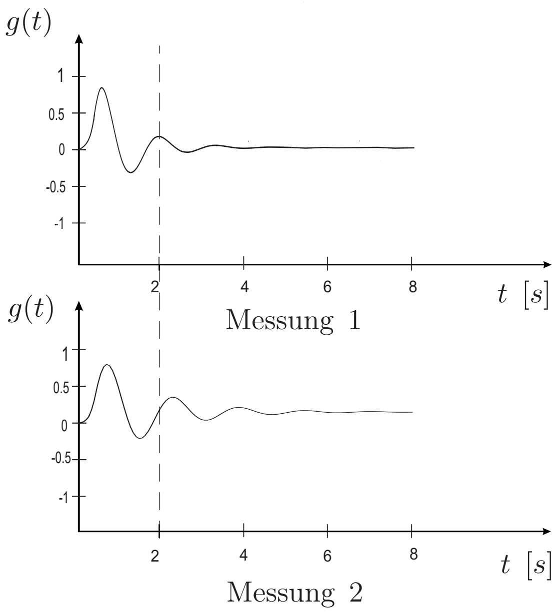


Abbildung 1.3: Messung der Gewichtsfunktionen von zwei verschiedenen Systemen

Nr.	Aufgabe/Frage/Bewertung	Richtig	Falsch
1)	Die Verteilung der Eigenwerte der Systeme 3 und 4 zeigt jeweils ein starkes Dämpfungsverhalten auf.	$\otimes$	$\bigcirc$
2)	Das System 2 zeigt ein konjugiert komplexes Eigenwertpaar. Auf Grund der schwachen Dämpfung könnte es sowohl zur Messung 1 wie auch zur Messung 2 passen.	$\otimes$	$\bigcirc$
3)	Die Messungen 1 und 2 zeigen typische Übergangsfunktionen von PT2-Systemen.	$\bigcirc$	$\otimes$
4)	Das Verhalten bei Messung 1 zeigt eine stärkere Dämpfung des Systemes als bei Messung 2.	$\otimes$	$\bigcirc$
5)	Das Verhalten bei Messung 2 zeigt eine kleinere Eigenfrequenz ω_0 des Systems.	$\otimes$	$\bigcirc$
6)	Die Systeme 1 und 2 können prinzipiell das in den Messungen 1 und 2 gezeigte Verhalten aufweisen.	$\bigcirc$	$\otimes$
7)	Auf Grund der Dämpfungswinkel $> 45°$ zeigen die Systeme 2 und 4 instabiles Verhalten.	$\bigcirc$	$\otimes$
8)	Die den Gewichtsfunktionen der Messungen 1 und 2 zugrundeliegenden Systeme sind mindestens BIBO-stabil, die für das E/A-Verhalten verantwortlichen Eigenwerte zeigen Realteile < 0 auf.	$\otimes$	$\bigcirc$

$\sum \square$

Aufgabe 2 (25 Punkte)

2a) (1.5 Punkte)
Welche der folgenden Aussagen sind wahr und welche sind falsch? (Alle zugrundeliegenden Zusammenhänge werden im Rahmen der Veranstaltung Systemdynamik vermittelt).

Nr.	Aufgabe/Frage/Bewertung	Richtig	Falsch
1)	Mit dem Faltungsintegral $$y(t) = \int_{t=0}^{t} c\phi(t-\tau)bu(\tau)d\tau + du(t)$$ lässt sich der Zeitverlauf das Ausgangs $y(t)$ bei einem Eingangssignal σ(t) berechnen.	⊗	○
2)	Die Eigenwertanalyse des durch die Systemmatrix $$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -k & -d \end{bmatrix}$$ beschriebenen Systemes zeigt, dass bei der Betrachtung des stationären Verhaltens des Systems, das Übergangsverhalten nicht vernachlässigt werden darf.	○	⊗
3)	Bei der Reglerauswahl gilt: Bei proportionalen Systemen sollte ein P-Regler, bei integralen Systemen ein PI-Regler, bei differenzierenden Systemen ein PD-Regler nach Ziegler-Nichols verwendet werden.	○	⊗

2b) (2.5 Punkte)
Das E/A-Übertragungsverhalten

$$\dddot{y} - 3\ddot{y} + 3\dot{y} - y = -30u + \dot{u} + \ddot{u}$$

weist folgende Pole

- ○ $s_{1,2} = -1 \pm j$, $s_3 = -1$
- ○ $s_{1,2} = -1$, $s_1 = -1$
- ○ $s_1 = +1$, $s_{2,3} = -1$
- ⊗ $s_{1,2,3} = 1$

auf.

Antwort: Charakteristisches Polynom:

$$s^3 - 3s^2 + 3s - 1 = 0$$

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

$s_{1,2,3} = 1$

2c) (2 Punkte)

Die Messung des Übergangsverhaltens eines offenen Regelkreises ist in nachstehender Darstellung wiedergegeben:

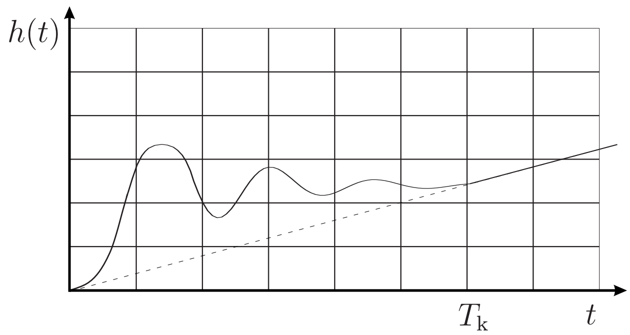


Abbildung 2.1: Offener Regelkreis

Was kann aus der Darstellung entnommen werden?

Nr.	Aufgabe/Frage/Bewertung	Richtig	Falsch
1)	Es handelt sich zweifelsfrei um ein nichtlineares System.	⊗	○
2)	Es handelt sich um ein stabiles Systemverhalten, im Fall eines linearen Systems daher um ein stabiles System.	⊗	○
3)	Bis zum Zeitpunkt $t = T_\mathrm{k}$ lässt sich das Verhalten als PT_1-Systemverhalten klassifizieren.	○	⊗
4)	Die Beschreibung als proportionales System mit parallelgeschalteten zeitverzögertem integralem System klassifiziert das System als PIT_t-System.	○	⊗

2d) (6 Punkte)

Gegeben ist das Blockschaltbild eines Systems bestehend aus vier Übertragungselementen mit u als Eingang und y als Ausgang (siehe Abbildung 2.2).

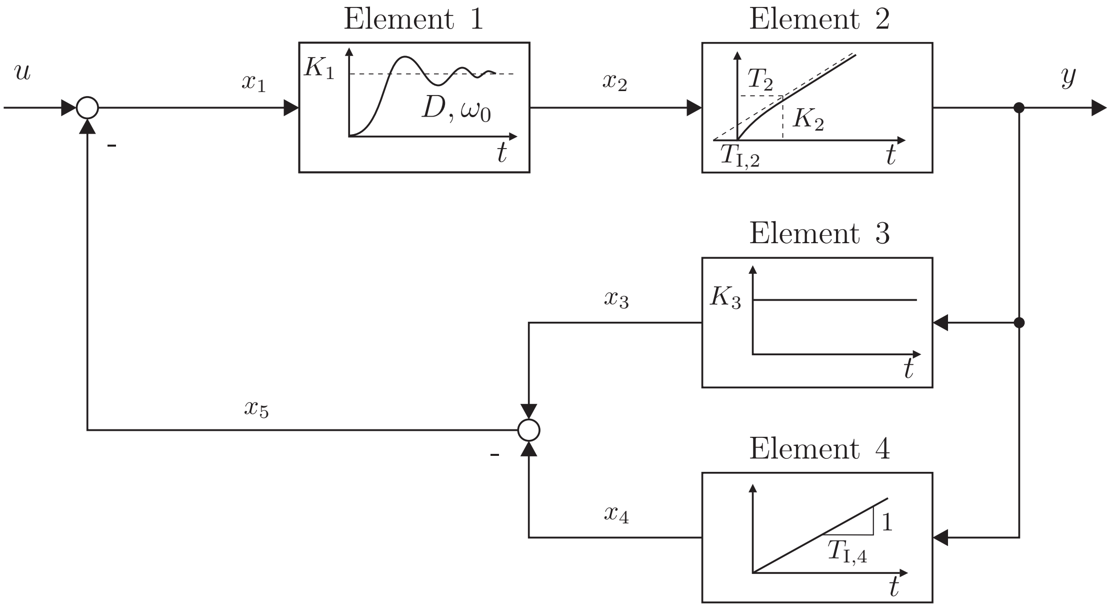


Abbildung 2.2: Blockschaltbild des Systems

i) (3 Punkte)
Fassen Sie die Elemente 3 und 4 zusammen (Typ des Einzelübertragungsverhaltens). Geben Sie die entsprechende Differenzialgleichung unter Berücksichtigung der vorgegebenen Bezeichungen in einer zur Klassifizierung geeigneten Form an. Falls eine Klassifizierung möglich ist: Um welchen Typ des $\mathrm{PIDT_nT_t}$-Verhaltens handelt es sich?

Anwort:
Element 3
P :

$$x_3 = K_3 y \tag{2.1}$$

Element 4
I :

$$x_4 = \frac{1}{T_{\mathrm{I},4}} \int y dt \tag{2.2}$$

Für Elemente 3 und 4 gilt:

$$x_5 = x_3 - x_4 \tag{2.3}$$

Aus (2.3) und (2.4)

$$x_5 = K_3 y - \frac{1}{T_{\mathrm{I},4}} \int y dt \tag{2.4}$$

⇒ PI-Verhalten.

ii) (3 Punkte)

Wieviele Energiespeicher enthält die Reihenschaltung aus den Elementen 1 und 2?
Das Systemverhalten der zusammengefassten Elemente 1 und 2 lässt sich ohne Nutzung mathematischer Gleichungen klassifizieren, betrachten sie hierzu die Zahl der Energiespeicher sowie die Wirkungskette. Wie klassifizieren Sie das resultierende Verhalten der zusammengefassten Elemente 1 und 2?

Anwort:
3 Energiespeicher
PIT_3-Verhalten

2e) (4 Punkte)
Das mathematische Modell eines thermodynamischen Systems wird durch die Gleichungen

$$\dot{x}_1(t) + x_1(t) = Ku \text{ und}$$
$$x_1 = T_1\ddot{y} + T_2\dot{y} + \int y dt$$

beschrieben.
Verwenden Sie die gegebenen Gleichungen, um die skalare Differenzialgleichung des gesamten Systems (mit Eingang u und Ausgang y) aufzustellen und klassifizieren Sie - falls möglich - das resultierende Übertragungsverhalten des Systems.
Welches Übertragungsverhalten empfehlen Sie zur Regelung des resultierenden Ein-/Ausgangsverhaltens, wenn die stationäre Genauigkeit des Gesamtsystems das Auslegungsziel ist?

Anwort:

$$\dot{x}_1 + x_1 = K_4 u \tag{2.5}$$
$$x_1 = T_1\ddot{y} + T_2\dot{y} + \int y dt$$
$$\dot{x}_1 = T_1\dddot{y} + T_2\ddot{y} + y$$
$$T_1\dddot{y} + (T_1 + T_2)\ddot{y} + T_2\dot{y} + y + \int y dt = Ku$$
$$T_1\ddddot{y} + (T_1 + T_2)\dddot{y} + T_2\ddot{y} + \dot{y} + y = K\dot{u}$$

$\Rightarrow$ PDT_4-Verhalten. Für die stationäre Genauigkeit wird ein integraler Anteil im offenen Regelkreis benötigt, dies bedeutet, dass Regler im integralem Anteil (PI, PID, I) zu empfehlen sind.

2f) (4 Punkte)

Gegeben ist das Blockschaltbild eines Systems von Übertragungselementen (siehe Abbildung 2.3).

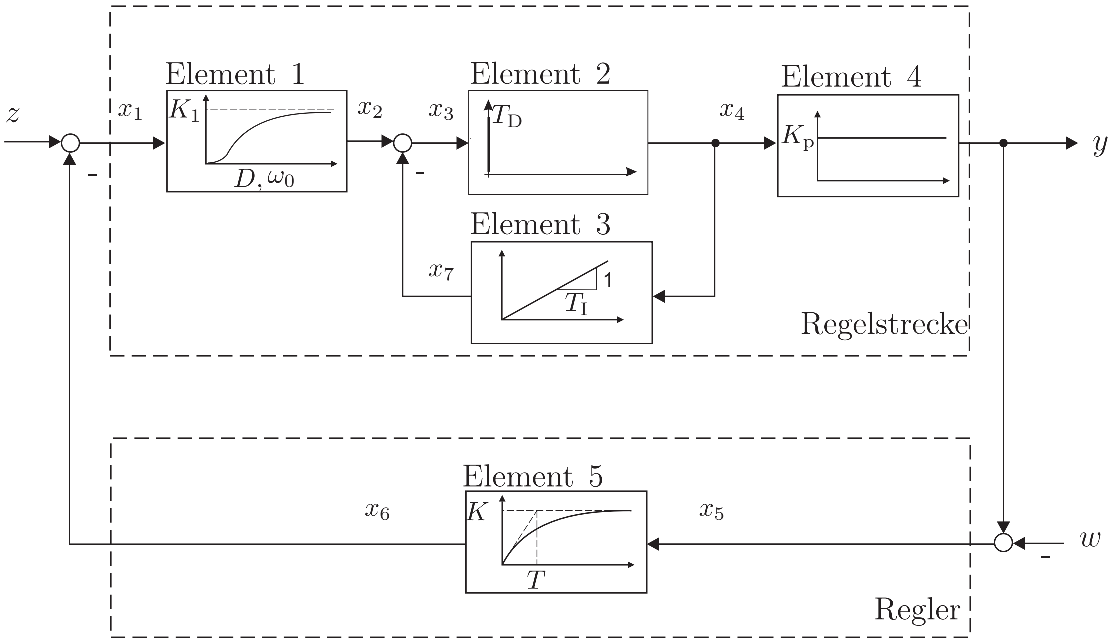


Abbildung 2.3: Blockschaltbild

Beantworten Sie die folgenden Fragen bezogen auf das genannte System:

Nr.	Aufgabe/Frage/Bewertung	Richtig	Falsch
1)	Beim Element Nr. 1 handelt es sich um ein System mit proportionalem Verhalten.	⊗	○
2)	Beim Element Nr. 3 handelt es sich um ein System mit stetigem Verhalten, derartige Systeme sind dadurch gekennzeichnet, dass sie kontinuierliches Verhalten ohne Sprünge aufweisen.	⊗	○
3)	Das Systemverhalten von x_2 zu x_4 lässt sich als ID-Verhalten klassifizieren.	○	⊗
4)	Das Systemverhalten von x_2 zu x_4 lässt sich als PDT$_1$-Verhalten klassifizieren.	○	⊗
5)	Die zugehörige Differenzationskonstante $\widetilde{T}_\mathrm{D}$ beträgt: $$\widetilde{T}_\mathrm{D} = \frac{T_\mathrm{I} + T_\mathrm{D}}{T_\mathrm{D} T_\mathrm{I}} \,. \tag{2.6}$$	○	⊗
6)	Abhängig von den Parametern (K, T) kann das Element Nr. 5 instabiles Verhalten aufweisen.	⊗	○
7)	Es handelt sich bei dem gezeigten System um ein klassisches MISO-System (Multi-Input, Single-Output).	○	⊗

8)	Auf Grund der Komplexität des Systems (5 Elemente, 2 Rückführungen) lassen sich derartige Systeme nicht mehr mit klassischen Auslegungsmethoden beschreiben, sondern müssen mit modernen Hilfsmitteln der Numerik und Simulation (Matlab/Simulink/Phyton/Mathematica) gelöst werden.	○	⊗

Antwort:

$$x_4 = T_\mathrm{D}\dot{x}_3$$

$$x_3 = x_2 - x_7 \Rightarrow x_3 = x_2 - \frac{1}{T_\mathrm{I}}\int x_4 dt$$

$$x_7 = \frac{1}{T_\mathrm{I}}\int x_4 dt \Rightarrow \dot{x}_7 = \frac{1}{T_\mathrm{I}}x_4$$

$$\Rightarrow \dot{x}_3 = \dot{x}_2 - \frac{1}{T_\mathrm{I}}x_4$$

$$x_4 = T_\mathrm{D}(\dot{x}_2 - \frac{1}{T_\mathrm{I}}x_4)$$

$$(1 + \frac{T_\mathrm{D}}{T_\mathrm{I}})x_4 = T_\mathrm{D}\dot{x}_2 \Rightarrow \text{D-Verhalten}$$

$$x_4 = \frac{T_\mathrm{D}}{1 + \frac{T_\mathrm{D}}{T_\mathrm{I}}}\dot{x}_2$$

$$\frac{T_\mathrm{D}}{\frac{T_\mathrm{I}+T_\mathrm{D}}{T_\mathrm{I}}} \Rightarrow \frac{T_\mathrm{D}T_\mathrm{I}}{T_\mathrm{I}+T_\mathrm{D}} \Rightarrow \text{als Differentiations Konstante}$$

2g) (5 Punkte)

Die Dynamik der Regelstrecke sei im Folgenden durch das Verhalten

$$\tilde{T}_3\dot{y} + \tilde{T}_2 y + \tilde{T}_1 \int y dt = K_1 \int [x_1 + \frac{1}{T_\mathrm{I}} \int x_1 dt] dt$$

beschrieben.
Klassifizieren Sie das resultierende Störübertragungsverhalten ($z \to y$).
Klassifizieren Sie das Übertragungsverhalten des Gesamtsystems und geben Sie die statischen Verstärkungen $K_{\mathrm{s},w}$ und $K_{\mathrm{s},z}$ an.
Als Parameter für den Regler verwenden sie $T = 0$.
Antwort:

$$\tilde{T}_3\ddot{y} + \tilde{T}_2\dot{y} + \tilde{T}_1 y = K_1[x_1 + \frac{1}{T_\mathrm{I}} \int x_1 dt]$$

Störübertragungsverhalten: $x_1 = z - Ky$

$$\tilde{T}_3\ddot{y} + \tilde{T}_2\dot{y} + \tilde{T}_1 y = K_1[z - Ky + \frac{1}{T_\mathrm{I}} \int (z - Ky) dt]$$

$$\tilde{T}_3\ddot{y} + \tilde{T}_2\dot{y} + \tilde{T}_1 y = K_1 z - K_1 K y + \frac{K_1}{T_\mathrm{I}} \int z dt - \frac{K_1 K}{T_\mathrm{I}} \int y dt$$

$$\tilde{T}_3\dddot{y} + \tilde{T}_2\ddot{y} + \tilde{T}_1\dot{y} = K_1\dot{z} - K_1 K\dot{y} + \frac{K_1}{T_\mathrm{I}} z - \frac{K_1 K}{T_\mathrm{I}} y$$

$$\tilde{T}_3\dddot{y} + \tilde{T}_2\ddot{y} + (\tilde{T}_1 + K_1 K)\dot{y} + \frac{K_1 K}{T_\mathrm{I}} y = K_1\dot{z} + \frac{K_1}{T_\mathrm{I}} z$$

$\Rightarrow$ PDT_3-Verhalten

Übertragungsverhalten des Gesamtsystems: $x_1 = z - K(y - w) \Rightarrow x_1 = z + K(w - y)$

$$\tilde{T}_3\ddot{y} + \tilde{T}_2\dot{y} + \tilde{T}_1 y = K_1[z + K(w - y) + \frac{1}{T_\mathrm{I}} \int (z + K(w - y)) dt]$$

$$\tilde{T}_3\dddot{y} + \tilde{T}_2\ddot{y} + \tilde{T}_1\dot{y} = K_1\dot{z} + K_1 K\dot{w} - K_1 K\dot{y} + \frac{K_1}{T_\mathrm{I}} z + \frac{K_1 K}{T_\mathrm{I}} w - \frac{K_1 K}{T_\mathrm{I}} y$$

$$\tilde{T}_3\dddot{y} + \tilde{T}_2\ddot{y} + (\tilde{T}_1 + K_1 K)\dot{y} + \frac{K_1 K}{T_\mathrm{I}} y = K_1\dot{z} + \frac{K_1}{T_\mathrm{I}} z + K_1 K\dot{w} + \frac{K_1 K}{T_\mathrm{I}} w$$

Statische Verstärkung: $\dddot{y} = \ddot{y} = \dot{y} = \dot{z} = \dot{w} = 0$

$$\frac{K_1 K_\mathrm{s}}{T_\mathrm{I}} y_\mathrm{s} = \frac{K_1}{T_\mathrm{I}} z_\mathrm{s} + \frac{K_1 K_\mathrm{s}}{T_\mathrm{I}} w_\mathrm{s}$$

$$K_{\mathrm{s},w} = \frac{K_1 K_\mathrm{s} T_\mathrm{I}}{T_\mathrm{I} K_1 K_\mathrm{s}} = 1$$

$$K_{\mathrm{s},z} = \frac{K_1 T_\mathrm{I}}{T_\mathrm{I} K_1 K} = \frac{1}{K}$$