



Universität Stuttgart
Institut für Systemtheorie u. Regelungstechnik
Prof. Dr.-Ing. Frank Allgöwer

Probeklausur Einführung in die Regelungstechnik
Teil 2 - MIT LÖSUNGEN

Name, Vorname: _____

Fachrichtung: _____

Matrikelnummer: _____

Beachten Sie folgende Regeln zu Teil 2 der Prüfung:

- Prüfungszeit: **60 min.**
- Teil 2 der Prüfung umfasst **16 Seiten** (6 Aufgaben, 30 Punkte).
- Für die folgenden Aufgaben sind alle nichtelektronischen Hilfsmittel zugelassen.
- Antworten ohne Begründung können nicht gewertet werden.

Aufgabe 1 (3 Punkte)

Hinweis: Alle Aufgabenteile können unabhängig voneinander bearbeitet werden.

In Abbildung 2 und 3 sind das Bodediagramm einer asymptotisch stabilen Strecke G sowie vier verschiedener Regler K_1 , K_2 , K_3 und K_4 dargestellt. Die Strecke G soll im Standardregelkreis nach Abbildung 1 mit einem der Regler geschlossen werden. Gehen Sie davon aus, dass alle relevanten Pol- und Nullstellen aus den Bodediagrammen abzulesen sind.

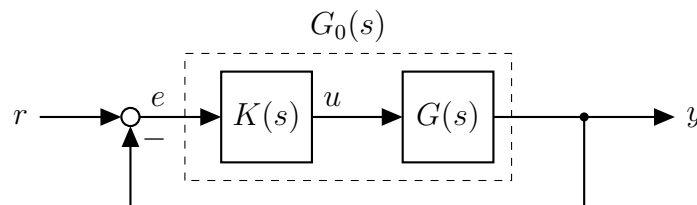


Abbildung 1: Standardregelkreis.

a) Erfüllt der Regler K_1 die Anforderungen (1 Punkt)

- asymptotisch stabiler geschlossener Kreis und
- keine bleibende Regelabweichung?

Begründen Sie Ihre Antwort *kurz*.

b) Welcher der Regler K_2 , K_3 und K_4 erfüllt alle Anforderungen (2 Punkte)

- asymptotisch stabiler geschlossener Kreis,
- keine bleibende Regelabweichung und
- Phasenreserve von ca. 25° ?

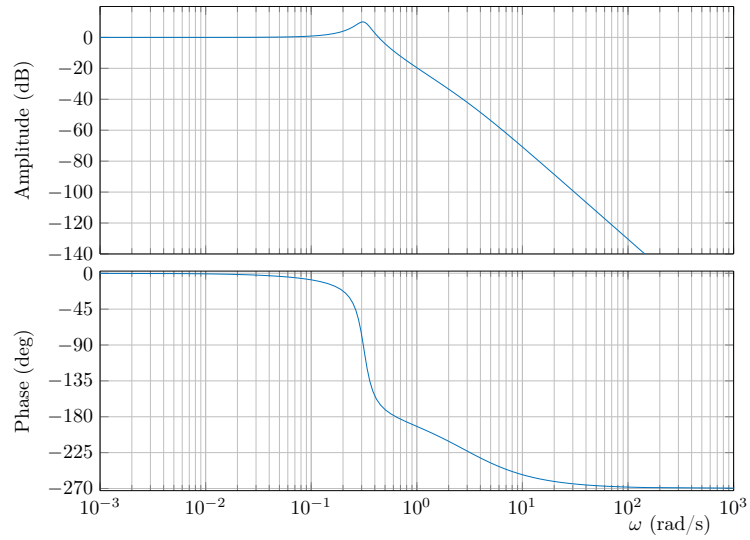
Begründen Sie Ihre Antwort *kurz*.

Lösung:

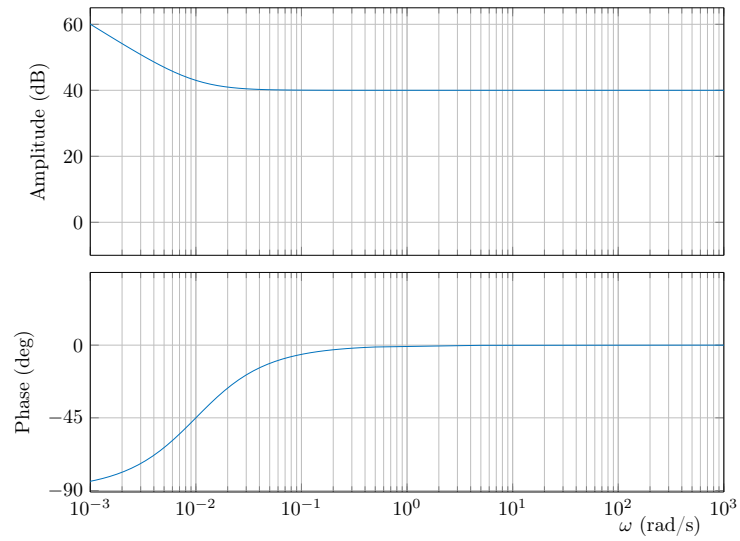
a) Antwort: Nein, der Regler erfüllt keine der beiden Bedingungen. Addiert man die Bode-Plots für Strecke G und Regler K_1 , so kann man an der Durchtrittsfrequenz die Stabilität des geschlossenen Kreises ablesen. Mit

$$\omega_D \approx 3 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$$
$$\Phi(\omega_D) \approx -225^\circ$$

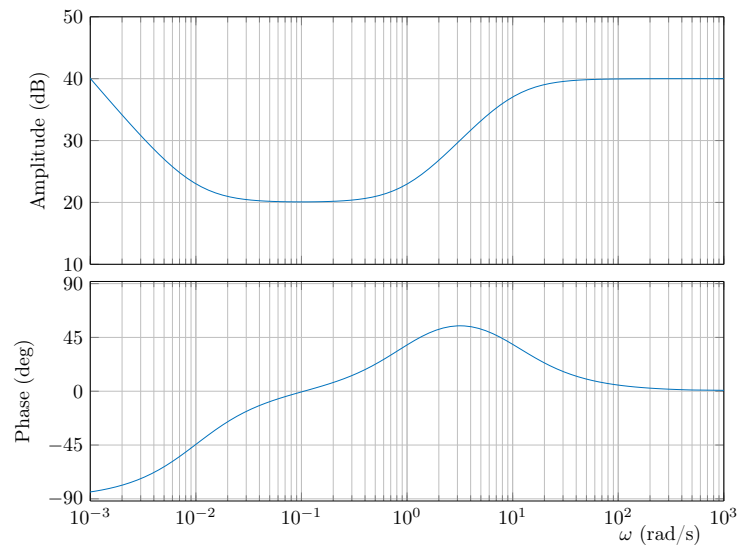
ergibt sich, dass der geschlossene Kreis *nicht* asymptotisch stabil ist. Somit ist auch trotz des Integratoranteils im Regler die zweite Bedingung der bleibenden Regelabweichung nicht erfüllt, da diese nur für einen stabilen Kreis erreicht werden kann.



(a) Regelstrecke G .

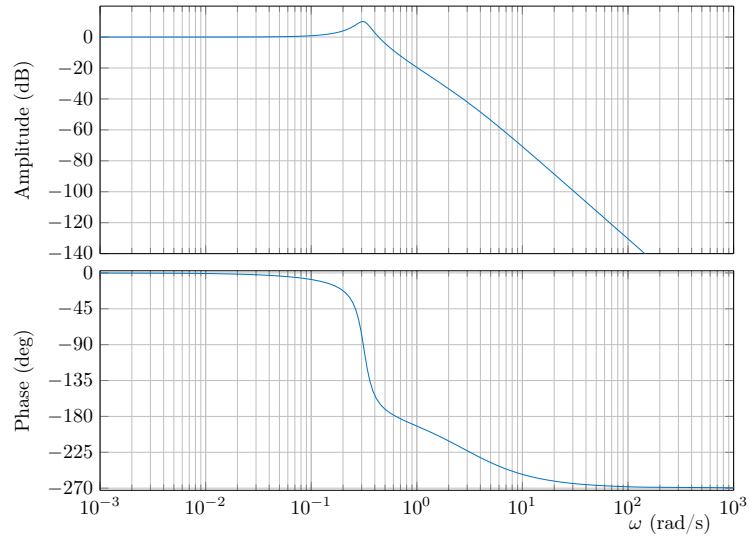


(b) Regler K_1 .

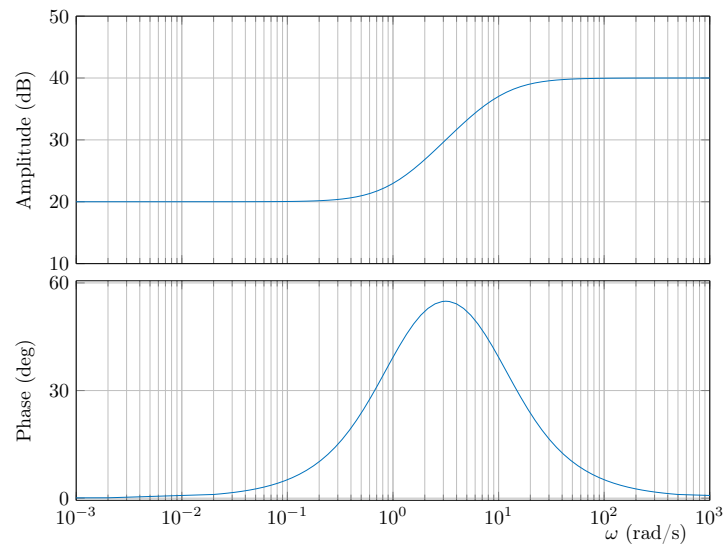


(c) Regler K_2 .

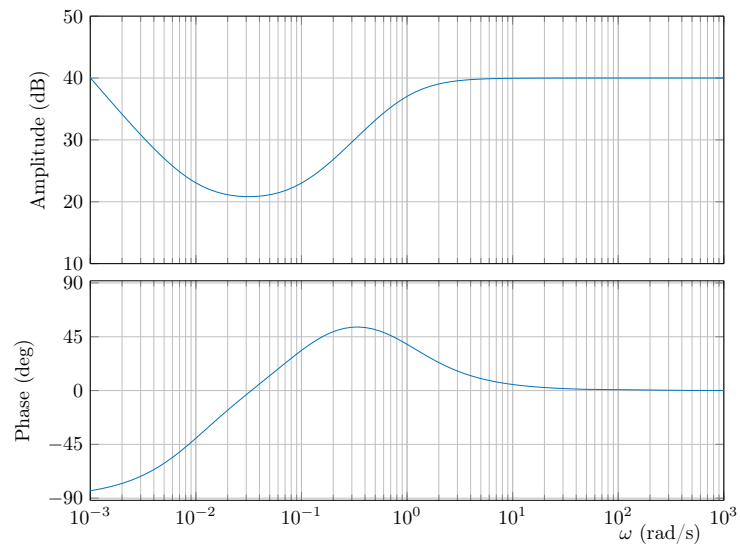
Abbildung 2: Bodediagramme der Strecke G und zur Auswahl stehender Regler K_1 , K_2 .



(a) Regelstrecke G .



(b) Regler K_3 .



(c) Regler K_4 .

Abbildung 3: Bodediagramme der Strecke G und zur Auswahl stehender Regler K_3 , K_4 .

b) Überprüfung der Anforderungen durch Betrachtung des Bode-Plots des offenen Kreises.

- K_2 : $\omega_D \approx 1,4 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$, $\Phi(\omega_D) \approx -155 \text{ deg}$, Integrator-Anteil bzw. $\lim_{\omega \rightarrow 0} |G(j\omega)| = \infty$, d.h. alle Anforderungen sind erfüllt!
- K_3 : ω_D und $\Phi(\omega_D)$ wie bei K_2 , also auch asympt. stabil und Phasenreserve erfüllt. Integrator-Anteil fehlt allerdings, also ist eine bleibende Regelabweichung zu erwarten.
- K_4 : $\omega_D \approx 3 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$, $\Phi(\omega_D) \approx -210 \text{ deg}$, also nicht asympt. stabil.

Aufgabe 2 (5 Punkte)

Hinweis: Alle Aufgabenteile können unabhängig voneinander bearbeitet werden.

Gegeben sei ein dynamisches System mit Eingang u und der Übertragungsfunktion

$$G(s) = \frac{3-s}{(2-s)(4+s)}.$$

Auf den Ausgang y wirkt additiv eine messbare Störung z mit Störübertragungsfunktion

$$G_z(s) = \frac{5+s}{6+s}.$$

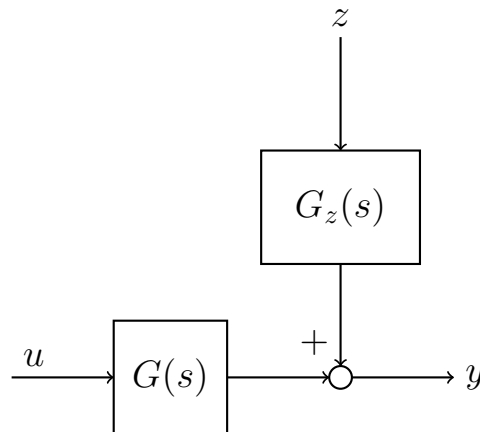


Abbildung 4: Struktur der Strecke und Störung.

Für das System soll eine Regelkreisstruktur mit zwei Freiheitsgraden (2-DOF Regler) entworfen werden, so dass der Ausgang des Systems einem Referenzsignal r möglichst genau folgt und der geschlossene Kreis asymptotisch stabil ist. Zusätzlich soll durch eine Störgrößenaufschaltung die Störung z möglichst exakt von der Regelgröße y entkoppelt werden.

- Ist der Entwurf einer Störgrößenaufschaltung unabhängig von dem Entwurf einer Regelkreisstruktur mit zwei Freiheitsgraden möglich? Begründen Sie Ihre Antwort *kurz*. (1 Punkt)
- Zeichnen Sie das komplette Blockdiagramm des geschlossenen Kreises mit 2-Freiheitsgrade-Regler sowie Störgrößenaufschaltung. Beschriften Sie Ihre Blöcke entsprechend. (2 Punkte)
- Gehen Sie davon aus, dass Störgrößenaufschaltung und 2-Freiheitsgrade-Regler unabhängig voneinander ausgelegt werden können und ein stabilisierender Regler K existiert. Entwerfen Sie eine realisierbare, stabile Störgrößenaufschaltung K_z , so dass die Störung z möglichst exakt von der Regelgröße y entkoppelt wird. (2 Punkte)

Lösung:

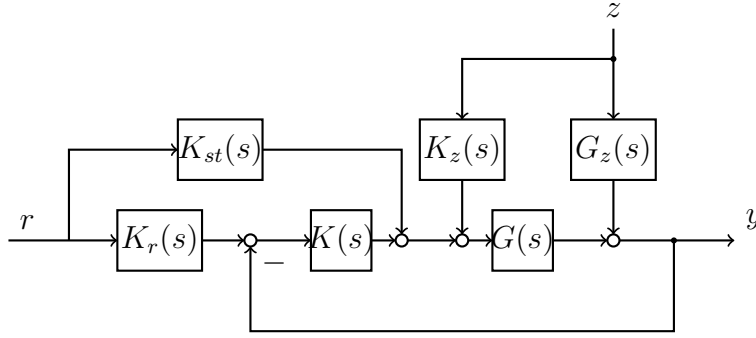


Abbildung 5: Blockschaltbild der Regelkreisstruktur mit zwei Freiheitsgraden und Störgrößenaufschaltung

- a) Ja, da das Separationsprinzip gilt. Es lässt sich auch die Gesamtübertragungsfunktion aufstellen:

$$Y = \frac{G_z + GK_z}{1 + GK} Z + \frac{GK_{st} + GK K_r}{1 + GK} R$$

Daran ist wieder ersichtlich, dass K_z unabhängig von K_{st} und K_r entworfen werden kann.

- b) siehe Abbildung (5)
- c) G hat eine instabile Nullstelle, außerdem ist $\text{rel. Grad } G > \text{rel. Grad } G_z$, also ist keine ideale Störgrößenaufschaltung möglich sondern nur eine Annähernde. D.h. G wird zunächst in einen Allpass- und minimalphasigen Anteil zerlegt und ein zusätzlicher Filter eingeführt.

$$G = G_{AP} G_{MP} = \frac{3-s}{3+s} \frac{3+s}{(2-s)(4+s)}$$

$$F = \frac{\lambda}{s+\lambda}$$

Damit ergibt sich mit dem Ansatz

$$K_z = -\frac{G_z}{G_{MP}} F = -\lambda \frac{(5+s)(2-s)(4+s)}{(6+s)(3+s)(\lambda+s)}, \quad \lambda > 0$$

eine realisierbare, stabile Störgrößenaufschaltung.

Aufgabe 3 (5 Punkte)

Hinweis: Alle Aufgabenteile können unabhängig voneinander bearbeitet werden.

Gegeben sei die Strecke G sowie zwei Regler K_1 und K_2 , die im Standardregelkreis gemäß Abbildung 6 geschlossen werden. Abbildung 7 zeigt die Bodediagramme der beiden *offenen* Kreise $G_{0,1}$ und $G_{0,2}$.

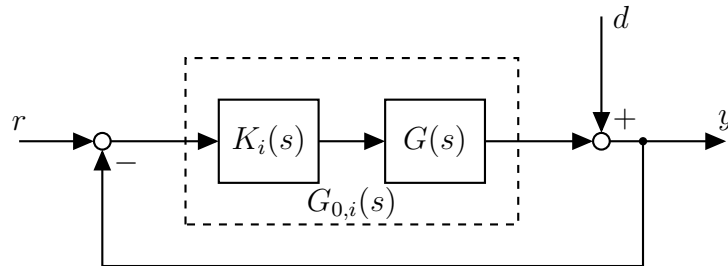


Abbildung 6: Standardregelkreis.

- a) Der *geschlossene* Kreis werde mit einem sinusförmigen Referenzsignal mit einer Amplitude von 1 und einer Frequenz von 10 rad/s angeregt. Abbildung 8 zeigt drei mögliche Ausgänge. Ordnen Sie dem mit Regler K_1 bzw. K_2 geschlossenen Kreis das entsprechende Ausgangssignal zu. Begründen Sie Ihre Wahl.

Lösung:

- K_1 : Aus Abbildung 7 lässt sich die Durchtrittsfrequenz des offenen Kreises ablesen: $\omega_D = 3\text{rad/sec}$. Daraus folgt dann $\omega_B \approx 3\text{rad/sec}$. Die Bandbreite des geschlossenen Kreises ist also *kleiner* als die Frequenz des Referenzsignals. D.h., das Referenzsignal wird abgeschwächt.
⇒ Abbildung (a).
- K_2 : Aus Abbildung 7 lässt sich die Durchtrittsfrequenz des offenen Kreises ablesen: $\omega_D = 30\text{rad/sec}$. Daraus folgt dann $\omega_B \approx 30\text{rad/sec}$. Die Bandbreite des geschlossenen Kreises ist also *größer* als die Frequenz des Referenzsignals. D.h., die Amplitude des Referenzsignals wird kaum verändert (Verstärkung ≈ 1).
⇒ Abbildung (b).

(3 Punkte)

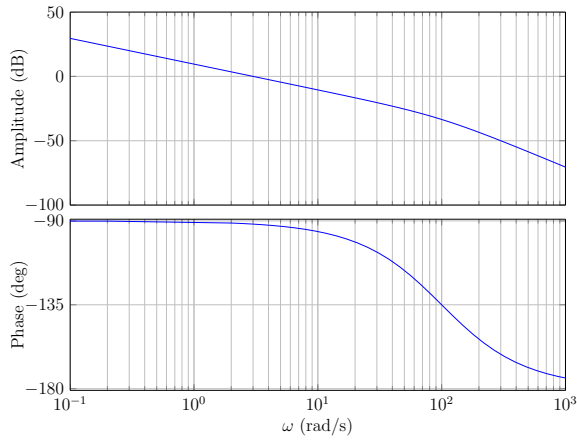
- b) Der *geschlossene* Kreis werde mit einem Einheitssprung als Referenzsignal angeregt. Abbildung 9 zeigt drei mögliche Ausgänge. Ordnen Sie dem mit Regler K_1 bzw. K_2 geschlossenen Kreis das entsprechende Ausgangssignal zu. Begründen Sie Ihre Wahl.

Lösung:

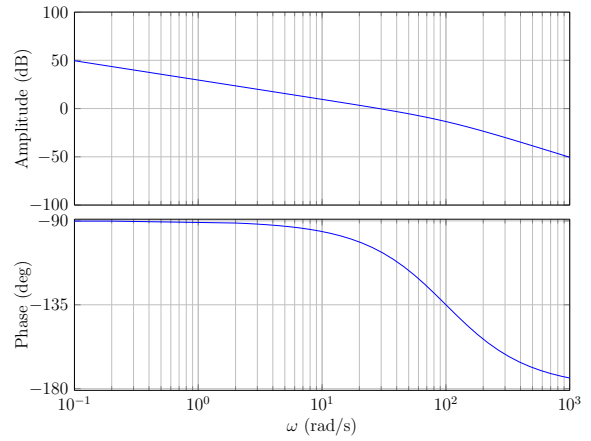
- Beide offene Kreise besitzen einen Integratoranteil, d.h. die bleibende Regelabweichung muss null sein. Deshalb scheidet Abbildung (b) aus.

- $G_{0,2}$ hat eine höhere Durchtrittsfrequenz und damit auch höhere Bandbreite als $G_{0,1}$. D.h. $G_{0,2}$ reagiert schneller.
In Abbildung (a) wird langsamer auf den Sprung reagiert als in Abbildung (b) und (c).
Somit kann K_1 Abbildung (a) und K_2 Abbildung (c) zugeordnet werden.

(2 Punkte)

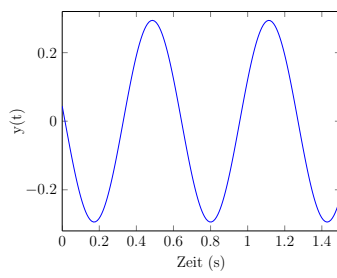


(a) Offener Kreis $G_{0,1}$.

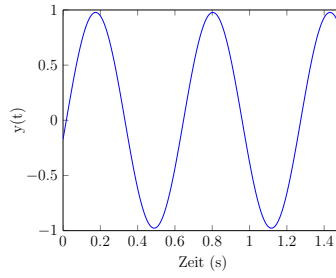


(b) Offener Kreis $G_{0,2}$.

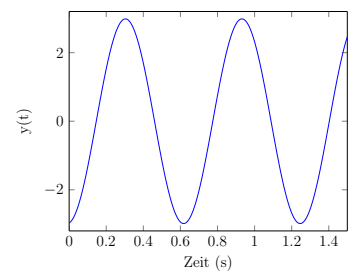
Abbildung 7: Bode Diagramme der *offenen* Kreise.



(a)

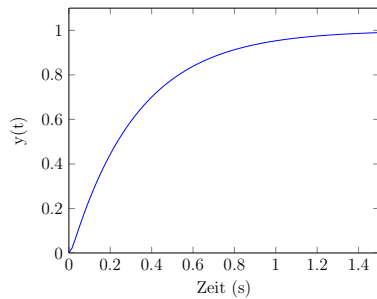


(b)

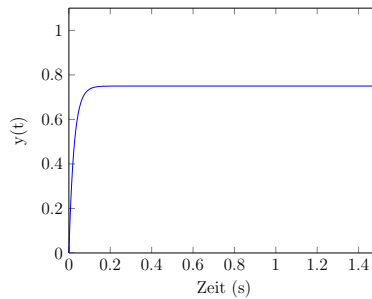


(c)

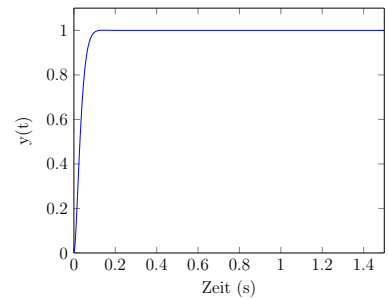
Abbildung 8: Mögliche Ausgänge des *geschlossenen* Kreises bei Anregung mit einem sinusförmigem Referenzsignal.



(a)



(b)



(c)

Abbildung 9: Mögliche Ausgänge des *geschlossenen* Kreises bei einem Einheitssprung als Referenzsignal.

Aufgabe 4 (6 Punkte)

Hinweis: Alle Aufgabenteile können unabhängig voneinander bearbeitet werden.

Gegeben sei das lineare System

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{x}} &= A\mathbf{x} + \mathbf{b}w, & \mathbf{x}(0) &= \mathbf{x}_0 \in \mathbb{R}^n, \\ y &= \mathbf{c}^\top \mathbf{x},\end{aligned}$$

mit der Matrix $A \in \mathbb{R}^{n \times n}$, den Vektoren $\mathbf{b}, \mathbf{c} \in \mathbb{R}^n$ und einem unbekannten, skalarwertigen Störsignal w .

- a) Zunächst sei $w(t) = 0$ für alle $t \geq 0$. Zeigen Sie, dass die Beobachtbarkeitsmatrix P_0 notwendigerweise nicht vollen Rang hat, wenn der Ausgang y für einen Zustand $\mathbf{x}(0) \neq 0$ identisch Null ist.

(2 Punkte)

- b) Nun sei $\mathbf{x}(0) = 0$. Es soll untersucht werden, wann eine Störung w keinen Einfluss auf den Systemausgang y hat. Zeigen Sie dazu, dass für beliebig oft differenzierbare Störsignale w der Ausgang y genau dann identisch Null ist, wenn

$$\mathbf{c}^\top [\mathbf{b}, A\mathbf{b}, \dots, A^{n-1}\mathbf{b}] = 0.$$

(4 Punkte)

Hinweis: Nach dem Satz von Cayley-Hamilton lässt sich jede Potenz A^i einer Matrix $A \in \mathbb{R}^{n \times n}$ für $i \geq n$ als Linearkombination von $\{I, A, A^2, \dots, A^{n-1}\}$ darstellen, wobei I die Einheitsmatrix ist.

Lösung:

- a) Kurzlösung über Beobachtbarkeit:

Wenn ein Anfangszustand $\mathbf{x}_0 \neq 0$ existiert, für den der Ausgang $y(t) \equiv 0$ ist, ist das System nicht beobachtbar, da in diesem Fall nicht eindeutig vom Ausgangssignal $y(t) \equiv 0$ auf die Anfangsbedingung $\mathbf{x}(0)$ geschlossen werden kann. Die Anfangsbedingung für $y(t) \equiv 0$ ist entweder $\mathbf{x}(0) = 0$ oder $\mathbf{x}(0) = \mathbf{x}_0 \neq 0$.

Die Beobachtbarkeitsmatrix P_0 hat genau dann vollen Rang, wenn das System (A, C) beobachtbar ist. Folglich kann die Matrix P_0 nicht vollen Rang haben, wenn das System nicht beobachtbar ist.

Ausführliche Lösung über Differentiation des Ausgangs:

$$P_0 = \begin{bmatrix} \mathbf{c}^\top \\ \mathbf{c}^\top A \\ \vdots \\ \mathbf{c}^\top A^{n-1} \end{bmatrix}$$

Angenommen es existiert ein Anfangszustand $\mathbf{x}_0 \neq 0$, für den der Ausgang gilt: $y(t) = 0 \forall t \geq 0$.

Wegen $y(t) = 0 \forall t \geq 0$ muss für alle Ableitungen des Ausgangs gelten: $\frac{d^k}{dt^k} y|_{t=0} = 0$.

$$\begin{aligned} \dot{y}|_{t=0} &= \mathbf{c}^\top \dot{\mathbf{x}}|_{t=0} = \mathbf{c}^\top A \mathbf{x}_0 = 0 \\ \ddot{y}|_{t=0} &= \mathbf{c}^\top \ddot{\mathbf{x}}|_{t=0} = \mathbf{c}^\top A \dot{\mathbf{x}}|_{t=0} = \mathbf{c}^\top A(A \mathbf{x}_0) = \mathbf{c}^\top A^2 \mathbf{x}_0 = 0 \\ &\vdots \\ y^{(n)}|_{t=0} &= \mathbf{c}^\top \mathbf{x}^{(n)}|_{t=0} = \mathbf{c}^\top A^n \mathbf{x}_0 = 0 \end{aligned}$$

Oder in Matrix-Vektor form:

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} C \\ CA \\ \vdots \\ CA^{n-1} \end{bmatrix}}_{P_0} \mathbf{x}_0$$

Wenn die Matrix P_0 vollen Rang hat, ist die Lösung eindeutig und da die triviale Lösung $\mathbf{x}_0 = 0$ immer möglich ist, kann in diesem Fall keine andere Lösung $\mathbf{x}_0 \neq 0$ existieren. Auf der anderen Seite kann die Matrix P_0 nicht vollen Rang haben, wenn eine nichttriviale Lösung $\mathbf{x}_0 \neq 0$ existiert.

- b) Der Ausgang $y(t)$ soll für alle Zeiten unabhängig von der Störung $w(t)$ sein. Deshalb muss gelten, dass alle Ableitungen des Ausgangs unabhängig von der Störung sind. Für die Ableitungen des Ausgangs gilt:

$$\dot{y} = \mathbf{c}^\top \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{c}^\top A \mathbf{x} + \mathbf{c}^\top \mathbf{b} w \quad (4.a)$$

$$\ddot{y} = \mathbf{c}^\top \ddot{\mathbf{x}} = \mathbf{c}^\top A \dot{\mathbf{x}} + \mathbf{c}^\top \mathbf{b} \dot{w} = \mathbf{c}^\top A(A \mathbf{x} + \mathbf{b} w) + \mathbf{c}^\top \mathbf{b} \dot{w} = \mathbf{c}^\top (A^2 \mathbf{x} + A \mathbf{b} w + \mathbf{b} \dot{w}) \quad (4.b)$$

$\vdots$

$$y^{(n)} = \mathbf{c}^\top \mathbf{x}^{(n)} = \mathbf{c}^\top \left(A^n \mathbf{x} + \sum_{k=0}^{n-1} A^k \mathbf{b} w^{(k)} \right) = \mathbf{c}^\top A^n \mathbf{x} + \left(\sum_{k=0}^{n-1} \mathbf{c}^\top A^k \mathbf{b} \right) w \quad (4.c)$$

Aus (4.a) folgt, dass $\mathbf{c}^\top \mathbf{b} = 0$ gelten muss, damit $\dot{y}$ unabhängig von w ist. Folglich kann (4.b) geschrieben werden als:

$$\ddot{y} = \mathbf{c}^\top (A^2 \mathbf{x} + A \mathbf{b} w)$$

Daraus folgt, dass $\mathbf{c}^\top A \mathbf{b} = 0$ gelten muss, damit $\ddot{y}$ unabhängig von w ist. Durch Induktion folgt, dass $\mathbf{c}^\top A^{k-1} \mathbf{b} = 0$, damit $\frac{d^k}{dt^k} y$ unabhängig von w ist. Mit dem Satz von Cayley Hamilton kann die n -te und jede höhere Potenz der Matrix A als linearkombination der ersten $n - 1$ Potenzen dargestellt werden, woraus folgt, dass eine Betrachtung der ersten $n - 1$ Ableitungen genügt, um auf alle Ableitungen schließen zu können.

Es sind folglich alle Einträge des Vektors $\mathbf{c}^\top S_0$ Null.

Wenn ein Eintrag des Vektors $\mathbf{c}^\top S_0$ ungleich Null ist, so folgt, dass die entsprechende Ableitung des Ausgangs y von w abhängt, was der Aussage widerspricht.

Alternative Lösung:

Für die partikuläre Lösung des Systems gilt:

$$y_w(t) = \mathbf{c}^\top \int_0^t e^{A(t-\tau)} \mathbf{b} w(\tau) d\tau$$

mit

$$e^{A(t-\tau)} = \sum_{k=0}^{\infty} A^k \frac{(t-\tau)^k}{k!}$$

Mit dem Satz von Cayley-Hamilton kann die Summe bei $n-1$ abgebrochen werden:

$$e^{A(t-\tau)} = \sum_{k=0}^{n-1} A^k \frac{l_k(t)(t-\tau)^k}{k!}.$$

Dabei sind l_k reelle Konstanten, die den Einfluss der höhern Terme berücksichtigen. Es folgt für den Ausgang

$$\begin{aligned} y_w(t) &= \mathbf{c}^\top \int_0^t \left(\sum_{k=0}^{n-1} A^k \frac{l_k(t)(t-\tau)^k}{k!} \right) \mathbf{b} w(\tau) d\tau \\ &= \int_0^t \underbrace{\left(\sum_{k=0}^{n-1} \mathbf{c}^\top A^k \mathbf{b} \frac{l_k(t)(t-\tau)^k}{k!} \right)}_{(*)} w(\tau) d\tau. \end{aligned}$$

Damit dies für alle $w(t)$ und alle $t > 0$ identisch Null ist, muss $(*)$ identisch null sein. Da $(*)$ ein Polynom in t ist, müssen alle Koeffizienten des Polynoms Null sein, damit der Wert des Polynoms für alle $t \geq 0$ Null ist.

Folglich muss gelten, dass $\mathbf{c}^\top A^k \mathbf{b} = 0$ für $k = 0, \dots, n-1$. Da $A^k \mathbf{b}$ für $k = 0, \dots, n-1$ gerade die Einträge der Matrix S_0 sind, folgt

$$\mathbf{c}^\top S_0 = 0$$

Außerdem gilt

$$\mathbf{c}^\top S_0 = 0 \quad \Rightarrow \quad \sum_{k=0}^{n-1} \mathbf{c}^\top A^k \mathbf{b},$$

da in der Summe nur die Einträge des Nullvektors $\mathbf{c}^\top S_0 = 0$ aufsummiert werden.

Anmerkung: $l_k(t)$ kann nicht für alle t Null sein, da es ebenfalls aus einem Polynom in t berechnet wird (allen Elementen der unendlichen Reihe $\geq n$).

Aufgabe 5 (4 Punkte)

Seien $M \in \mathbb{R}^{n \times n}$ und $\mathbf{g} \in \mathbb{R}^n$. Wir betrachten im Folgenden das System

$$\dot{\mathbf{x}} = A\mathbf{x} + \mathbf{b}u \quad (5.a)$$

mit

$$A = \begin{bmatrix} 0_{n \times n} & M \\ M & 0_{n \times n} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{b} = \begin{bmatrix} 0_n \\ \mathbf{g} \end{bmatrix}. \quad (5.b)$$

Zeigen Sie, dass $(A, \mathbf{b})$ genau dann steuerbar ist, wenn M invertierbar und $(M^2, \mathbf{g})$ steuerbar sind. (4 Punkte)

Lösung: Für Steuerbarkeit muss gezeigt werden, dass die Steuerbarkeitsmatrix

$$C = \begin{bmatrix} 0 & Mg & 0 & M^3g & 0 & \dots \\ g & 0 & M^2g & 0 & M^4g & \dots \end{bmatrix}$$

vollen Rang hat, also $\det(C) \neq 0$. Da beim Berechnen der Determinante ein Spaltentausch nur das Vorzeichen ändert, genügt es zu zeigen, dass jeweils

$$\begin{aligned} \det \begin{pmatrix} Mg & M^3g & M^5g & \dots \end{pmatrix} &\neq 0 \\ \det \begin{pmatrix} g & M^2g & M^4g & \dots \end{pmatrix} &\neq 0. \end{aligned}$$

Die untere Bedingung entspricht der Steuerbarkeit von (M^2, g) . Die obere lässt sich umformen zu

$$\begin{aligned} \det \begin{pmatrix} Mg & M^3g & M^5g & \dots \end{pmatrix} &= \det \left(M \cdot \begin{pmatrix} g & M^2g & M^4g & \dots \end{pmatrix} \right) \\ &= \det(M) \cdot \det \begin{pmatrix} g & M^2g & M^4g & \dots \end{pmatrix}. \end{aligned}$$

Da die Steuerbarkeit von (M^2, g) nun schon gegeben ist, erkennt man, dass die erste Bedingung genau dann erfüllt ist, wenn außerdem $\det(M) \neq 0$, M also invertierbar ist.

Aufgabe 6 (7 Punkte)

Gegeben sei das System

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

$$\tilde{y} = \mathbf{c}^T \mathbf{x},$$

welches wie in Abbildung 10 verschaltet wird.

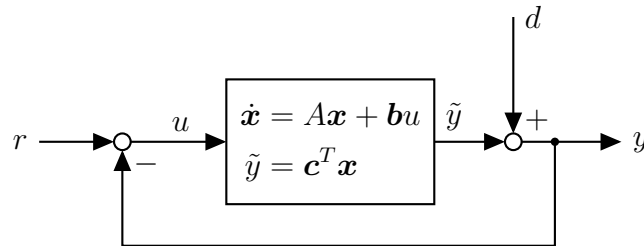


Abbildung 10: Standardregelkreis.

- a) Zeigen Sie, dass die Nullstellen der Störübertragungsfunktion, also der Übertragungsfunktion von d nach y , die Eigenwerte von A sind. Nehmen Sie dabei an, dass keine Pol- / Nullstellenkürzungen auftreten. (4 Punkte)

Lösung:

- Die Übertragungsfunktion des offenen Kreises $\dot{x} = Ax + bu$, $\tilde{y} = c^T x$ lautet $G(s) = c^T(sI - A)^{-1}b$. Die Pole von $G(s)$ entsprechen den Eigenwerten der Matrix A .
- Die Störübertragungsfunktion (des geschlossenen Kreises) ist $G_{dy} = \frac{1}{1+G}$.
- Mit $G = \frac{Z}{N}$ ergibt sich $G_{dy} = \frac{N}{N+Z}$.
- Die Nullstellen der Störübertragungsfunktion sind also die Nullstellen des Polynoms $N(s)$, welche die Pole von $G(s)$ sind, welche den Eigenwerten von A entsprechen.

- b) Nun wird angenommen, dass der geschlossene Kreis asymptotisch stabil ist und A genau einen Eigenwert mit positivem Realteil besitzt. Skizzieren Sie einen möglichen Verlauf von y für den Fall $r(t) = 0$ und einer sprungförmigen Störung $d(t) = h(t)$. Begründen Sie Ihre Wahl von $y(0)$ und $\lim_{t \rightarrow \infty} y(t)$. (3 Punkte)

Lösung:

- $y(0) = 1$ weil $G(s)$ nicht sprungfähig ist.
- $\lim_{t \rightarrow \infty} y(t) < 0$, weil A genau einen EW mit positiven Realteil besitzt $\Rightarrow$ die Störübertragungsfunktion besitzt genau eine Nullstelle mit positivem Realteil $\Rightarrow$ die Störübertragungsfunktion ist nichtminimalphasig und weist somit ein inverse response behaviour auf.