1. Übung zur Vorlesung „Moderne Methoden der Regelungstechnik“

Aufstellen von Zustandsraummodellen, Übertragungsmatrizen

Felix Goßmann M.Sc.

Institut für Steuer- und Regelungstechnik
Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik
Universität der Bundeswehr München

Dozent:

Felix Goßmann
Gebäude 41 – 2311
felix.gossmann@unibw.de

- Termine nach Vereinbarung
- Fragen zu best. Übungsaufgaben
    - Per E-Mail Termin vereinbaren

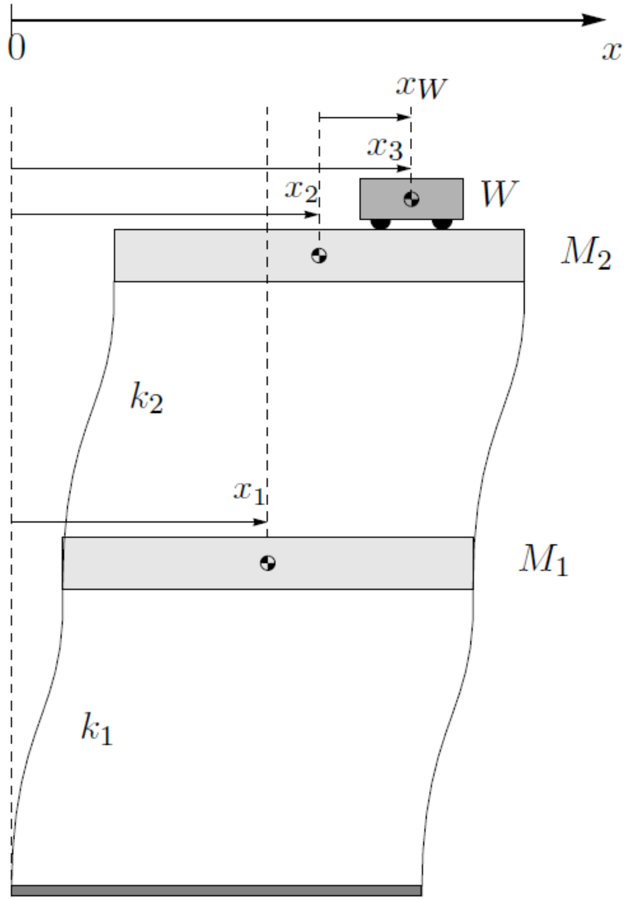
- Unterlagen auf der Homepage (Lehrveranstaltungen/Unterlagen/MMR)
    - https://www.unibw.de/lrt15/Institut/lehre/unterlagen/MMR

Geplanter Ablauf

KW	Mo	Die	Bemerkungen
41	-	V	
42	Ü	V	
43	Ü	V	
44	Ü	V	
45	Ü	V	
46	Ü	V	
47	Ü	V	
48	Ü	V	
49	Ü	V	
50	Ü	?	

- Zeiten unter Vorbehalt
- Kurzfristige Änderungen

Aufgabe 1: Aufstellen eines Zustandsraummodelles



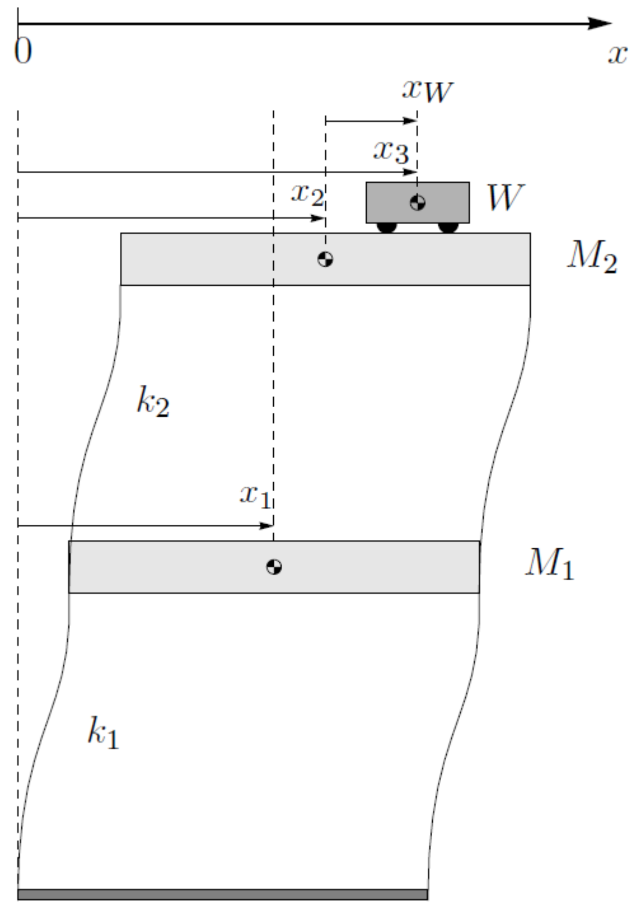
Aufgabe:

Bestimmen Sie das 6-dimensionale Zustandsraummodell des dargestellten Problems

- Eingangssignal:
  - Beschleunigung von W relativ zur Masse M_2
- Zustandsgrößen:
  - Positionen x und deren zeitliche Ableitungen $\dot{x}$

Aufgabe 1: Aufstellen eines Zustandsraummodelles

	Betrag	Richtung
Masse 1	$M_1 \cdot \ddot{x}_1$	$\leftarrow$
	$K_1 \cdot x_1$	$\leftarrow$
	$K_2 \cdot (x_2 - x_1)$	$\rightarrow$
Masse 2	$M_2 \cdot \ddot{x}_2$	$\leftarrow$
	$K_2 (x_2 - x_1)$	$\leftarrow$
	$M_W \cdot (\ddot{x}_2 + u)$	$\leftarrow$
Wagen	$M_W \cdot \ddot{x}_3$	$\leftarrow$
	$M_W (\ddot{x}_2 + u)$	$\rightarrow$



Aufgabe 1: Aufstellen eines Zustandsraummodelles

Masse 1	$M_1 \cdot \ddot{x}_1$	$\leftarrow$
	$k_1 \cdot x_1$	$\leftarrow$
	$k_2 \cdot (x_2 - x_1)$	$\rightarrow$
Masse 2	$M_2 \cdot \ddot{x}_2$	$\leftarrow$
	$k_2(x_2 - x_1)$	$\leftarrow$
	$M_W \cdot (\ddot{x}_2 + u)$	$\leftarrow$
Wagen	$M_W \cdot \ddot{x}_3$	$\leftarrow$
	$M_W(\ddot{x}_2 + u)$	$\rightarrow$

$$-M_1 \ddot{x}_1 - k_1 x_1 + k_2(x_2 - x_1) = 0$$

$$-M_2 \ddot{x}_2 - k_2(x_2 - x_1) - M_W(\ddot{x}_2 + u) = 0$$

$$-M_W \ddot{x}_3 + M_W(\ddot{x}_2 + u) = 0$$

Aufgabe 1: Aufstellen eines Zustandsraummodelles

$$\ddot{x}_1 = -\frac{k_1 + k_2}{m_1} x_1 - \frac{k_2}{m_1} x_2$$

$$\ddot{x}_2 = \frac{k_2}{m_2 + m_w} x_1 - \frac{k_2}{m_2 + m_w} x_2 - \frac{m_w}{m_2 + m_w} u$$

$$\ddot{x}_3 = -\frac{k_2}{m_2 + m_w} x_2 + \frac{k_2}{m_2 + m_w} x_1 + \frac{m_2}{m_2 + m_w} u$$

$$\ddot{x} = K_x \cdot x + K_u \cdot u$$

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

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_4 \\ \dot{x}_2 &= x_5 \\ \dot{x}_3 &= x_6 \end{aligned} \longrightarrow \begin{aligned} \ddot{x}_1 &= \dot{x}_4 \\ \ddot{x}_2 &= \dot{x}_5 \\ \ddot{x}_3 &= \dot{x}_6 \end{aligned}$$

Aufgabe 1: Aufstellen eines Zustandsraummodelles

$$\begin{pmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \\ \dot{x}_5 \\ \dot{x}_6 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ -\frac{K_1+K_2}{M_1} & -\frac{K_2}{M_1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{K_2}{M_2+M_W} & -\frac{K_2}{M_2+M_W} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{K_2}{M_2+M_W} & -\frac{K_2}{M_2+M_W} & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \\ x_6 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ -\frac{M_W}{M_2+M_W} \\ \frac{M_2}{M_2+M_W} \end{pmatrix} u$$

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

x: Zustandsvektor

A: System-Matrix

B: Eingangsmatrix

u: Eingangsvektor

Aufgabe 1: Aufstellen eines Zustandsraummodelles

$\boxed{\dot{x} = A \cdot x + B \cdot u}$ ← Systemverhalten (physikalisch Motiviert)

$y = C \cdot x + D \cdot u$

y: Ausgangsvektor / Messvektor
Messgrößen

C: Messmatrix

D: Durchgriff

Aufgabe 2: Zustandsraum-Modelle

Gegeben sind die vier folgenden Übertragungsfunktionen

1. $H_1 : \mathbb{C} \to \mathbb{C}, \quad H_1(s) = \frac{1}{s^2}$
2. $H_2 : \mathbb{C} \to \mathbb{C}, \quad H_2(s) = \frac{(s+1)^2}{(s-1)^2}$
3. $H_3 : \mathbb{C} \to \mathbb{C}, \quad H_3(s) = \frac{\omega^2}{s^2+2D\omega s+\omega^2}, \quad \omega, D > 0$
4. $H_4 : \mathbb{C} \to \mathbb{C}, \quad H_4(s) = \frac{s+1}{s^2+2D\omega s+\omega^2}, \quad \omega, D > 0$

a) Bestimmen Sie aus den Übertragungsfunktionen 1. - 3. jeweils das zugehörige Zustandsraummodell

b) Betrachten Sie das System $Y(s) = H_1(s) \cdot U_1(s) + H_3(s) \cdot U_2(s)$ und bestimmen dessen Zustandsraummodell

c) Betrachten Sie das System $Y(s) = H_3(s) \cdot U_1(s) + H_4(s) \cdot U_2(s)$ und bestimmen dessen Zustandsraummodell

d) Berechnen Sie das Zustandssignal $\varphi(t, x_0, u)$ von System 1 für das Eingangssignal $u(t) = u_0 \cdot \sin(\omega t)$

Aufgabe 2: Zustandsraum-Modelle

Aus der 2. Vorlesung (Vorgriff):

- Die allgemein propere Übertragungsfunktion $H(s)$ lässt sich immer in folgende Summe zerlegen:

Zählergrad ≤ Nennergrad

$$H(s) = \frac{b_n s^n + b_{n-1} s^{n-1} + \dots + b_1 s + b_0}{a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_1 s + a_0} = \underbrace{\overset{\text{Konst.}}{\frac{b_n}{a_n}}}_{D} + \boxed{\underbrace{\frac{\tilde{b}_{n-1} s^{n-1} + \dots + \tilde{b}_1 s + \tilde{b}_0}{s^n + \tilde{a}_{n-1} s^{n-1} + \dots + \tilde{a}_1 s + \tilde{a}_0}}_{\widetilde{H}(s)}}$$

- Mit den Konstanten: $\boxed{\tilde{a}_k = \frac{a_k}{a_n}, \; b_k = \frac{b_k - b_n \tilde{a}_k}{a_n}}$ $k < n$

Zählergrad < Nennergrad

- Die Übertragungsfunktion $\widetilde{H}(s)$ wird dabei als streng proper bezeichnet

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} \longrightarrow Y(s) = G(s) \cdot U(s)$$

Aufgabe 2: Zustandsraum-Modelle

Aus der Vorlesung 2 ist außerdem bekannt:

- Eine streng propere Übertragungsfunktion $\tilde{H}(s)$ kann unmittelbar in ein Zustandsraummodell (genauer: in dessen Beobachtungsnormalform – RT) überführt werden:

$$A = \begin{pmatrix} 0 & \dots & 0 & -\tilde{a}_0 \\ 1 & & & \vdots \\ & \ddots & & \vdots \\ & & 1 & -\tilde{a}_{n-1} \end{pmatrix}, \; B = \begin{pmatrix} \tilde{b}_0 \\ \vdots \\ \vdots \\ \tilde{b}_{n-1} \end{pmatrix},$$

$$C = \begin{pmatrix} 0 & \dots & 0 & 1 \end{pmatrix}, D = (0)$$

- Im Fall $b_n = 0$ gilt $H(s) = \tilde{H}(s)$, sodass das System streng proper ist und die Beobachtungsnormalform dem Zustandsraummodell entspricht
- Im Fall $b_n \neq 0$ ändert sich gegenüber der Beobachtungsnormalform nur: $D = \left(\frac{b_n}{a_n}\right)$

Aufgabe 2: Zustandsraum-Modelle

a1) $H_1 : \mathbb{C} \to \mathbb{C}, \quad H_1(s) = \frac{1}{s^2}$

$$A = \underbrace{\begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}}_{\text{Integrator}} \qquad B = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \qquad C = \begin{pmatrix} 0 & 1 \end{pmatrix} \qquad D = \begin{pmatrix} 0 \end{pmatrix}$$

Aufgabe 2: Zustandsraum-Modelle

a2) $H_2 : \mathbb{C} \to \mathbb{C}, \quad H_2(s) = \frac{(s+1)^2}{(s-1)^2}$

$$H_2(s) = \frac{s^2+2s+1}{s^2-2s+1} = 1 + \frac{4s}{s^2-2s+1}$$

$$A = \begin{pmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 2 \end{pmatrix} \qquad B = \begin{pmatrix} 0 \\ 4 \end{pmatrix} \qquad C = \begin{pmatrix} 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$D = \begin{pmatrix} 1 \end{pmatrix}$$

Aufgabe 2: Zustandsraum-Modelle

a3) $H_3 : \mathbb{C} \to \mathbb{C}, \quad H_3(s) = \frac{\omega^2}{s^2+2\underset{d}{\cancel{D}}\omega s+\omega^2}, \quad \omega, D > 0$

$$A = \begin{pmatrix} 0 & -\omega^2 \\ 1 & -2d\omega \end{pmatrix} \qquad B = \begin{pmatrix} \omega^2 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$C = \begin{pmatrix} 0 & 1 \end{pmatrix} \qquad D = \begin{pmatrix} 0 \end{pmatrix}$$

Aufgabe 2: Zustandsraum-Modelle

b) Betrachten Sie das System $Y(s) = H_1(s) \cdot U_1(s) + H_3(s) \cdot U_2(s)$ und bestimmen dessen Zustandsraummodell

$$H_1: \quad \dot{x}_1 = \underbrace{\begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}}_{A_1} x + \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} u_1 \quad \Big/ \quad H_3: \quad \dot{x}_2 = \underbrace{\begin{pmatrix} 0 & -\omega^2 \\ 1 & -2D\omega \end{pmatrix}}_{A_2} x + \begin{pmatrix} \omega^2 \\ 0 \end{pmatrix} u_2$$

$$\begin{pmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_1 & 0 \\ 0 & A_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} B_1 & 0 \\ 0 & B_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \end{pmatrix} \qquad \begin{pmatrix} B_1 \\ B_2 \end{pmatrix} u$$

$$y = \begin{pmatrix} C_1 & C_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} D_1 & D_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \end{pmatrix}$$

Aufgabe 2: Zustandsraum-Modelle

b) Betrachten Sie das System $Y(s) = H_1(s) \cdot U_1(s) + H_3(s) \cdot U_2(s)$ und bestimmen dessen Zustandsraummodell

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\omega^2 \\ 0 & 0 & 1 & -2d\omega \end{pmatrix} \qquad B = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & \omega^2 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$$

$$C = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 1 \end{pmatrix} \qquad D = \begin{pmatrix} 0 & 0 \end{pmatrix}$$

Aufgabe 2: Zustandsraum-Modelle

c) Betrachten Sie das System $Y(s) = H_3(s) \cdot U_1(s) + H_4(s) \cdot U_2(s)$ und bestimmen dessen Zustandsraummodell

$$H_4 = \frac{s+1}{s^2 + 2d\omega s + \omega^2} \qquad H_3 = \frac{\omega^2}{s^2 + 2d\omega s + \omega^2}$$

$A \longrightarrow$ Eigenwerte $\hat{=}$ Polstellen der ÜF

$$Y(s) = \frac{\omega^2}{s^2 + 2d\omega s + \omega^2} U_1(s) + \frac{s+1}{s^2 + 2d\omega s + \omega^2} U_2(s)$$

$$= \frac{\omega^2 U_1(s) + (s+1) U_2(s)}{s^2 + 2d\omega s + \omega^2}$$

Aufgabe 2: Zustandsraum-Modelle

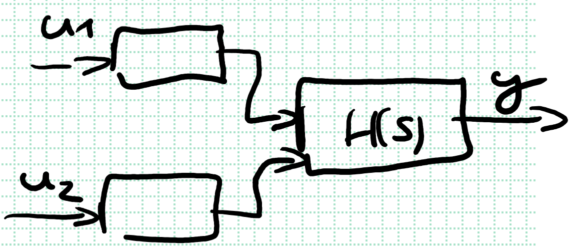
c) Betrachten Sie das System $Y(s) = H_3(s) \cdot U_1(s) + H_4(s) \cdot U_2(s)$ und bestimmen dessen Zustandsraummodell

$$A = \begin{pmatrix} 0 & -\omega^2 \\ 1 & -2d\omega \end{pmatrix} \qquad B = \begin{pmatrix} \omega^2 & 1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \qquad C = \begin{pmatrix} 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$D = \begin{pmatrix} 0 & 0 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & -\omega^2 \\ 1 & -2D\omega \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \omega^2 & 1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \end{pmatrix}$$

$$y = \begin{pmatrix} 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \end{pmatrix}$$



Aufgabe 2: Zustandsraum-Modelle

d) Berechnen Sie das Zustandssignal $\varphi(t, x_0, u)$ von System 1 für das Eingangssignal $u(t) = u_0 \cdot \sin(\omega t)$

$\varphi(t, x_0, u) \hat{=} x(t)$

$\dot{x} = Ax + Bu$

$u(t) = e^{i\omega t} \cdot u_0$

$\underbrace{\psi(t, x_0, u)}_{\text{Ausgangssignal}} = \underbrace{H(i\omega)} \cdot u(t)$

$H(s) = C(sI - A)^{-1}B + D$

$C = I$

$D = 0$

Zustandssignal $\varphi(t, x_0, u)$

$H_z(s) = (sI - A)^{-1}B$

Aufgabe 2: Zustandsraum-Modelle

d) Berechnen Sie das Zustandssignal $\varphi(t, x_0, u)$ von System 1 für das Eingangssignal $u(t) = u_0 \cdot \sin(\omega t)$

$$\tilde{u}(t) = e^{i\omega t} \cdot u_0 = [\cos(\omega t) + i \cdot \sin(\omega t)] u_0$$

$$u(t) = \operatorname{Im}\{\tilde{u}(t)\}$$

$$\varphi(t, x_0, u) = \operatorname{Im}\{\tilde{\varphi}(t, x_0, \tilde{u})\}$$

$H(i\omega)$:

$$\left[\begin{pmatrix} i\omega & 0 \\ 0 & i\omega \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}\right]^{-1} \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -i \cdot \frac{1}{\omega} \\ -\frac{1}{\omega^2} \end{pmatrix}$$

Aufgabe 2: Zustandsraum-Modelle

d) Berechnen Sie das Zustandssignal $\varphi(t, x_0, u)$ von System 1 für das Eingangssignal $u(t) = u_0 \cdot \sin(\omega t)$

$$\tilde{\varphi}(t, x_0, \tilde{u}) = \begin{pmatrix} -i \cdot \frac{1}{\omega} \\ -\frac{1}{\omega^2} \end{pmatrix} \left[\cos(\omega t) + i \cdot \sin(\omega t)\right] u_0$$

$$H(i\omega) \qquad \cdot \qquad \tilde{u}(t)$$

$$= \begin{pmatrix} \frac{\sin(\omega t)}{\omega} - i \cdot \frac{\cos(\omega t)}{\omega} \\ -\frac{\cos(\omega t)}{\omega^2} - i \cdot \frac{\sin(\omega t)}{\omega^2} \end{pmatrix} u_0$$

$$\varphi(t, x_0, u) = \mathrm{Im}\{\tilde{\varphi}(t, x_0, \tilde{u})\}$$

$$\boxed{= \begin{pmatrix} -\frac{\cos(\omega t)}{\omega} \\ -\frac{\sin(\omega t)}{\omega^2} \end{pmatrix} u_0}$$