

Konstantin Wrede

TU Dresden, Institut für Regelungs- und Steuerungstheorie

Verteidigung der Studienarbeit: Modellbildung und Reglerentwurf für ein Brückenkransystem

Dresden, XX. November 2022

Gliederung

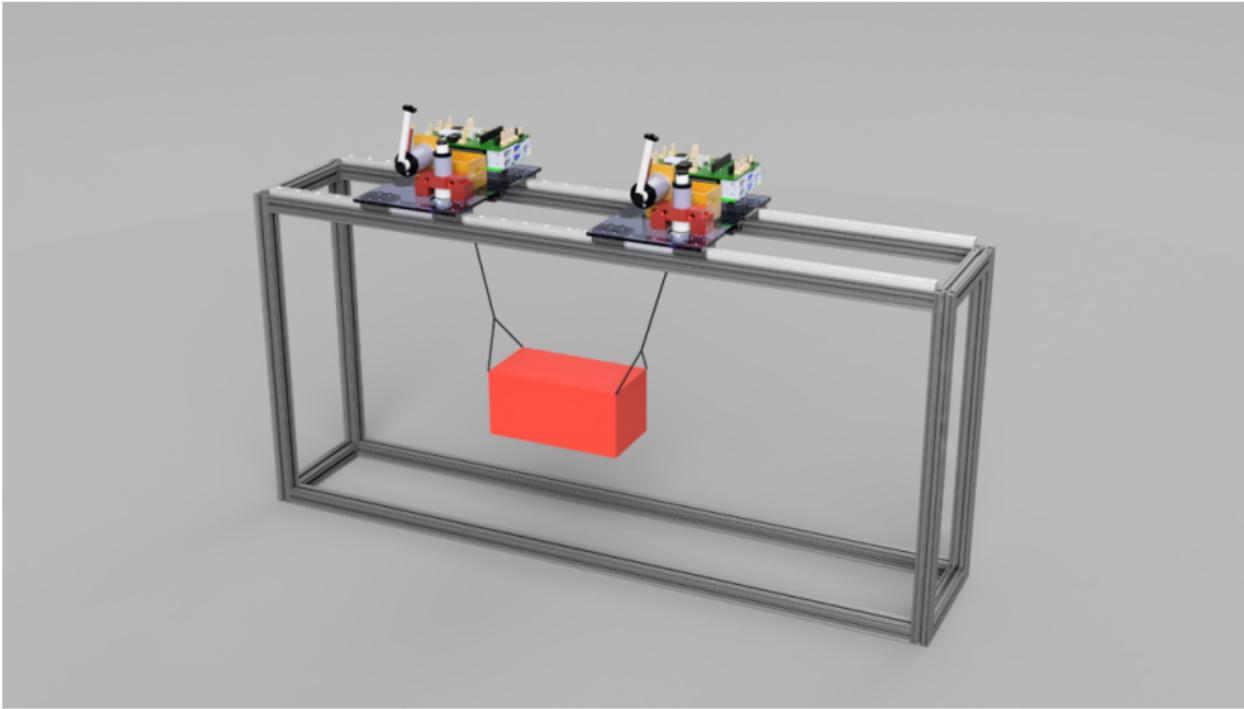
- System- und Problembeschreibung
- Analytische Modellbildung
- Flachheitsanalyse
- Steuerungs- und Regelungsentwurf

Gliederung

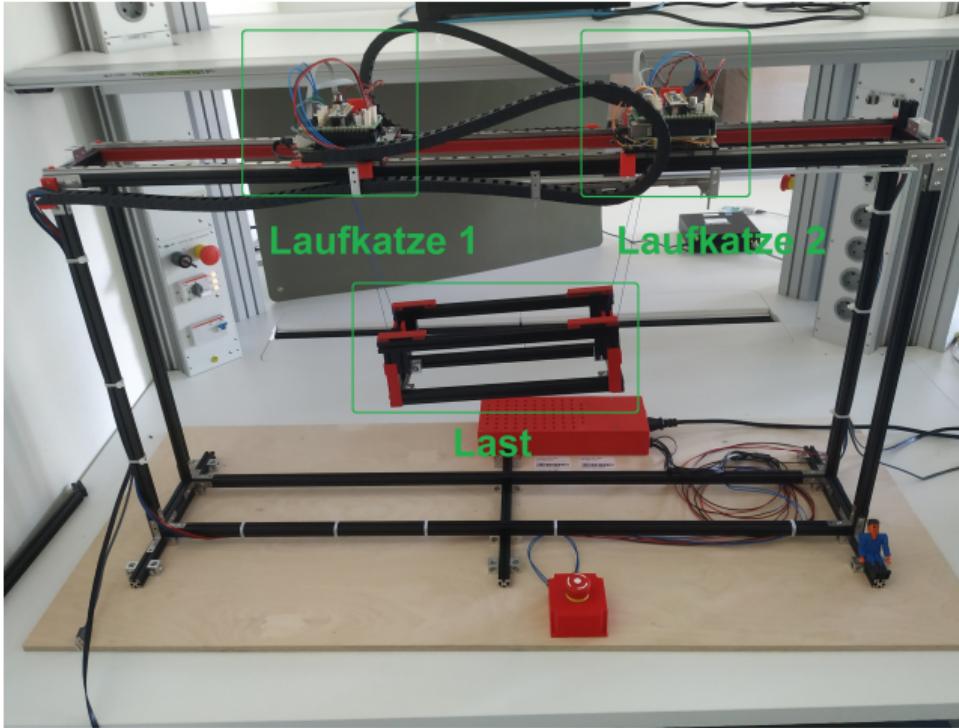
→ System- und Problembeschreibung

- Analytische Modellbildung
- Flachheitsanalyse
- Steuerungs- und Regelungsentwurf

System- und Problembeschreibung



System- und Problembeschreibung



System- und Problembeschreibung

Zielsetzung

- Ruckarme Überführung der Last zwischen Ruhelagen in der vertikalen Aufhangungsebene

System- und Problembeschreibung

Zielsetzung

- Ruckarme Überführung der Last zwischen Ruhelagen in der vertikalen Aufhängungsebene
- Zentrale Trajektorienplanung und Referenzregelstrategie unter Vorgabe von Sollposen der Last

System- und Problembeschreibung

Zielsetzung

- Ruckarme Überführung der Last zwischen Ruhelagen in der vertikalen Aufhängungsebene
- Zentrale Trajektorienplanung und Referenzregelstrategie unter Vorgabe von Sollposen der Last
- Regelungsentwurf auf Basis von Modellierung des Versuchsstands als Mehrkörpersystem

System- und Problembeschreibung

Zielsetzung

- Ruckarme Überführung der Last zwischen Ruhelagen in der vertikalen Aufhängungsebene
- Zentrale Trajektorienplanung und Referenzregelstrategie unter Vorgabe von Sollposen der Last
- Regelungsentwurf auf Basis von Modellierung des Versuchsstands als Mehrkörpersystem
- Perspektivisch Vergleich der zentralen Regelung mit verteilten Regelungsansätzen und Grundlage für maschinelles Lernen

Gliederung

System- und Problembeschreibung

→ **Analytische Modellbildung**

Flachheitsanalyse

Steuerungs- und Regelungsentwurf

Analytische Modellbildung

Allgemeine Modellannahmen

- Bewegung des Systems auf vertikale Ebene beschränkt

Analytische Modellbildung

Allgemeine Modellannahmen

- Bewegung des Systems auf vertikale Ebene beschränkt
- Seile mit vernachlässigbarer Masse gegenüber Laufkatzen, Last

Analytische Modellbildung

Allgemeine Modellannahmen

- Bewegung des Systems auf vertikale Ebene beschränkt
- Seile mit vernachlässigbarer Masse gegenüber Laufkatzen, Last
- Last trotz Aussparungen mit homogener Masseverteilung modelliert

Analytische Modellbildung

Allgemeine Modellannahmen

- Bewegung des Systems auf vertikale Ebene beschränkt
- Seile mit vernachlässigbarer Masse gegenüber Laufkatzen, Last
- Last trotz Aussparungen mit homogener Masseverteilung modelliert
- Vernachlässigung dissipativer Kräfte

Analytische Modellbildung

Allgemeine Modellannahmen

- Bewegung des Systems auf vertikale Ebene beschränkt
- Seile mit vernachlässigbarer Masse gegenüber Laufkatzen, Last
- Last trotz Aussparungen mit homogener Masseverteilung modelliert
- Vernachlässigung dissipativer Kräfte

Vorgehen bei der Modellierung

- Modellierung Einzelkran mit Lagrange-Gleichungen zweiter Art (LG2)

Analytische Modellbildung

Allgemeine Modellannahmen

- Bewegung des Systems auf vertikale Ebene beschränkt
- Seile mit vernachlässigbarer Masse gegenüber Laufkatzen, Last
- Last trotz Aussparungen mit homogener Masseverteilung modelliert
- Vernachlässigung dissipativer Kräfte

Vorgehen bei der Modellierung

- Modellierung Einzelkran mit Lagrange-Gleichungen zweiter Art (LG2)
- Modellierung Doppelkran mit LG2

Analytische Modellbildung

Allgemeine Modellannahmen

- Bewegung des Systems auf vertikale Ebene beschränkt
- Seile mit vernachlässigbarer Masse gegenüber Laufkatzen, Last
- Last trotz Aussparungen mit homogener Masseverteilung modelliert
- Vernachlässigung dissipativer Kräfte

Vorgehen bei der Modellierung

- Modellierung Einzelkran mit Lagrange-Gleichungen zweiter Art (LG2)
- Modellierung Doppelkran mit LG2
- (Modellierung Doppelkran mit Lagrange-Gleichungen erster Art)

Lagrange-Formalismus

Symbol

- Konfigurationskoordinaten $\theta = (\mathbf{q}, \mathbf{p})^T$

Lagrange-Formalismus

Symbole

- Konfigurationskoordinaten $\theta = (q, p)^T$
- direkt aktuierte Koordinaten q , nicht direkt aktuierte Koordinaten p

Lagrange-Formalismus

Symbole

- Konfigurationskoordinaten $\theta = (q, p)^T$
- direkt aktivierte Koordinaten q , nicht direkt aktivierte Koordinaten p
- kinetische Energie $T(\theta, \dot{\theta})$, potentielle Energie $V(\theta)$

Lagrange-Formalismus

Symbole

- Konfigurationskoordinaten $\theta = (q, p)^T$
- direkt aktivierte Koordinaten q , nicht direkt aktivierte Koordinaten p
- kinetische Energie $T(\theta, \dot{\theta})$, potentielle Energie $V(\theta)$
- Lagrange-Funktion $\mathcal{L}(\theta, \dot{\theta}) = T(\theta, \dot{\theta}) - V(\theta)$

Lagrange-Formalismus

Symbole

- Konfigurationskoordinaten $\theta = (q, p)^T$
- direkt aktivierte Koordinaten q , nicht direkt aktivierte Koordinaten p
- kinetische Energie $T(\theta, \dot{\theta})$, potentielle Energie $V(\theta)$
- Lagrange-Funktion $\mathcal{L}(\theta, \dot{\theta}) = T(\theta, \dot{\theta}) - V(\theta)$
- verallgemeinerte Kraft $Q = f - D$

Lagrange-Formalismus

Symbole

- Konfigurationskoordinaten $\theta = (q, p)^T$
- direkt aktivierte Koordinaten q , nicht direkt aktivierte Koordinaten p
- kinetische Energie $T(\theta, \dot{\theta})$, potentielle Energie $V(\theta)$
- Lagrange-Funktion $\mathcal{L}(\theta, \dot{\theta}) = T(\theta, \dot{\theta}) - V(\theta)$
- verallgemeinerte Kraft $Q = f - D$
- äußere Stellkraft f , interne Reibungskraft D

Lagrange-Formalismus

Symbole

- Konfigurationskoordinaten $\theta = (q, p)^T$
- direkt aktivierte Koordinaten q , nicht direkt aktivierte Koordinaten p
- kinetische Energie $T(\theta, \dot{\theta})$, potentielle Energie $V(\theta)$
- Lagrange-Funktion $\mathcal{L}(\theta, \dot{\theta}) = T(\theta, \dot{\theta}) - V(\theta)$
- verallgemeinerte Kraft $Q = f - D$
- äußere Stellkraft f , interne Reibungskraft D

Lagrange-Gleichungen zweiter Art

Lagrange-Formalismus

Symbole

- Konfigurationskoordinaten $\theta = (q, p)^T$
- direkt aktivierte Koordinaten q , nicht direkt aktivierte Koordinaten p
- kinetische Energie $T(\theta, \dot{\theta})$, potentielle Energie $V(\theta)$
- Lagrange-Funktion $\mathcal{L}(\theta, \dot{\theta}) = T(\theta, \dot{\theta}) - V(\theta)$
- verallgemeinerte Kraft $Q = f - D$
- äußere Stellkraft f , interne Reibungskraft D

Lagrange-Gleichungen zweiter Art

- θ sind unabhängig (ohne Zwangsbedingung verkoppelt)

Lagrange-Formalismus

Symbole

- Konfigurationskoordinaten $\theta = (q, p)^T$
- direkt aktivierte Koordinaten q , nicht direkt aktivierte Koordinaten p
- kinetische Energie $T(\theta, \dot{\theta})$, potentielle Energie $V(\theta)$
- Lagrange-Funktion $\mathcal{L}(\theta, \dot{\theta}) = T(\theta, \dot{\theta}) - V(\theta)$
- verallgemeinerte Kraft $Q = f - D$
- äußere Stellkraft f , interne Reibungskraft D

Lagrange-Gleichungen zweiter Art

- θ sind unabhängig (ohne Zwangsbedingung verkoppelt)
- Bewegungsgleichungen:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{\theta}_i} \right) - \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \theta_i} = Q_i, \quad i = 1, \dots, n$$

Lagrange-Formalismus

Symbole

- Konfigurationskoordinaten $\theta = (q, p)^T$
- direkt aktivierte Koordinaten q , nicht direkt aktivierte Koordinaten p
- kinetische Energie $T(\theta, \dot{\theta})$, potentielle Energie $V(\theta)$
- Lagrange-Funktion $\mathcal{L}(\theta, \dot{\theta}) = T(\theta, \dot{\theta}) - V(\theta)$
- verallgemeinerte Kraft $Q = f - D$
- äußere Stellkraft f , interne Reibungskraft D

Lagrange-Gleichungen zweiter Art

- θ sind unabhängig (ohne Zwangsbedingung verkoppelt)
- Bewegungsgleichungen:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{\theta}_i} \right) - \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \theta_i} = Q_i, \quad i = 1, \dots, n$$

- Woher Q_i ?

Lagrange-Formalismus

Symbole

- Konfigurationskoordinaten $\theta = (q, p)^T$
- verallgemeinerte Kraft $Q = f - D$

Lagrange-Formalismus

Symbole

- Konfigurationskoordinaten $\theta = (q, p)^T$
- verallgemeinerte Kraft $Q = f - D$
- Richtungsvektor zu k -tem massebehaftetem Partikel r_k , Stellkraft F_k entlang r_k

Lagrange-Formalismus

Symbole

- Konfigurationskoordinaten $\theta = (q, p)^T$
- verallgemeinerte Kraft $Q = f - D$
- Richtungsvektor zu k -tem massebehaftetem Partikel r_k , Stellkraft F_k entlang r_k
- virtuelle Arbeit δW , virtuelle Verschiebung von Partikel δr_k und Koordinate θ_i

Lagrange-Formalismus

Symbole

- Konfigurationskoordinaten $\theta = (\mathbf{q}, \mathbf{p})^T$
- verallgemeinerte Kraft $\mathbf{Q} = \mathbf{f} - \mathbf{D}$
- Richtungsvektor zu k -tem massebehaftetem Partikel \mathbf{r}_k , Stellkraft \mathbf{F}_k entlang \mathbf{r}_k
- virtuelle Arbeit δW , virtuelle Verschiebung von Partikel $\delta \mathbf{r}_k$ und Koordinate θ_i

Prinzip der virtuellen Arbeit zur Bestimmung der Q_i

Lagrange-Formalismus

Symbole

- Konfigurationskoordinaten $\theta = (\mathbf{q}, \mathbf{p})^T$
- verallgemeinerte Kraft $\mathbf{Q} = \mathbf{f} - \mathbf{D}$
- Richtungsvektor zu k -tem massebehaftetem Partikel \mathbf{r}_k , Stellkraft \mathbf{F}_k entlang \mathbf{r}_k
- virtuelle Arbeit δW , virtuelle Verschiebung von Partikel $\delta \mathbf{r}_k$ und Koordinate θ_i

Prinzip der virtuellen Arbeit zur Bestimmung der Q_i

- $\delta W = \sum_{k=1}^l \mathbf{F}_k \cdot \frac{\partial \mathbf{r}_k}{\partial \theta_1} \delta \theta_1 + \dots + \sum_{k=1}^l \mathbf{F}_k \cdot \frac{\partial \mathbf{r}_k}{\partial \theta_n} \delta \theta_n$

Lagrange-Formalismus

Symbole

- Konfigurationskoordinaten $\theta = (\mathbf{q}, \mathbf{p})^T$
- verallgemeinerte Kraft $\mathbf{Q} = \mathbf{f} - \mathbf{D}$
- Richtungsvektor zu k -tem massebehaftetem Partikel \mathbf{r}_k , Stellkraft \mathbf{F}_k entlang \mathbf{r}_k
- virtuelle Arbeit δW , virtuelle Verschiebung von Partikel $\delta \mathbf{r}_k$ und Koordinate θ_i

Prinzip der virtuellen Arbeit zur Bestimmung der Q_i

- $\delta W = \sum_{k=1}^l \mathbf{F}_k \cdot \frac{\partial \mathbf{r}_k}{\partial \theta_1} \delta \theta_1 + \dots + \sum_{k=1}^l \mathbf{F}_k \cdot \frac{\partial \mathbf{r}_k}{\partial \theta_n} \delta \theta_n$
- $\delta \mathbf{r}_k = \sum_{i=1}^n \frac{\partial \mathbf{r}_k}{\partial \theta_i} \delta \theta_i$

Lagrange-Formalismus

Symbole

- Konfigurationskoordinaten $\theta = (\mathbf{q}, \mathbf{p})^T$
- verallgemeinerte Kraft $\mathbf{Q} = \mathbf{f} - \mathbf{D}$
- Richtungsvektor zu k -tem massebehaftetem Partikel \mathbf{r}_k , Stellkraft \mathbf{F}_k entlang \mathbf{r}_k
- virtuelle Arbeit δW , virtuelle Verschiebung von Partikel $\delta \mathbf{r}_k$ und Koordinate θ_i

Prinzip der virtuellen Arbeit zur Bestimmung der Q_i

- $\delta W = \sum_{k=1}^l \mathbf{F}_k \cdot \frac{\partial \mathbf{r}_k}{\partial \theta_1} \delta \theta_1 + \dots + \sum_{k=1}^l \mathbf{F}_k \cdot \frac{\partial \mathbf{r}_k}{\partial \theta_n} \delta \theta_n$
- $\delta \mathbf{r}_k = \sum_{i=1}^n \frac{\partial \mathbf{r}_k}{\partial \theta_i} \delta \theta_i$
- $\delta W = \sum_{k=1}^l \delta \mathbf{r}_k^T \mathbf{F}_k = Q_1 \delta \theta_1 + \dots + Q_n \delta \theta_n$

Lagrange-Formalismus

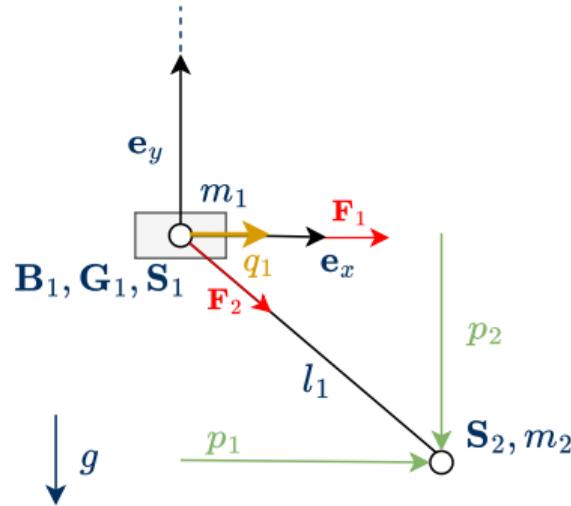
Symbole

- Konfigurationskoordinaten $\theta = (\mathbf{q}, \mathbf{p})^T$
- verallgemeinerte Kraft $\mathbf{Q} = \mathbf{f} - \mathbf{D}$
- Richtungsvektor zu k -tem massebehaftetem Partikel \mathbf{r}_k , Stellkraft \mathbf{F}_k entlang \mathbf{r}_k
- virtuelle Arbeit δW , virtuelle Verschiebung von Partikel $\delta \mathbf{r}_k$ und Koordinate θ_i

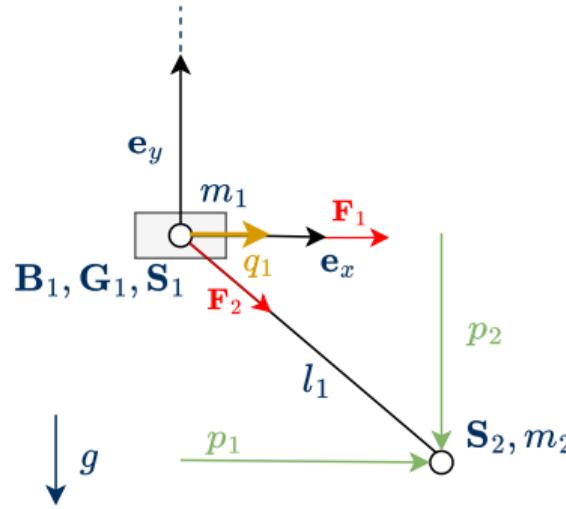
Prinzip der virtuellen Arbeit zur Bestimmung der Q_i

- $\delta W = \sum_{k=1}^l \mathbf{F}_k \cdot \frac{\partial \mathbf{r}_k}{\partial \theta_1} \delta \theta_1 + \dots + \sum_{k=1}^l \mathbf{F}_k \cdot \frac{\partial \mathbf{r}_k}{\partial \theta_n} \delta \theta_n$
 - $\delta \mathbf{r}_k = \sum_{i=1}^n \frac{\partial \mathbf{r}_k}{\partial \theta_i} \delta \theta_i$
 - $\delta W = \sum_{k=1}^l \delta \mathbf{r}_k^T \mathbf{F}_k = Q_1 \delta \theta_1 + \dots + Q_n \delta \theta_n$
- $$\rightarrow Q_i = \sum_{k=1}^l \left(\frac{\partial \mathbf{r}_k}{\partial \theta_i} \right)^T \mathbf{F}_k = \frac{\partial \delta W}{\partial \delta \theta_i}, \quad i = 1, \dots, n$$

Analytisches Modell Einzelkran

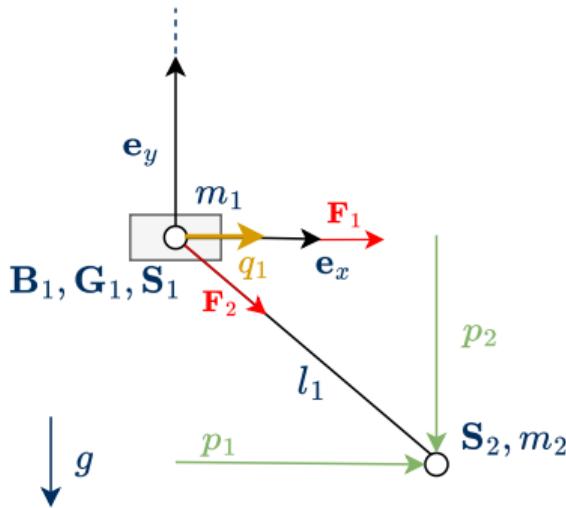


Analytisches Modell Einzelkran



- Massen bei $\mathbf{S}_1 = (q_1, 0)^T, \mathbf{S}_2 = (p_1, p_2)^T$
- variable Seillänge $l_1 = \sqrt{(p_1 - q_1)^2 + p_2^2}$

Analytisches Modell Einzelkran

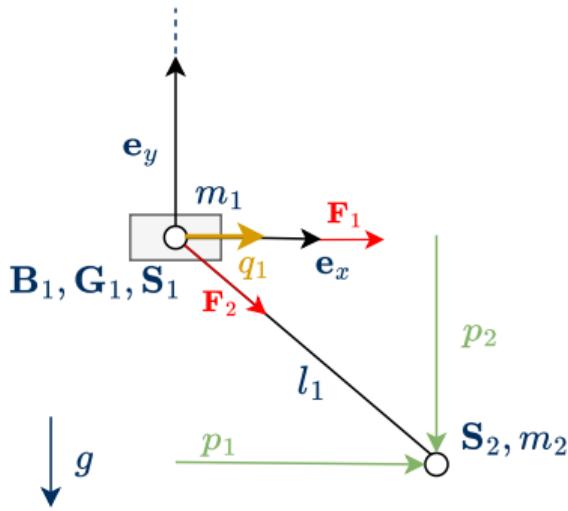


Energien:

- $T = \frac{m_1}{2} \dot{\mathbf{S}}_1^T \dot{\mathbf{S}}_1 + \frac{m_2}{2} \dot{\mathbf{S}}_2^T \dot{\mathbf{S}}_2 = \frac{m_1 \dot{q}_1^2}{2} + \frac{m_2 \dot{p}_1^2}{2} + \frac{m_2 \dot{p}_2^2}{2}$
- $V = m_2 g \mathbf{S}_2^T \mathbf{e}_y = m_2 g p_2$

- Massen bei $\mathbf{S}_1 = (q_1, 0)^T, \mathbf{S}_2 = (p_1, p_2)^T$
- variable Seillänge $l_1 = \sqrt{(p_1 - q_1)^2 + p_2^2}$

Analytisches Modell Einzelkran



Energien:

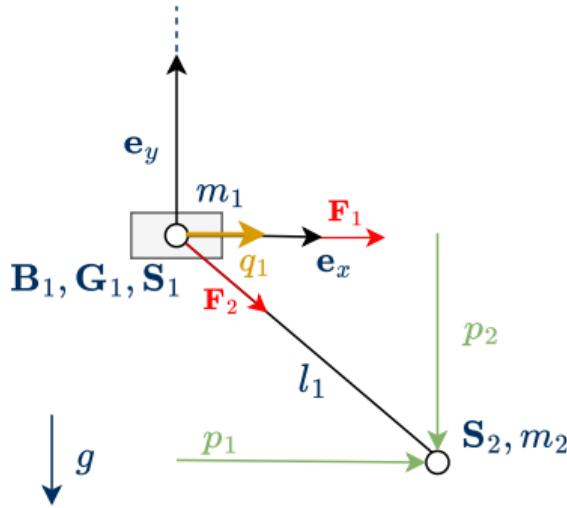
- $T = \frac{m_1}{2} \dot{\mathbf{S}}_1^T \dot{\mathbf{S}}_1 + \frac{m_2}{2} \dot{\mathbf{S}}_2^T \dot{\mathbf{S}}_2 = \frac{m_1 \dot{q}_1^2}{2} + \frac{m_2 \dot{p}_1^2}{2} + \frac{m_2 \dot{p}_2^2}{2}$
- $V = m_2 g \mathbf{S}_2^T \mathbf{e}_y = m_2 g p_2$

Verallgemeinerte Kraft aus virtueller Arbeit:

- $\mathbf{F}_1 = (\tau_1, 0)^T, \mathbf{F}_2 = \left(\frac{\tau_2(p_1 - q_1)}{l_1}, \frac{p_2 \tau_2}{l_1} \right)^T$
 $\rightarrow \mathbf{Q} = \left(\frac{\tau_2(p_1 - q_1)}{l_1}, \frac{p_2 \tau_2}{l_1}, \tau_1 - \frac{\tau_2(p_1 - q_1)}{l_1} \right)^T$

- Massen bei $\mathbf{S}_1 = (q_1, 0)^T, \mathbf{S}_2 = (p_1, p_2)^T$
- variable Seillänge $l_1 = \sqrt{(p_1 - q_1)^2 + p_2^2}$

Analytisches Modell Einzelkran



Systemgleichungen aus LG2:

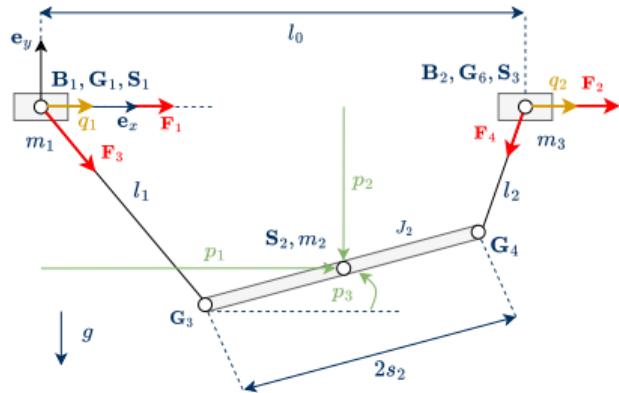
$$m_2 \ddot{p}_1 - \frac{\tau_2 (p_1 - q_1)}{l_1} = 0$$

$$gm_2 + m_2 \ddot{p}_2 - \frac{p_2 \tau_2}{l_1} = 0$$

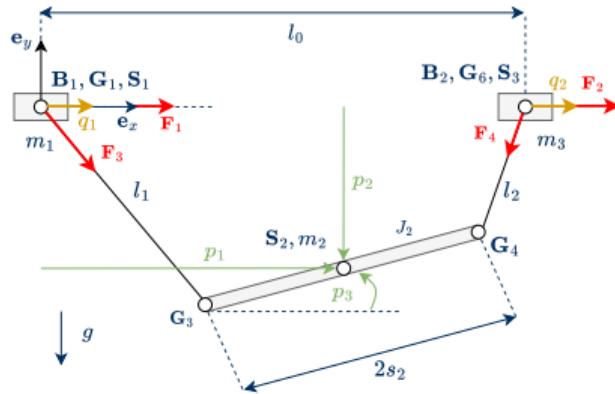
$$m_1 \ddot{q}_1 - \tau_1 + \frac{\tau_2 (p_1 - q_1)}{l_1} = 0$$

- Massen bei $\mathbf{S}_1 = (q_1, 0)^T$, $\mathbf{S}_2 = (p_1, p_2)^T$
- variable Seillänge $l_1 = \sqrt{(p_1 - q_1)^2 + p_2^2}$

Analytisches Modell Doppelkran



Analytisches Modell Doppelkran

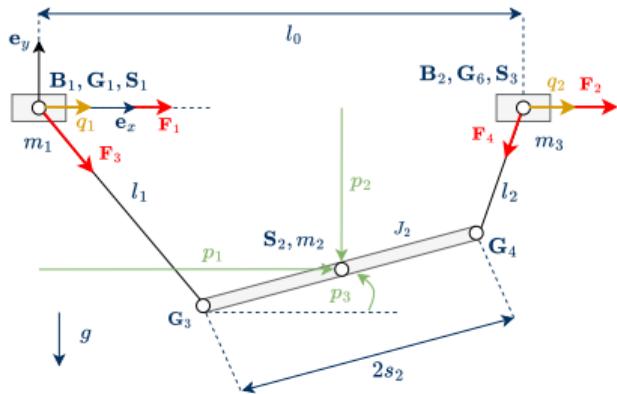


variable Seillängen:

$$l_1 = \sqrt{(p_2 - s_2 \sin(p_3))^2 + (p_1 - q_1 - s_2 \cos(p_3))^2}$$

$$l_2 = \sqrt{(p_2 + s_2 \sin(p_3))^2 + (-l_0 + p_1 - q_2 + s_2 \cos(p_3))^2}$$

Analytisches Modell Doppelkran



Energien:

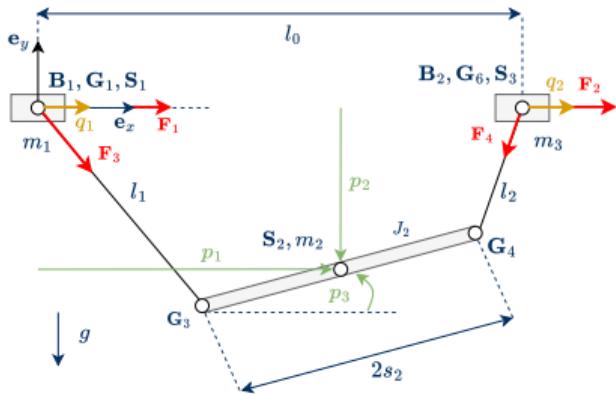
- $T = \frac{J_2 \dot{p}_3^2}{2} + \frac{m_1 \dot{q}_1^2}{2} + \frac{m_2 \dot{p}_1^2}{2} + \frac{m_2 \dot{p}_2^2}{2} + \frac{m_3 \dot{q}_2^2}{2}$
- $V = m_2 g p_2$

variable Seillängen:

$$l_1 = \sqrt{(p_2 - s_2 \sin(p_3))^2 + (p_1 - q_1 - s_2 \cos(p_3))^2}$$

$$l_2 = \sqrt{(p_2 + s_2 \sin(p_3))^2 + (-l_0 + p_1 - q_2 + s_2 \cos(p_3))^2}$$

Analytisches Modell Doppelkran



variable Seillängen:

$$l_1 = \sqrt{(p_2 - s_2 \sin(p_3))^2 + (p_1 - q_1 - s_2 \cos(p_3))^2}$$

$$l_2 = \sqrt{(p_2 + s_2 \sin(p_3))^2 + (-l_0 + p_1 - q_2 + s_2 \cos(p_3))^2}$$

Energien:

- $T = \frac{J_2 \dot{p}_3^2}{2} + \frac{m_1 \dot{q}_1^2}{2} + \frac{m_2 \dot{p}_1^2}{2} + \frac{m_2 \dot{p}_2^2}{2} + \frac{m_3 \dot{q}_2^2}{2}$
- $V = m_2 g p_2$

Stellkräfte entlang Massepartikel:

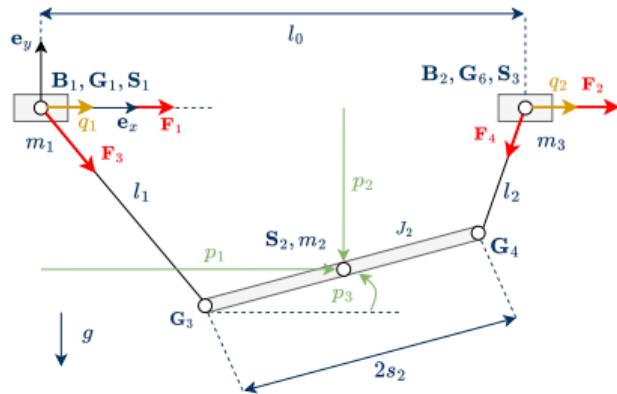
$$\mathbf{F}_1 = (\tau_1, 0)^T,$$

$$\mathbf{F}_2 = (\tau_2, 0)^T,$$

$$\mathbf{F}_3 = \begin{pmatrix} \frac{\tau_3(p_1 - q_1 - s_2 \cos(p_3))}{l_1} \\ \frac{\tau_3(p_2 - s_2 \sin(p_3))}{l_1} \end{pmatrix},$$

$$\mathbf{F}_4 = \begin{pmatrix} \frac{\tau_4(-l_0 + p_1 - q_2 + s_2 \cos(p_3))}{l_2} \\ \frac{\tau_4(p_2 + s_2 \sin(p_3))}{l_2} \end{pmatrix}$$

Analytisches Modell Doppelkran



Verallgemeinerte Kraft aus virtueller Arbeit:

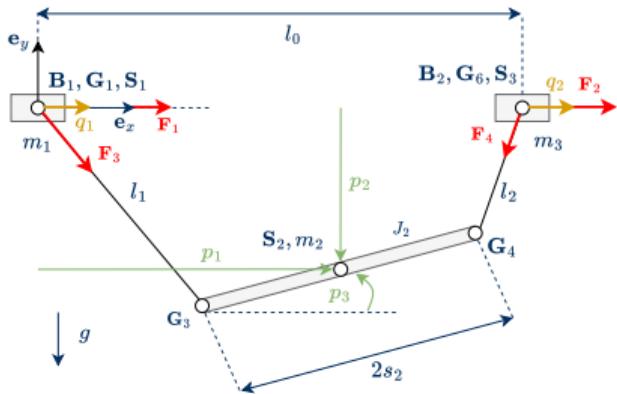
$$Q = \dots$$

variable Seillängen:

$$l_1 = \sqrt{(p_2 - s_2 \sin(p_3))^2 + (p_1 - q_1 - s_2 \cos(p_3))^2}$$

$$l_2 = \sqrt{(p_2 + s_2 \sin(p_3))^2 + (-l_0 + p_1 - q_2 + s_2 \cos(p_3))^2}$$

Analytisches Modell Doppelkran



variable Seillängen:

$$l_1 = \sqrt{(p_2 - s_2 \sin(p_3))^2 + (p_1 - q_1 - s_2 \cos(p_3))^2}$$

$$l_2 = \sqrt{(p_2 + s_2 \sin(p_3))^2 + (-l_0 + p_1 - q_2 + s_2 \cos(p_3))^2}$$

Verallgemeinerte Kraft aus virtueller Arbeit:

$$Q = \dots$$

Systemgleichungen aus LG2:

$$m_2 \ddot{p}_1 - \frac{\tau_4 (-l_0 + p_1 - q_2 + s_2 \cos p_3)}{l_2} - \frac{\tau_3 (p_1 - q_1 - s_2 \cos p_3)}{l_1} = 0$$

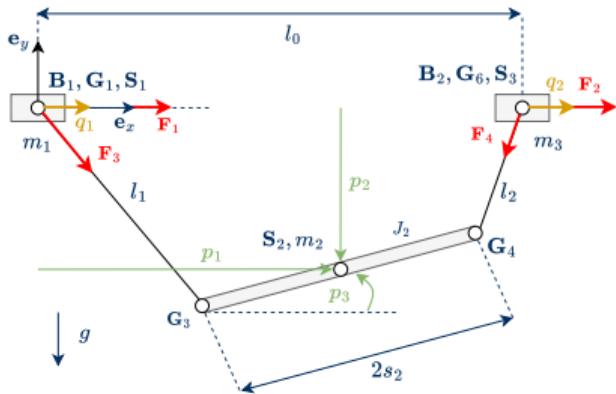
$$g m_2 + m_2 \ddot{p}_2 - \frac{\tau_4 (p_2 + s_2 \sin p_3)}{l_2} - \frac{\tau_3 (p_2 s_2 \sin p_3)}{l_1} = 0$$

$$\begin{aligned} J_2 \ddot{p}_3 - \frac{s_2 \tau_4 (p_2 + s_2 \sin p_3) \cos p_3 + s_2 \tau_4 (p_1 - q_2 + s_2 \cos p_3 - l_0)}{l_2} \\ + \frac{s_2 \tau_3 (p_2 - s_2 \sin p_3) \cos p_3}{l_1} - \frac{s_2 \tau_3 (p_1 - q_1 - s_2 \cos p_3) \sin p_3}{l_1} = 0 \end{aligned}$$

$$m_1 \ddot{q}_1 - \tau_1 + \frac{\tau_3 (p_1 - q_1 - s_2 \cos p_3)}{l_1} = 0$$

$$m_3 \ddot{q}_2 - \tau_2 + \frac{\tau_4 (-l_0 + p_1 - q_2 + s_2 \cos p_3)}{l_2} = 0$$

Analytisches Modell Doppelkran



variable Seillängen:

$$l_1 = \sqrt{(p_2 - s_2 \sin(p_3))^2 + (p_1 - q_1 - s_2 \cos(p_3))^2}$$

$$l_2 = \sqrt{(p_2 + s_2 \sin(p_3))^2 + (-l_0 + p_1 - q_2 + s_2 \cos(p_3))^2}$$

Eingangsaffines Zustandsraummodell:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}) + \mathbf{g}(\mathbf{x})\tau \text{ mit}$$

$$\mathbf{x} = (p_1, p_2, p_3, q_1, q_2, \dot{p}_1, \dot{p}_2, \dot{p}_3, \dot{q}_1, \dot{q}_2)^T,$$

$$\mathbf{f}(\mathbf{x}) = (\dot{p}_1, \dot{p}_2, \dot{p}_3, \dot{q}_1, \dot{q}_2, 0, -g, 0, 0, 0)^T,$$

$$\mathbf{g}(\mathbf{x}) = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & * & * \\ 0 & 0 & * & * \\ 0 & 0 & * & * \\ * & 0 & * & 0 \\ 0 & * & 0 & * \end{pmatrix} \quad \text{wobei } * \neq 0$$

Gliederung

- System- und Problembeschreibung
- Analytische Modellbildung
- **Flachheitsanalyse**
- Steuerungs- und Regelungsentwurf

Flachheitsanalyse

Definition differenzieller Flachheit

Ein System der Form $\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{F}(\mathbf{x}, \mathbf{u})$ mit $\mathbf{F}, \mathbf{x} \in \mathbb{R}^n$ und $\mathbf{u} \in \mathbb{R}^m$ heißt (differenziell) flach, falls ein m -Tupel $y := (y_1, \dots, y_m)^T$ sowie glatte Funktionen Ψ, θ existieren, so dass

$$\begin{aligned}\mathbf{x} &= \Psi(\mathbf{y}, \dot{\mathbf{y}}, \dots, \mathbf{y}^{(n_x)}) \text{ mit } n_x < \infty \text{ und} \\ \mathbf{u} &= \theta(\mathbf{y}, \dot{\mathbf{y}}, \dots, \mathbf{y}^{(n_u)}) \text{ mit } n_u < \infty \text{ gilt.}\end{aligned}$$

Flachheitsanalyse

Definition differenzieller Flachheit

Ein System der Form $\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{F}(\mathbf{x}, \mathbf{u})$ mit $\mathbf{F}, \mathbf{x} \in \mathbb{R}^n$ und $\mathbf{u} \in \mathbb{R}^m$ heißt (differenziell) flach, falls ein m -Tupel $\mathbf{y} := (y_1, \dots, y_m)^T$ sowie glatte Funktionen Ψ, θ existieren, so dass

$$\begin{aligned}\mathbf{x} &= \Psi(\mathbf{y}, \dot{\mathbf{y}}, \dots, \mathbf{y}^{(n_x)}) \text{ mit } n_x < \infty \text{ und} \\ \mathbf{u} &= \theta(\mathbf{y}, \dot{\mathbf{y}}, \dots, \mathbf{y}^{(n_u)}) \text{ mit } n_u < \infty \text{ gilt.}\end{aligned}$$

Erläuterungen:

- Systemzustand \mathbf{x} , Systemeingang \mathbf{u}
- **flacher Ausgang \mathbf{y}**

→ Parametrisierung aller Systemgrößen durch \mathbf{y} und endlich viele Ableitungen ohne Lösung von DGL/Integration möglich

Flachheitsanalyse von MIMO-Systemen

Prinzipielles Vorgehen

Flachheitsanalyse von MIMO-Systemen

Prinzipielles Vorgehen

- Eingangsaffines nichtlineares MIMO-System

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}) + \mathbf{g}(\mathbf{x})\mathbf{u} \quad \text{mit} \quad \mathbf{x}, \mathbf{f} \in \mathbb{R}^n, \mathbf{u} \in \mathbb{R}^m, \mathbf{g} \in \mathbb{R}^{n \times m}$$

Flachheitsanalyse von MIMO-Systemen

Prinzipielles Vorgehen

- Eingangsaffines nichtlineares MIMO-System
 $\dot{x} = f(x) + g(x)u \quad \text{mit} \quad x, f \in \mathbb{R}^n, u \in \mathbb{R}^m, g \in \mathbb{R}^{n \times m}$
- Elimination von u durch jeweils eine Systemgleichungen

Flachheitsanalyse von MIMO-Systemen

Prinzipielles Vorgehen

- Eingangsaffines nichtlineares MIMO-System
 $\dot{x} = f(x) + g(x)u \quad \text{mit} \quad x, f \in \mathbb{R}^n, u \in \mathbb{R}^m, g \in \mathbb{R}^{n \times m}$
- Elimination von u durch jeweils eine Systemgleichungen
→ autonomes System aus $p := n - m$ Gleichungen

Flachheitsanalyse von MIMO-Systemen

Prinzipielles Vorgehen

- Eingangsaffines nichtlineares MIMO-System
 $\dot{x} = f(x) + g(x)u \quad \text{mit} \quad x, f \in \mathbb{R}^n, u \in \mathbb{R}^m, g \in \mathbb{R}^{n \times m}$
- Elimination von u durch jeweils eine Systemgleichungen
→ autonomes System aus $p := n - m$ Gleichungen
- Elimination von p Zustandskomponenten und aller übrigen Systemgleichungen

Flachheitsanalyse von MIMO-Systemen

Prinzipielles Vorgehen

- Eingangsaffines nichtlineares MIMO-System
 $\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}) + \mathbf{g}(\mathbf{x})\mathbf{u}$ mit $\mathbf{x}, \mathbf{f} \in \mathbb{R}^n, \mathbf{u} \in \mathbb{R}^m, \mathbf{g} \in \mathbb{R}^{n \times m}$
- Elimination von \mathbf{u} durch jeweils eine Systemgleichungen
 - autonomes System aus $p := n - m$ Gleichungen
 - Elimination von p Zustandskomponenten und aller übrigen Systemgleichungen
 - übrig bleiben $n - p = m$ Zustandskomponenten als **flacher Ausgang y**
- Wie Systemgröße und -gleichung für Elimination auswählen?

Motivation und Rückblick (1)

Regelungstheorie hat heterogenes Methodenspektrum

- PT1-Glied, ..., nichtlineare PDEs, ...

Motivation und Rückblick (1)

Regelungstheorie hat heterogenes Methodenspektrum

- PT1-Glied, ..., nichtlineare PDEs, ... ⇒ z. T. hochspezialisierte Mathematik

Motivation und Rückblick (1)

Regelungstheorie hat heterogenes Methodenspektrum

- PT1-Glied, ..., nichtlineare PDEs, ... ⇒ z. T. hochspezialisierte Mathematik

Regelungstheorie hat heterogenes Anwendungsspektrum

- Verfahrens-, Fahrzeug-, Gebäudetechnik, Robotik, ...

Beständiger Wissenszuwachs

- überlineares Wachstum der Publikationen → Spezialisierung notwendig

Motivation und Rückblick (1)

Regelungstheorie hat heterogenes Methodenspektrum

- PT1-Glied, ..., nichtlineare PDEs, ... ⇒ z. T. hochspezialisierte Mathematik

Regelungstheorie hat heterogenes Anwendungsspektrum

- Verfahrens-, Fahrzeug-, Gebäudetechnik, Robotik, ...

Beständiger Wissenszuwachs

- überlineares Wachstum der Publikationen → Spezialisierung notwendig

⇒ Wissenstransfer: nichttrivial

- ... innerhalb der Regelungstechnik
- ... in Anwendungsdomänen

Thesen

These 1

Die gegenwärtig dominierenden Medien (Fließtext, Formeln, Grafiken) der Wissensrepräsentation sind in Bezug auf die angesprochenen Probleme suboptimal.

Thesen

These 1

Die gegenwärtig dominierenden Medien (Fließtext, Formeln, Grafiken) der Wissensrepräsentation sind in Bezug auf die angesprochenen Probleme suboptimal.

These 2

Formale Wissensrepräsentationsmethoden stellen eine vielversprechende Ergänzung dar.

Gliederung

Motivation und Rückblick

→ **Formale Wissensrepräsentation: Ist-Stand**

Ansatz: Emergent Representation of Knowledge (ERK)

Ontology of Control Systems Engineering (OCSE)

Zusammenfassung und Diskussion

Formale Wissensrepräsentation (1): Begriffe

Eine Ontologie [nach Studer et. al. 1998]

Maschinenverarbeitbare Spezifikation der begrifflichen Abdeckung einer Wissensdomäne.

→ Welche Begriffe gibt es? In welcher Beziehung stehen sie zueinander?

Formale Wissensrepräsentation (1): Begriffe

Eine Ontologie [nach Studer et. al. 1998]

Maschinenverarbeitbare Spezifikation der begrifflichen Abdeckung einer Wissensdomäne.

→ Welche Begriffe gibt es? In welcher Beziehung stehen sie zueinander?

Taxonomie

Hierarchisches Klassifikationssystem von ist-ein-Beziehungen

Beispiel: Hauskatze → Säugetier → Wirbeltier → Lebewesen

Formale Wissensrepräsentation (2): Wissensgraphen und RDF

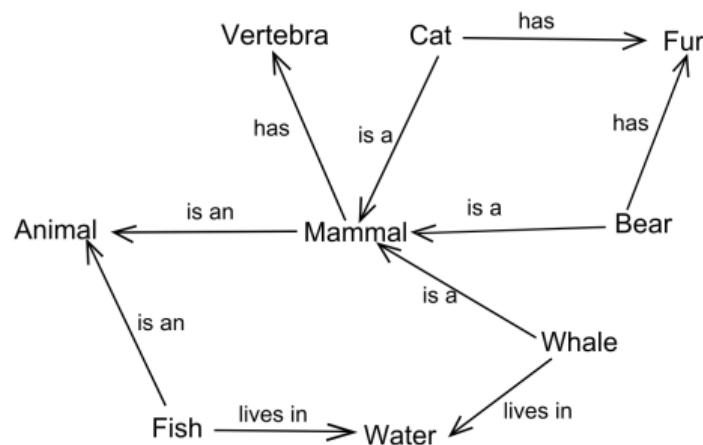
„Knowledge Graph“:

- Knoten: Begriffe
- Kanten: Beziehungen

Formale Wissensrepräsentation (2): Wissensgraphen und RDF

„Knowledge Graph“:

- Knoten: Begriffe
- Kanten: Beziehungen

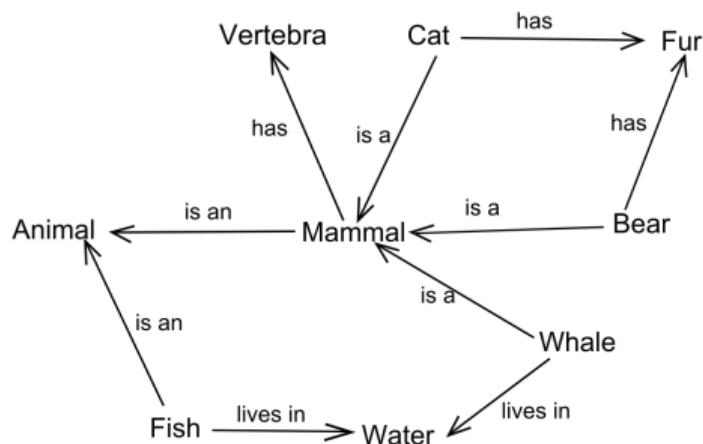


Quelle: [wikipedia.org/...](https://wikipedia.org/) (CC0)

Formale Wissensrepräsentation (2): Wissensgraphen und RDF

„Knowledge Graph“:

- Knoten: Begriffe
- Kanten: Beziehungen



Quelle: [wikipedia.org/...](https://wikipedia.org/) (CC0)

Ressource Description Framework:

- Sprache zur Beschreibung von Subjekt-Prädikat-Objekt-Tripeln



- Zugehörige Abfragesprache:

SPARQL

(SPARQL Protocol And RDF Query Language)

Formale Wissensrepräsentation (3): OWL und Inferenz

Web Ontology Language

- OWL2: definierter Standard; basiert auf RDF
 - Theoretische Basis: Beschreibungslogik(en)
 - „Profile“ mit Unterschiedlicher Ausdrucksstärke
 - Entscheidbare Fragmente der Prädikatenlogik 1. Stufe
- ⇒ Einfluss auf Komplexität von Inferenz-Algorithmen

Formale Wissensrepräsentation (3): OWL und Inferenz

Web Ontology Language

- OWL2: definierter Standard; basiert auf RDF
 - Theoretische Basis: Beschreibungslogik(en)
 - „Profile“ mit Unterschiedlicher Ausdrucksstärke
 - Entscheidbare Fragmente der Prädikatenlogik 1. Stufe
- ⇒ Einfluss auf Komplexität von Inferenz-Algorithmen

Inferenzsystem („Schließer“ bzw. Reasoner)

- Kann Schlussfolgerungen aus Behauptungen (Axiomen) ableiten
- Kann Inkonsistenzen aufdecken (widersprüchliche Axiome identifizieren)
- Kann implizit enthaltene Informationen explizit machen („Logikrätsel lösen“)

Formale Wissensrepräsentation (4): Wikidata und SPARQL

- Weltweit größter frei zugänglicher Wissensgraph
- Kollaborativ erstellt, von Wikimedia Foundation organisiert
- $\exists \text{ Items}$: u. a. zu jedem Wikipedia-Eintrag:

Formale Wissensrepräsentation (4): Wikidata und SPARQL

- Weltweit größter frei zugänglicher Wissensgraph
- Kollaborativ erstellt, von Wikimedia Foundation organisiert
- $\exists \text{ Items}$: u. a. zu jedem Wikipedia-Eintrag:
 - [https://www.wikidata.org/wiki/Q252446 Anif bei Salzburg](https://www.wikidata.org/wiki/Q252446)
 - [https://www.wikidata.org/wiki/Q4917288 Control Engineering](https://www.wikidata.org/wiki/Q4917288)

Formale Wissensrepräsentation (4): Wikidata und SPARQL

- Weltweit größter frei zugänglicher Wissensgraph
- Kollaborativ erstellt, von Wikimedia Foundation organisiert
- $\exists \text{ Items}$: u. a. zu jedem Wikipedia-Eintrag:
 - <https://www.wikidata.org/wiki/Q252446> *Anif bei Salzburg*
 - <https://www.wikidata.org/wiki/Q4917288> *Control Engineering*
- $\exists \text{ Properties}$:
 - <https://www.wikidata.org/wiki/P31> *is instance of*
 - <https://www.wikidata.org/wiki/P2534> *has defining formula*
- $\exists \text{ Statements}$ (Kanten im Wissensgraph)

Formale Wissensrepräsentation (4): Wikidata und SPARQL

- Weltweit größter frei zugänglicher Wissensgraph
- Kollaborativ erstellt, von Wikimedia Foundation organisiert
- $\exists \text{ Items}$: u. a. zu jedem Wikipedia-Eintrag:
 - <https://www.wikidata.org/wiki/Q252446> *Anif bei Salzburg*
 - <https://www.wikidata.org/wiki/Q4917288> *Control Engineering*
- $\exists \text{ Properties}$:
 - <https://www.wikidata.org/wiki/P31> *is instance of*
 - <https://www.wikidata.org/wiki/P2534> *has defining formula*
- $\exists \text{ Statements}$ (Kanten im Wissensgraph)
- Abfrageschnittstelle über SPARQL



```
1 SELECT ?item ?itemLabel ?formula
2 WHERE
3 {
4   ?item wdt:P31 wd:Q877802.    # P31 → instance of; Q877802 → integral transformation
5   ?item wdt:P2534 ?formula.    # P2534 → defining formula
6   ?item rdfs:label ?itemLabel.
7 }
```



⚙️

?

9 results in 246 ms

Code

Download

Link

item	itemLabel	formula
wd:Q2867	wavelet transform	$w(f)(t, a, b) = \int_{-\infty}^{\infty} f\left(\frac{x-b}{a}\right)\psi(x, a, b) dx$
wd:Q199691	Laplace transform	$F(s) = \int_0^{\infty} f(t)e^{-st} dt$
wd:Q210857	convolution	$(f * g)(t) \stackrel{\text{def}}{=} \int_{-\infty}^{\infty} f(\tau)g(t - \tau)d\tau = \int_{-\infty}^{\infty} f(t - \tau)g(\tau)d\tau$

Formale Wissensrepräsentation (4): Wikidata und SPARQL

- Weltweit größter frei zugänglicher Wissensgraph
- Kollaborativ erstellt, von Wikimedia Foundation organisiert
- $\exists \text{ Items}$: u. a. zu jedem Wikipedia-Eintrag:
 - <https://www.wikidata.org/wiki/Q252446> *Anif bei Salzburg*
 - <https://www.wikidata.org/wiki/Q4917288> *Control Engineering*
- $\exists \text{ Properties}$:
 - <https://www.wikidata.org/wiki/P31> *is instance of*
 - <https://www.wikidata.org/wiki/P2534> *has defining formula*
- $\exists \text{ Statements}$ (Kanten im Wissensgraph)
- Abfrageschnittstelle über SPARQL

→ Repräsentation von mathematischen Inhalten in WD: umfangreich
↳ Repräsentation von regelungstheoretischen Inhalten in WD: **dürftig**

Thesen

These 1

Die gegenwärtig dominierenden Medien (Fließtext, Formeln, Grafiken) der Wissensrepräsentation sind in Bezug auf die angesprochenen Probleme suboptimal.

These 2

Formale Wissensrepräsentationsmethoden stellen eine vielversprechende Ergänzung dar.

These 3

Bisher existierende technische Lösungen (OWL, Wikidata, ...) sind ungeeignet.

Gliederung

- Motivation und Rückblick
- Formale Wissensrepräsentation: Ist-Stand

→ **Ansatz: Emergent Representation of Knowledge (ERK)**

- Ontology of Control Systems Engineering (OCSE)
- Zusammenfassung und Diskussion

Experimenteller Ansatz: ERK

Verklemmung:

- ① Kein geeigneter Repräsentationsformalismus → ② Keine Inhalte → ③ Keine Anwendungen → ④ Keine Aufmerksamkeit → ⑤ Keine Entwicklung → ①

Experimenteller Ansatz: ERK

Verklemmung:

- ① Kein geeigneter Repräsentationsformalismus → ② Keine Inhalte → ③ Keine Anwendungen → ④ Keine Aufmerksamkeit → ⑤ Keine Entwicklung → ①

Pragmatischer Ansatz:

- ① Repräsentationsformalismus: **Emergent Representation of Knowledge**
- ② initiale Inhalte: OCSE

Experimenteller Ansatz: ERK

Verklemmung:

- ① Kein geeigneter Repräsentationsformalismus → ② Keine Inhalte → ③ Keine Anwendungen → ④ Keine Aufmerksamkeit → ⑤ Keine Entwicklung → ①

Pragmatischer Ansatz:

- ① Repräsentationsformalismus: Emergent Representation of Knowledge
② initiale Inhalte: OCSE

Anforderungen

- Fokus auf Ausdrucksstärke
- Basiert auf menschenlesbarem Text
- Unterstützung für Automatisierung

Experimenteller Ansatz: ERK

Verklemmung:

- ① Kein geeigneter Repräsentationsformalismus → ② Keine Inhalte → ③ Keine Anwendungen → ④ Keine Aufmerksamkeit → ⑤ Keine Entwicklung → ①

Pragmatischer Ansatz:

- ① Repräsentationsformalismus: **Emergent Representation of Knowledge**
② initiale Inhalte: OCSE

Anforderungen

- Fokus auf Ausdrucksstärke
 - Basiert auf menschenlesbarem Text
 - Unterstützung für Automatisierung
- } Erfüllt von Allzweckprogrammiersprache
z. B. Python

ERK: Imperative statt deklarative Wissensrepräsentation

Deklarativ

- Formuliert in *Beschreibungssprache* (z.B. OWL (Turtle Syntax))

ERK: Imperative statt deklarative Wissensrepräsentation

Deklarativ

- Formuliert in *Beschreibungssprache* (z.B. OWL (Turtle Syntax))

```
I3749 rdfs:label "Cayley-Hamilton theorem".
```

```
I3749 rdfs:comment "every square matrix is a root of its own char. poly.". 
```

```
I3749 rdf:type :I15_implication_proposition.
```

ERK: Imperative statt deklarative Wissensrepräsentation

Deklarativ

- Formuliert in *Beschreibungssprache* (z.B. OWL (Turtle Syntax))

```
I3749 rdfs:label "Cayley-Hamilton theorem".  
I3749 rdfs:comment "every square matrix is a root of its own char. poly.".  
I3749 rdf:type :I15_implication_proposition.
```

Imperativ

- Formuliert in *Programmiersprache* (z.B. Python)

```
I3749 = p.create_item(  
    R1__has_label="Cayley-Hamilton theorem",  
    R2__has_description="every square matrix is a root of its own char. poly.",  
    R4__is_instance_of=p.I15["implication proposition"],  
)
```

ERK: Imperative statt deklarative Wissensrepräsentation (2)

Vorteile

- Direkte Programm-interne Repräsentation (kein Parsen)
- Direkte Erweiterbarkeit (Plugins im Graphen)

ERK: Imperative statt deklarative Wissensrepräsentation (2)

Vorteile

- Direkte Programm-interne Repräsentation (kein Parsen)
- Direkte Erweiterbarkeit (Plugins im Graphen)

Anwendung: Geltungsbereiche (scopes)

- Gliederung einer Aussage in *Kontext-Etablierung, Prämisse, Behauptung*
- Gesamtaussage abhängig davon in welchem *scope* eine Teilaussage steht
- Deklarativ: nur sehr aufwendig umsetzbar
- Imperativ: einfach umsetzbar (automatisches Erzeugen von Hilfsknoten/kanten)

ERK: Imperative statt deklarative Wissensrepräsentation (2)

Vorteile

- Direkte Programm-interne Repräsentation (kein Parsen)
- Direkte Erweiterbarkeit (Plugins im Graphen)

Anwendung: Geltungsbereiche (scopes)

- Gliederung einer Aussage in *Kontext-Etablierung, Prämisse, Behauptung*
- Gesamtaussage abhängig davon in welchem scope eine Teilaussage steht
- Deklarativ: nur sehr aufwendig umsetzbar
- Imperativ: einfach umsetzbar (automatisches Erzeugen von Hilfsknoten/kanten)

```
I3749 = p.create_item(  
    R1__has_label="Cayley-Hamilton theorem",  
    R2__has_description="every square matrix is a root of its own char. poly.",  
    R4__is_instance_of=p.I15["implication proposition"],  
)
```

ERK - Beispiel: *Inhalt* des Satzes von Cayley-Hamilton

```
with I3749["Cayley-Hamilton theorem"].scope("context") as cm:  
    cm.new_var(A=uq_instance_of(I9906["square matrix"]))  
    cm.new_var(n=uq_instance_of(p.I39["positive integer"]))
```

ERK - Beispiel: *Inhalt* des Satzes von Cayley-Hamilton

```
with I3749["Cayley-Hamilton theorem"].scope("context") as cm:  
    cm.new_var(A=uq_instance_of(I9906["square matrix"]))  
    cm.new_var(n=uq_instance_of(p.I39["positive integer"]))  
  
    cm.new_var(P=p.instance_of(I4240["matrix polynomial"]))  
    cm.new_var(Z=p.instance_of(I9905["zero matrix"]))
```

ERK - Beispiel: *Inhalt des Satzes von Cayley-Hamilton*

```
with I3749["Cayley-Hamilton theorem"].scope("context") as cm:  
    cm.new_var(A=uq_instance_of(I9906["square matrix"]))  
    cm.new_var(n=uq_instance_of(p.I39["positive integer"]))  
  
    cm.new_var(P=p.instance_of(I4240["matrix polynomial"]))  
    cm.new_var(Z=p.instance_of(I9905["zero matrix"]))  
  
    cm.new_rel(cm.A, R5938["has row number"], cm.n)  
    cm.new_rel(cm.A, R5940["has characteristic polynomial"], cm.P)  
    cm.new_rel(cm.Z, R5938["has row number"], cm.n)  
    cm.new_rel(cm.Z, R5939["has column number"], cm.n)
```

ERK - Beispiel: *Inhalt* des Satzes von Cayley-Hamilton

```
with I3749["Cayley-Hamilton theorem"].scope("context") as cm:  
    cm.new_var(A=uq_instance_of(I9906["square matrix"]))  
    cm.new_var(n=uq_instance_of(p.I39["positive integer"]))  
  
    cm.new_var(P=p.instance_of(I4240["matrix polynomial"]))  
    cm.new_var(Z=p.instance_of(I9905["zero matrix"]))  
  
    cm.new_rel(cm.A, R5938["has row number"], cm.n)  
    cm.new_rel(cm.A, R5940["has characteristic polynomial"], cm.P)  
    cm.new_rel(cm.Z, R5938["has row number"], cm.n)  
    cm.new_rel(cm.Z, R5939["has column number"], cm.n)  
  
with I3749["Cayley-Hamilton theorem"].scope("assertions") as cm:  
    cm.new_equation(lhs=cm.P(cm.A), rhs=cm.Z)
```

$$P(\mathbf{A}) = \mathbf{Z} \quad \text{mit } \mathbf{Z} := \mathbf{0}$$

ERK-Inferenzsystem

Nachteile Imperativer Repräsentation

- ...
- Kein Einsatz existierender *Reasoner*

ERK-Inferenzsystem

Nachteile Imperativer Repräsentation

- ...
- Kein Einsatz existierender *Reasoner*

→ Regelbasierte Inferenz

- Beispiel: Klassifikation von $\dot{x} = a \sin(x) + bx^2 + cx + u$
- *Eingangsaffinität* \supset *Polynomialität* ($a=0$) \supset *Linearität* ($a,b=0$)

ERK-Inferenzsystem

Nachteile Imperativer Repräsentation

- ...
- Kein Einsatz existierender *Reasoner*

→ Regelbasierte Inferenz

- Beispiel: Klassifikation von $\dot{x} = a \sin(x) + bx^2 + cx + u$
- *Eingangsaffinität* \supset *Polynomialität* ($a=0$) \supset *Linearität* ($a,b=0$)
- Im Graph: I4761["linear"] R17["is subproperty of"] I5247["polynomial"]
- Wunsch: Schlussfolgerung von I4761["linear"] R17 I6091["control affine"]

ERK-Inferenzsystem

Nachteile Imperativer Repräsentation

- ...
- Kein Einsatz existierender *Reasoner*

→ Regelbasierte Inferenz

- Beispiel: Klassifikation von $\dot{x} = a \sin(x) + bx^2 + cx + u$
- *Eingangsaffinität* \supset *Polynomialität* ($a=0$) \supset *Linearität* ($a,b=0$)
- Im Graph: I4761["linear"] R17["is subproperty of"] I5247["polynomial"]
- Wunsch: Schlussfolgerung von I4761["linear"] R17 I6091["control affine"]
- Abstrakt: Transitivität der Relation R17["is subproperty of"]
- Wunsch: Regel soll selbst Teil des Wissensgraphen sein

ERK-Inferenzsystem: Regelspezifikation

```
I400 = p.create_item(  
    R1__has_label="transitivity of R17__is_subproperty_of",  
    R4__is_instance_of=p.I41["semantic rule"],  
)
```

ERK-Inferenzsystem: Regelspezifikation

```
I400 = p.create_item(  
    R1__has_label="transitivity of R17__is_subproperty_of",  
    R4__is_instance_of=p.I41["semantic rule"],  
)  
  
with I400["subproperty rule 1"].scope("context") as cm:  
    cm.new_var(P1=p.instance_of(p.I11["mathematical property"]))  
    cm.new_var(P2=p.instance_of(p.I11["mathematical property"]))  
    cm.new_var(P3=p.instance_of(p.I11["mathematical property"]))
```

ERK-Inferenzsystem: Regelspezifikation

```
I400 = p.create_item(
    R1__has_label="transitivity of R17__is_subproperty_of",
    R4__is_instance_of=p.I41["semantic rule"],
)

with I400["subproperty rule 1"].scope("context") as cm:
    cm.new_var(P1=p.instance_of(p.I11["mathematical property"]))
    cm.new_var(P2=p.instance_of(p.I11["mathematical property"]))
    cm.new_var(P3=p.instance_of(p.I11["mathematical property"]))

with I400.scope("premises") as cm:
    cm.new_rel(cm.P2, p.R17["is subproperty of"], cm.P1)
    cm.new_rel(cm.P3, p.R17["is subproperty of"], cm.P2)
```

ERK-Inferenzsystem: Regelspezifikation

```
I400 = p.create_item(
    R1__has_label="transitivity of R17__is_subproperty_of",
    R4__is_instance_of=p.I41["semantic rule"],
)

with I400["subproperty rule 1"].scope("context") as cm:
    cm.new_var(P1=p.instance_of(p.I11["mathematical property"]))
    cm.new_var(P2=p.instance_of(p.I11["mathematical property"]))
    cm.new_var(P3=p.instance_of(p.I11["mathematical property"]))

with I400.scope("premises") as cm:
    cm.new_rel(cm.P2, p.R17["is subproperty of"], cm.P1)
    cm.new_rel(cm.P3, p.R17["is subproperty of"], cm.P2)

with I400.scope("assertions") as cm:
    cm.new_rel(cm.P3, p.R17["is subproperty of"], cm.P1)
```

ERK-Inferenzsystem: Regelauswertung

- Für jede Regel: „Prototypgraphen“ konstruieren
 - lokale Variablen aus `scope("context")` → Knoten
 - Relationen aus `scope("premises")` → Kanten

ERK-Inferenzsystem: Regelauswertung

- Für jede Regel: „Prototypgraphen“ konstruieren
 - lokale Variablen aus `scope("context")` → Knoten
 - Relationen aus `scope("premises")` → Kanten
- Passende Knoten aus dem Gesamtgraph suchen
 - Mathematisches Problem: ***Subgraphisomorphismen*** finden
 - \exists VF2-Algorithmus (fertig implementiert)

ERK-Inferenzsystem: Regelauswertung

- Für jede Regel: „Prototypgraphen“ konstruieren
 - lokale Variablen aus `scope("context")` → Knoten
 - Relationen aus `scope("premises")` → Kanten
- Passende Knoten aus dem Gesamtgraph suchen
 - Mathematisches Problem: ***Subgraphisomorphismen*** finden
 - \exists VF2-Algorithmus (fertig implementiert)
- Beziehungen aus `scope("assertions")` abstrahieren und anwenden

ERK – Bemerkungen

- Alle *Items* und *Relations* haben eindeutige URI (z. B. `erk:/builtins#I41`)
- Unterstützung für Mehrsprachigkeit (Label, Beschreibung, ...)
- Unterstützung für Qualifier (Kanten, die auf Kanten zeigen)
 - Semantische Information steckt in Knoten und Kanten
 - menschenlesbare Texte sind Hilfsattribute
 - Lesbarkeit für Mensch und Maschine: `I41["semantische Regel"@de] ≡ I41`
- Zur Begriffswahl „Emergent“ (ERK)
 - *Emergenz* wörtlich: „das Auftauchen“
 - Bedeutung: Phänomen, dass in komplexen Systemen Eigenschaften auftreten, die nicht aus den Eigenschaften der Elemente vorhergesagt werden können.
→ : *Das Ganze ist mehr als die Summe seiner Teile.*
 - Ursprünglich: ERK – „Easy Knowledge Representation“
- \exists **RDF-Export → SPARQL Suche möglich**

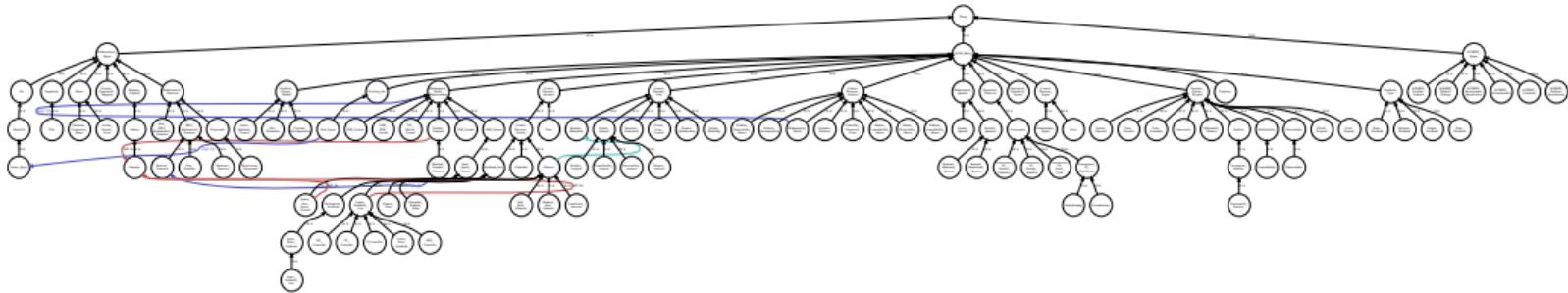
Gliederung

- Motivation und Rückblick
- Formale Wissensrepräsentation: Ist-Stand
- Ansatz: Emergent Representation of Knowledge (ERK)
- **Ontology of Control Systems Engineering (OCSE)**
- Zusammenfassung und Diskussion

Ontology of Control Systems Engineering

2021: OCSE 0.1

- in OWL implementiert
- Taxonomie einfach umsetzbar
- Weitere Beziehungen schwierig (mangelnde OWL-Ausdrucksstärke)



Ontology of Control Systems Engineering

2021: OCSE 0.1

- in OWL implementiert
- Taxonomie einfach umsetzbar
- Weitere Beziehungen schwierig (mangelnde OWL-Ausdrucksstärke)

2022: OCSE 0.2

- Basierend auf ERK implementiert
- Größere Modellierungstiefe möglich

OCSE – Wie anfangen?

Worum geht es in der Regelungstheorie? →

OCSE – Wie anfangen?

Worum geht es in der Regelungstheorie? → Dynamische Systeme.

OCSE – Wie anfangen?

Worum geht es in der Regelungstheorie? → Dynamische Systeme.

```
I5948 = p.create_item(  
    R1__has_label="dynamical system",  
    R4__is_instance_of=p.I2["Metaclass"] # <- Metaklassen-Instanzen sind Klassen  
)
```

Geht es wirklich um Systeme?

OCSE – Wie anfangen?

Worum geht es in der Regelungstheorie? → Dynamische Systeme.

```
I5948 = p.create_item(  
    R1__has_label="dynamical system",  
    R4__is_instance_of=p.I2["Metaclass"] # <- Metaklassen-Instanzen sind Klassen  
)
```

Geht es wirklich um Systeme? → Es geht um *Modelle*.

OCSE – Wie anfangen?

Worum geht es in der Regelungstheorie? → Dynamische Systeme.

```
I5948 = p.create_item(  
    R1__has_label="dynamical system",  
    R4__is_instance_of=p.I2["Metaclass"] # <- Metaklassen-Instanzen sind Klassen  
)
```

Geht es wirklich um Systeme? → Es geht um *Modelle*.

```
I7641 = p.create_item(  
    R1__has_label="general system model",  
    R4__is_instance_of=p.I2["Metaclass"],  
)
```

OCSE – Wie anfangen?

Worum geht es in der Regelungstheorie? → Dynamische Systeme.

```
I5948 = p.create_item(  
    R1__has_label="dynamical system",  
    R4__is_instance_of=p.I2["Metaclass"] # <- Metaklassen-Instanzen sind Klassen  
)
```

Geht es wirklich um Systeme? → Es geht um *Modelle*.

```
I7641 = p.create_item(  
    R1__has_label="general system model",  
    R4__is_instance_of=p.I2["Metaclass"],  
)  
R7641 = p.create_relation(  
    R1__has_label="has approximation",  
    R8__has_domain_of_argument_1=I5948["dynamical system"],  
    R11__has_range_of_result=I7641["general system model"],  
)
```

OCSE – Repräsentation von Mathematik

- Regelungstheoretische Aussagen benötigen unverzichtbar Mathematik

OCSE – Repräsentation von Mathematik

- Regelungstheoretische Aussagen benötigen unverzichtbar Mathematik
- Pragmatischer Ansatz: Irgendwo anfangen und schrittweise ergänzen

OCSE – Repräsentation von Mathematik

- Regelungstheoretische Aussagen benötigen unverzichtbar Mathematik
- Pragmatischer Ansatz: Irgendwo anfangen und schrittweise ergänzen

Beispiel: R8133["relative degree"]

($\hat{=}$ $\frac{d}{dt}$ -Ordnung des Systemausgangs, die erstmals explizit vom Eingang abhängt)

OCSE – Repräsentation von Mathematik

- Regelungstheoretische Aussagen benötigen unverzichtbar Mathematik
- Pragmatischer Ansatz: Irgendwo anfangen und schrittweise ergänzen

Beispiel: R8133["relative degree"]

($\hat{=}$ $\frac{d}{dt}$ -Ordnung des Systemausgangs, die erstmals explizit vom Eingang abhängt)
benötigt:

- I1371["iterated Lie derivative of scalar field"]

OCSE – Repräsentation von Mathematik

- Regelungstheoretische Aussagen benötigen unverzichtbar Mathematik
- Pragmatischer Ansatz: Irgendwo anfangen und schrittweise ergänzen

Beispiel: R8133["relative degree"]

($\hat{=}$ $\frac{d}{dt}$ -Ordnung des Systemausgangs, die erstmals explizit vom Eingang abhängt)
benötigt:

- I1371["iterated Lie derivative of scalar field"]
 - I1347["Lie derivative of scalar field"]

Lie Ableitung

$$\begin{aligned}\dot{x} &= f(x) + g(x)u \\ y &= h(x)\end{aligned}$$

$$L_f h := \left(\frac{d}{dt} \varphi_t^f(x) \right) \Big|_{t=0}$$

OCSE – Repräsentation von Mathematik

- Regelungstheoretische Aussagen benötigen unverzichtbar Mathematik
- Pragmatischer Ansatz: Irgendwo anfangen und schrittweise ergänzen

Beispiel: R8133["relative degree"]

($\hat{=}$ $\frac{d}{dt}$ -Ordnung des Systemausgangs, die erstmals explizit vom Eingang abhängt)
benötigt:

- I1371["iterated Lie derivative of scalar field"]
 - I1347["Lie derivative of scalar field"]
 - I2075["substitution"]
 - I3513["derivative w.r.t. scalar parameter"]
 - I2753["flow of a vector field"]
 - I9273["explicit first order ODE system"]
- ...

Lie Ableitung

$$\begin{aligned}\dot{x} &= f(x) + g(x)u \\ y &= h(x)\end{aligned}$$

$$L_f h := \left(\frac{d}{dt} \varphi_t^f(x) \right) \Big|_{t=0}$$

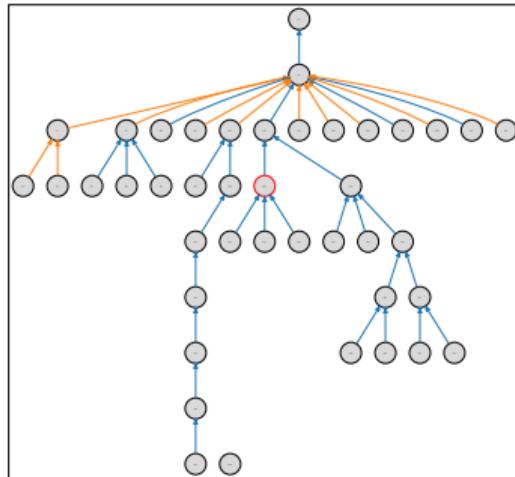
OCSE – Status und Anwendungen

Status: `<erk:/builtins> ∪ <erk:/ocse/0.2>`: ≈ 230 Knoten, 400 Kanten

OCSE – Status und Anwendungen

Status: `<erk:/builtins>` \cup `<erk:/ocse/0.2>`: ≈ 230 Knoten, 400 Kanten

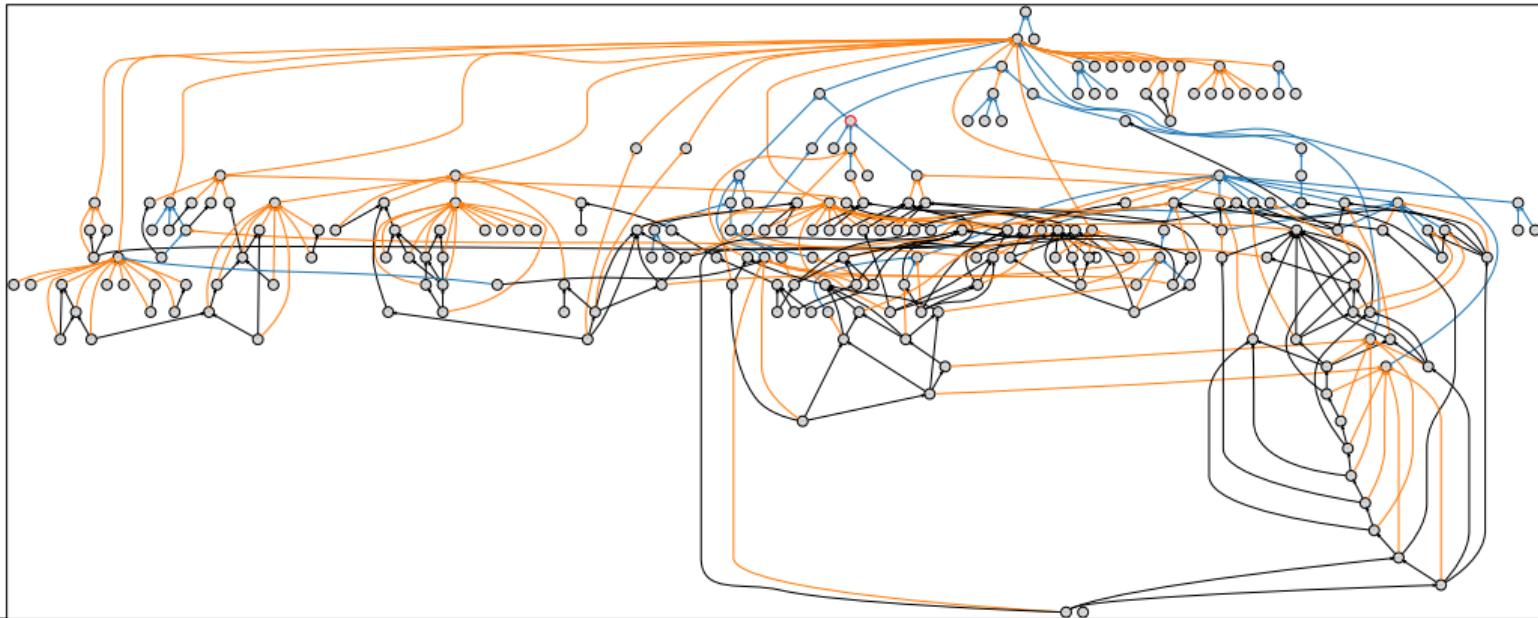
Visualisierung:



OCSE – Status und Anwendungen

Status: `<erk:/builtins> ∪ <erk:/ocse/0.2>`: ≈ 230 Knoten, 400 Kanten

Visualisierung:

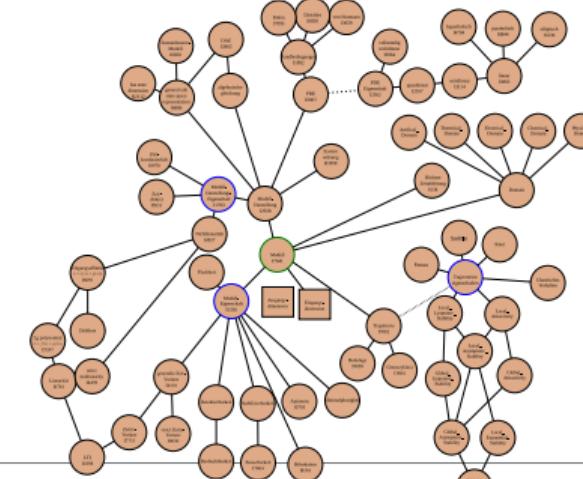


OCSE – Status und Anwendungen

Status: `<erk:/builtins> ∪ <erk:/ocse/0.2>`: ≈ 230 Knoten, 400 Kanten

Bisherige Anwendung:

Klassifikation von Entitäten im **Automatic Control Knowledge Repository (ACKREP)**
(Systemmodelle, Problembeschreibungen, Lösungsmethoden)



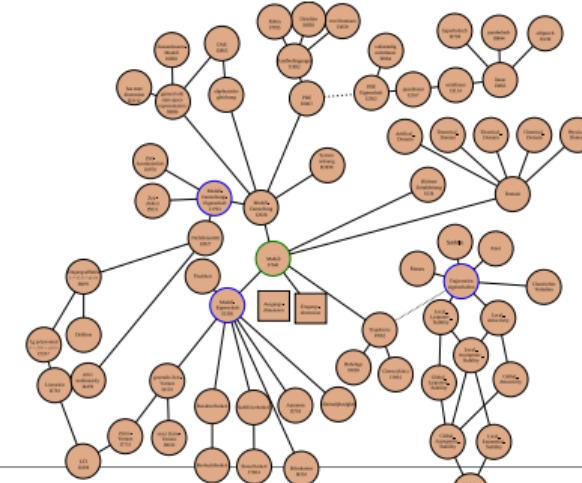
OCSE – Status und Anwendungen

Status: `<erk:/builtins> ∪ <erk:/ocse/0.2>`: ≈ 230 Knoten, 400 Kanten

Bisherige Anwendung:

Klassifikation von Entitäten im **Automatic Control Knowledge Repository (ACKREP)**
(Systemmodelle, Problembeschreibungen, Lösungsmethoden)

→ Ermöglicht SPARQL-Suche
(z. B. exakt E-Z-linearisierbare Modelle mit $n > 3$)



OCSE – Status und Anwendungen

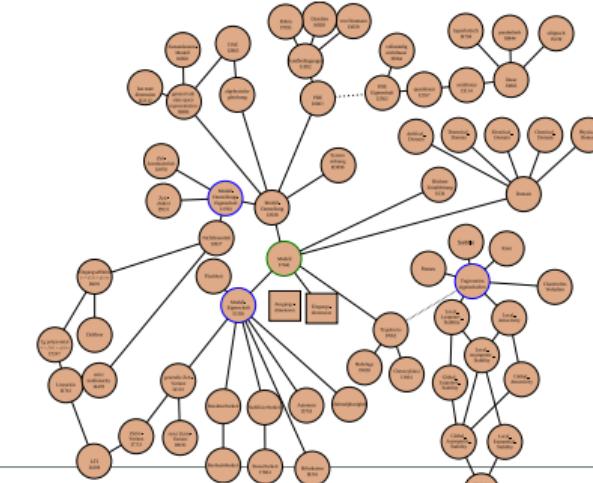
Status: `<erk:/builtins> ∪ <erk:/ocse/0.2>`: ≈ 230 Knoten, 400 Kanten

Bisherige Anwendung:

Klassifikation von Entitäten im **Automatic Control Knowledge Repository (ACKREP)**
(Systemmodelle, Problembeschreibungen, Lösungsmethoden)
→ Ermöglicht SPARQL-Suche
(z. B. exakt E-Z-linearisierbare Modelle mit $n > 3$)

Mögliche zukünftige Anwendungen

- (Autom.) Klassifikation von Veröffentlichungen
Denkbar: bis auf Satz- bzw. Gleichungsebene.
- Assistenzsoftware für Reglerentwurf
→ Wissenstransfer



Gliederung

- Motivation und Rückblick
- Formale Wissensrepräsentation: Ist-Stand
- Ansatz: Emergent Representation of Knowledge (ERK)
- Ontology of Control Systems Engineering (OCSE)
- **Zusammenfassung und Diskussion**

Zusammenfassung und Diskussion

- Formale Wissensrepräsentation potenziell nützlich für Wissenstransfer

Zusammenfassung und Diskussion

- Formale Wissensrepräsentation potenziell nützlich für Wissenstransfer
- Für Regelungstheorie existiert noch keine etablierte Technologie

Zusammenfassung und Diskussion

- Formale Wissensrepräsentation potenziell nützlich für Wissenstransfer
- Für Regelungstheorie existiert noch keine etablierte Technologie
- Experimenteller Vorschlag: ERK + OCSE (Code und Daten sind Open Source)

→ <https://ackrep.org>

Zusammenfassung und Diskussion

- Formale Wissensrepräsentation potenziell nützlich für Wissenstransfer
- Für Regelungstheorie existiert noch keine etablierte Technologie
- Experimenteller Vorschlag: ERK + OCSE (Code und Daten sind Open Source)

→ <https://ackrep.org>

Diskussion (offene Fragen)

- Grundsätzliche Tauglichkeit?
- (Automatisierte) Qualitätssicherung?
- Wissensintegration als sozialer Prozess?

Zusammenfassung und Diskussion

- Formale Wissensrepräsentation potenziell nützlich für Wissenstransfer
- Für Regelungstheorie existiert noch keine etablierte Technologie
- Experimenteller Vorschlag: ERK + OCSE (Code und Daten sind Open Source)

→ <https://ackrep.org>

Diskussion (offene Fragen)

- Grundsätzliche Tauglichkeit?
- (Automatisierte) Qualitätssicherung?
- Wissensintegration als sozialer Prozess?



→ Herzliche Einladung zur Kollaboration

Carsten.Knoll@tu-dresden.de

Ergänzungsfolien

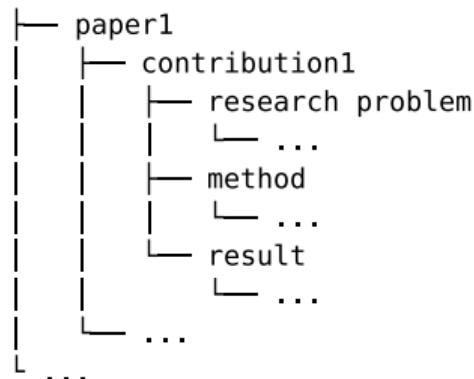
Wissensrepräsentation (5): Open Research Knowledge Graph

- Projekt der Technischen Informationsbibliothek (TIB) Hannover
- Selbstbeschreibung: *Infrastruktur-Dienst zur Sammlung von akademischem Wissen in maschinenverarbeitbarer Form.*

Wissensrepräsentation (5): Open Research Knowledge Graph

- Projekt der Technischen Informationsbibliothek (TIB) Hannover
- Selbstbeschreibung: *Infrastruktur-Dienst zur Sammlung von akademischem Wissen in maschinenverarbeitbarer Form.*

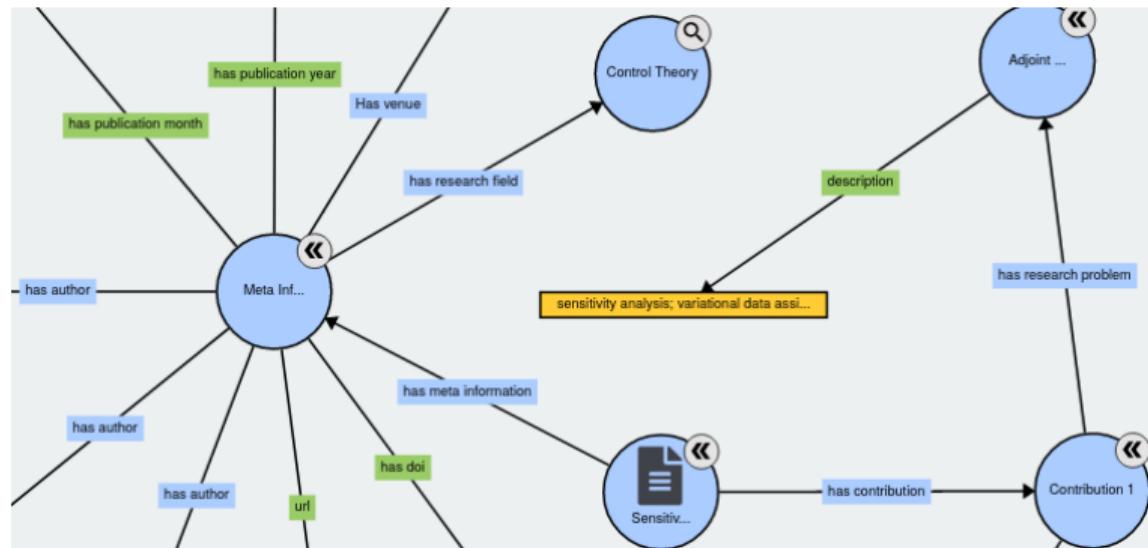
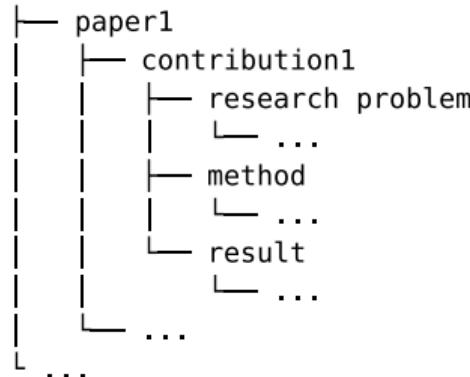
Grundlegendes Schema:



Wissensrepräsentation (5): Open Research Knowledge Graph

- Projekt der Technischen Informationsbibliothek (TIB) Hannover
- Selbstbeschreibung: *Infrastruktur-Dienst zur Sammlung von akademischem Wissen in maschinenverarbeitbarer Form.*

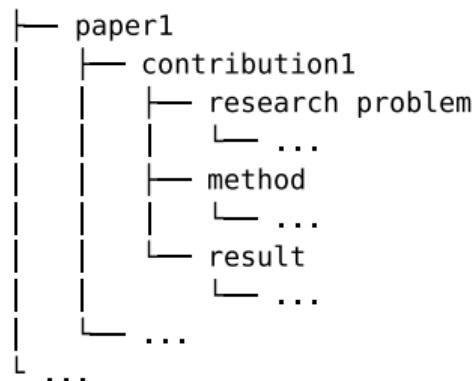
Grundlegendes Schema:



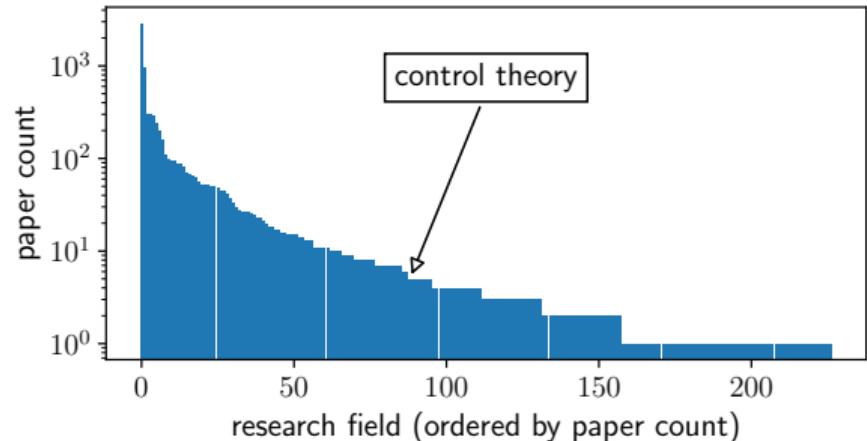
Wissensrepräsentation (5): Open Research Knowledge Graph

- Projekt der Technischen Informationsbibliothek (TIB) Hannover
- Selbstbeschreibung: *Infrastruktur-Dienst zur Sammlung von akademischem Wissen in maschinenverarbeitbarer Form.*

Grundlegendes Schema:



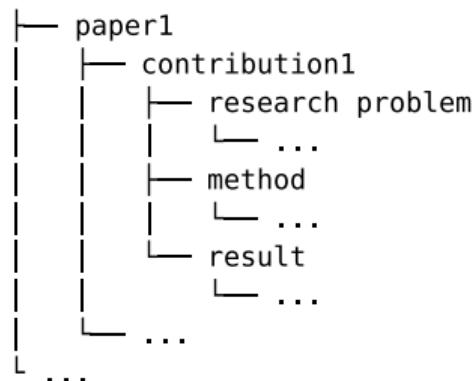
Repräsentanz der Regelungstheorie:



Wissensrepräsentation (5): Open Research Knowledge Graph

- Projekt der Technischen Informationsbibliothek (TIB) Hannover
- Selbstbeschreibung: *Infrastruktur-Dienst zur Sammlung von akademischem Wissen in maschinenverarbeitbarer Form.*

Grundlegendes Schema:



→ Bisher nur „grobe“ Wissensrepräsentation möglich/üblich

Formale Wissensrepräsentation (4): Wikidata und SPARQL

- Weltweit größter frei zugänglicher Wissensgraph
- Kollaborativ erstellt, von Wikimedia Foundation organisiert
- $\exists \text{ Items}$: u. a. zu jedem Wikipedia-Eintrag:
 - <https://www.wikidata.org/wiki/Q252446> *Anif bei Salzburg*
 - <https://www.wikidata.org/wiki/Q4917288> *Control Engineering*
- $\exists \text{ Properties}$:
 - <https://www.wikidata.org/wiki/P31> *is instance of*
 - <https://www.wikidata.org/wiki/P2534> *has defining formula*
- $\exists \text{ Statements}$ (Kanten im Wissensgraph)
- Abfrageschnittstelle über SPARQL

→ Repräsentation von mathematischen Inhalten in WD: umfangreich
↳ Repräsentation von regelungstheoretischen Inhalten in WD: **dürftig**

Main page
Community portal
Project chat
Create a new Item
Recent changes
Random Item
Query Service
Nearby
Help
Donate

Lexicographical data
Create a new Lexeme
Recent changes
Random Lexeme

Tools
What links here
Related changes
Special pages
Permanent link
Page information
Concept URI
Cite this page

PID controller (Q716829)

control loop mechanism used in control engineering
proportional-integral-derivative controller

[edit](#)

► In more languages

Statements

subclass of	control engineering ▼ 0 references	edit + add reference + add value
-------------	---	--

described by source	Armenian Soviet Encyclopedia volume 4 page(s) 313 ► 1 reference	edit + add value
---------------------	--	---

schematic		edit
-----------	--	----------------------