HEILBRONN UNIVERSITY
OF APPLIED SCIENCES

# › ZWEI-GELENK-ROBOTER

## Abgabe 17.10.2023

Marc Grosse (210233), Moritz Höhnel (210258) und Mattis Ritter (210265) / T1 / ASE | WS22/23

HEILBRONN UNIVERSITY
OF APPLIED SCIENCES

# INHALTSVERZEICHNIS

# 1. AUFGABENSTELLUNG UND PROJEKTZIELE

> Modellbildung, Modellierung und Simulation eines Zwei-Gelenk-Roboters mit Animation

# 2. MODELLANNAHMEN

- Die Roboterarme sind masselos.
- Die Massen konzentrieren sich in den Antriebsmotoren und am Greifer.
- Die Robotergelenke sind reibungslos.
- Der Roboter wird angetrieben durch zwei Elektromotoren jeweils in der Schulter und im Ellenbogen, die die Drehmomente $u_1$ und $u_2$ erzeugen.

# 3. EINGANGS-, ZUSTANDS-, AUSGANGSSIGNALE, PARAMETER UND ANFANGSBEDINGUNGEN

| Eingangssignal | Symbol | Simulink | Einheit |
|---|---|---|---|
| Drehmoment durch Schulter-Antrieb | $u_1$ | u1 | $Nm$ |
| Drehmoment durch Ellbogen-Antrieb | $u_2$ | u2 | $Nm$ |

| Zustandsvariable | Symbol | Simulink | Einheit | Anfangswert |
|---|---|---|---|---|
| Winkel des Oberarms | $x_1 = \varphi_1$ | x(1) | $rad$ | $\pi$ |
| Winkel des Unterarms | $x_2 = \varphi_2$ | x(2) | $rad$ | $\frac{\pi}{2}$ |
| Winkelgeschwindigkeit des Oberarms | $x_3 = \dot{\varphi}_1$ | x(3) | $\frac{rad}{s}$ | $0\frac{rad}{s}$ |
| Winkelgeschwindigkeit des Unterarms | $x_4 = \dot{\varphi}_2$ | x(4) | $\frac{rad}{s}$ | $0\frac{rad}{s}$ |

# 3. EINGANGS-, ZUSTANDS-, AUSGANGSSIGNALE, PARAMETER UND ANFANGSBEDINGUNGEN

| Parameter | Symbol | Simulink | Einheit | Anfangswert |
|---|---|---|---|---|
| **Masse des Ellenbogengelenks** | $m_1$ | P_m1 | $kg$ | 10 |
| **Masse des Greifers** | $m_2$ | P_m2 | $kg$ | 10 |
| **Länge des Oberarms** | $l_1$ | P_l1 | $m$ | 0,8 |
| **Länge des Unterarms** | $l_2$ | P_l2 | $m$ | 0,7 |
| **Schwerkraft** | $g$ | P_g | $\frac{m}{s^2}$ | 9,81 |

HEILBRONN UNIVERSITY
OF APPLIED SCIENCES

# 4. MODELLBILDUNG
## 4.1 PHYSIKALISCHES ERSATZSCHALTBILD

Definition der verallgemeinerten Koordinaten:

$$\boldsymbol{q} = \begin{bmatrix} \varphi_1 \\ \varphi_2 \end{bmatrix} \qquad (4.1.1) \qquad \dot{\boldsymbol{q}} = \begin{bmatrix} \dot{\varphi}_1 \\ \dot{\varphi}_2 \end{bmatrix} \qquad (4.1.2)$$

Definition der kinematischen Größen:

Position $m_1$:

$$\boldsymbol{r_1} = l_1 \begin{bmatrix} \sin(\varphi_1) \\ -\cos(\varphi_1) \end{bmatrix} \qquad (4.2.1)$$

Position $m_2$:

$$\boldsymbol{r_2} = l_1 \begin{bmatrix} \sin(\varphi_1) \\ -\cos(\varphi_1) \end{bmatrix} + l_2 \begin{bmatrix} \sin(\varphi_2) \\ -\cos(\varphi_2) \end{bmatrix} \qquad (4.2.3)$$

Geschwindigkeit $m_1$:

$$\boldsymbol{v_1} = l_1 \dot{\varphi}_1 \begin{bmatrix} \cos(\varphi_1) \\ \sin(\varphi_1) \end{bmatrix} \qquad (4.2.2)$$

Geschwindigkeit $m_2$:

$$\boldsymbol{v_2} = l_1 \dot{\varphi}_1 \begin{bmatrix} \cos(\varphi_1) \\ \sin(\varphi_1) \end{bmatrix} + l_2 \dot{\varphi}_2 \begin{bmatrix} \cos(\varphi_2) \\ \sin(\varphi_2) \end{bmatrix} \qquad (4.2.4)$$

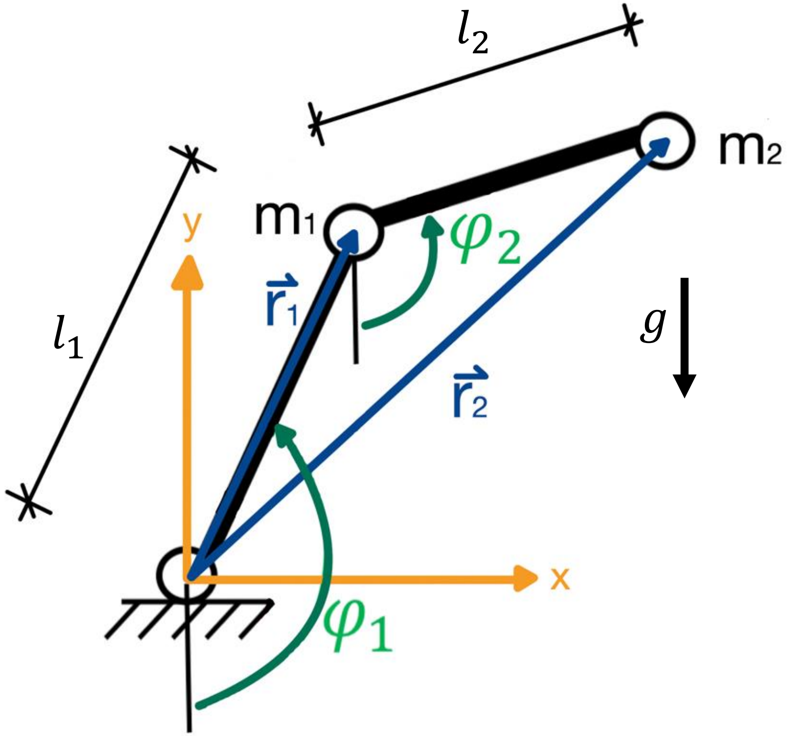



Abb. 1: Lageplan des Roboters

HEILBRONN UNIVERSITY
OF APPLIED SCIENCES

# 4. MODELLBILDUNG
## 4.2 FREISCHNITT

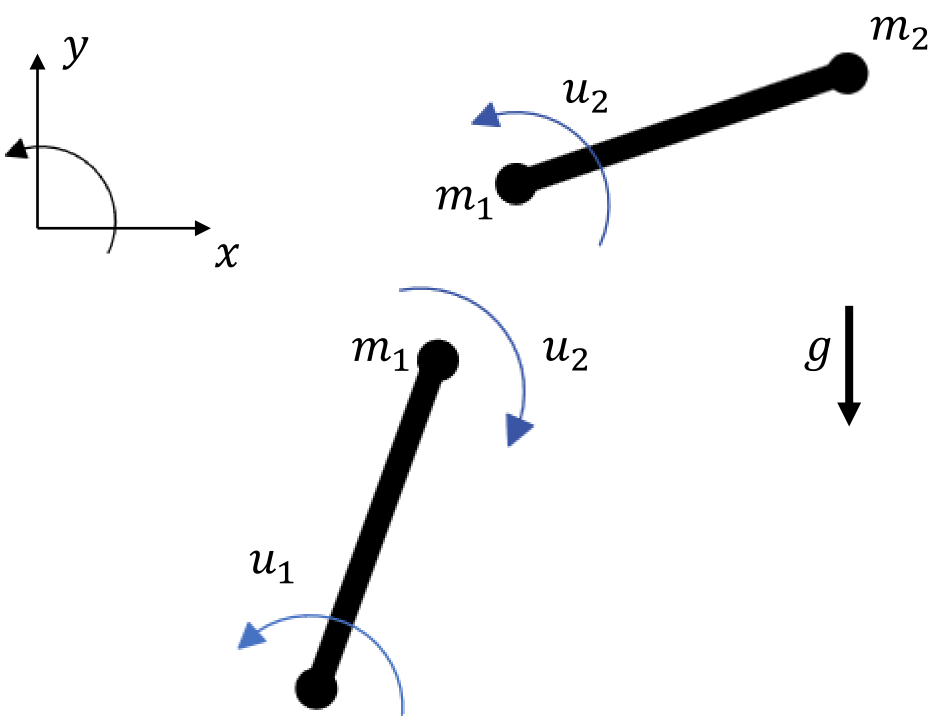



Abb. 2: Freischnitt des Roboters*

Allgemeine Lagrange Gleichung:

$$L = T - U \tag{4.3}$$

Allgemeine Lagrange Gleichung zweiter Art mit konservativen Kräften und nichtkonservativen verallgemeinerten Kräften:

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\boldsymbol{q}}^T}\right) - \frac{\partial L}{\partial \boldsymbol{q}^T} = \boldsymbol{V} \tag{4.4}$$

Zusätzliche nichtkonservativen Kräfte $\boldsymbol{V}$:

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_1}\right) - \frac{\partial L}{\partial q_1} = u_1 - u_2 \tag{4.5.1}$$

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_2}\right) - \frac{\partial L}{\partial q_2} = u_2 \tag{4.5.2}$$

*Die Gewichtskräfte und Lagerkräfte wurden im Freischnitt nicht eingezeichnet

# 4. MODELLBILDUNG
## 4.3 ENERGETISCHE GLEICHUNGEN

Kinetische Energie der Massepunkte:

$$E_{kin1} = \frac{1}{2}m_1|\boldsymbol{v}_1|^2 = \frac{1}{2}m_1(l_1^2\dot{\varphi}_1^2\cos^2(\varphi_1) + l_1^2\dot{\varphi}_1^2\sin^2(\varphi_1)) = \frac{1}{2}m_1 l_1^2\dot{\varphi}_1^2 = T_1 \qquad (4.6.1)$$

$$E_{kin2} = \frac{1}{2}m_2|\boldsymbol{v}_2|^2 = \frac{1}{2}m_2\Big(l_1^2\dot{\varphi}_1^2\,(\cos^2(\varphi_1) + \sin^2(\varphi_1)) + l_2^2\dot{\varphi}_2^2(\cos^2(\varphi_2) + \sin^2(\varphi_2)) + 2l_1\dot{\varphi}_1 l_2\dot{\varphi}_2(\cos(\varphi_1)\cos(\varphi_2) + \sin(\varphi_1)\sin(\varphi_2))\Big) \qquad (4.6.2)$$

$$= \frac{1}{2}m_2(l_1^2\dot{\varphi}_1^2 + l_2^2\dot{\varphi}_2^2 + 2l_1\dot{\varphi}_1 l_2\dot{\varphi}_2\cos(\varphi_1 - \varphi_2)) = T_2$$

Potenzielle Energie der Massepunkte:

$$E_{pot1} = m_1 g r_{1y} = -m_1 g l_1\cos(\varphi_1) = U_1 \qquad (4.6.3)$$

$$E_{pot2} = m_2 g r_{2y} = -m_2 g(l_1\cos(\varphi_1) + l_2\,cos(\varphi_2)) = U_2 \qquad (4.6.4)$$

# 4. MODELLBILDUNG
## 4.4 LAGRANGE GLEICHUNGEN

Einsetzen der energetischen Gleichungen (4.6) in die Lagrange-Gleichung (4.3):

$$L = T - \mathrm{U} = T_1 + T_2 - U_1 - U_2$$

$$L = \frac{1}{2}(m_1+m_2)l_1^2\dot{\varphi}_1^2 + \frac{1}{2}m_2 l_2^2\dot{\varphi}_2^2 + m_2 l_1\dot{\varphi}_1 l_2\dot{\varphi}_2\cos(\varphi_1 - \varphi_2) + (m_1 + m_2)g l_1\cos(\varphi_1) + m_2 g l_2\cos(\varphi_2) \quad (4.7.1)$$

Linke Seite der Lagrange-Gleichung 2. Art (4.4) komponentenweise:

$$\frac{\partial L}{\partial q_1} = -m_2 l_1 l_2\dot{\varphi}_1\dot{\varphi}_2\sin(\varphi_1 - \varphi_2) - (m_1 + m_2)g l_1\sin(\varphi_1) \quad (4.7.2)$$

$$\frac{\partial L}{\partial q_2} = m_2 l_1 l_2\dot{\varphi}_1\dot{\varphi}_2\sin(\varphi_1 - \varphi_2) - m_2 g l_2\sin(\varphi_2) \quad (4.7.3)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_1} = (m_1 + m_2)l_1^2\dot{\varphi}_1 + m_2 l_1 l_2\dot{\varphi}_2\cos(\varphi_1 - \varphi_2) \quad (4.7.4)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_2} = m_2 l_2^2\dot{\varphi}_2 + m_2 l_1 l_2\dot{\varphi}_1\cos(\varphi_1 - \varphi_2) \quad (4.7.5)$$

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_1}\right) = (m_1 + m_2)l_1^2\ddot{\varphi}_1 + m_2 l_1 l_2(-\sin(\varphi_1 - \varphi_2)(\dot{\varphi}_1 - \dot{\varphi}_2)\dot{\varphi}_2 + \cos(\varphi_1 - \varphi_2)\ddot{\varphi}_2) \quad (4.7.6)$$

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_2}\right) = m_2 l_2^2\ddot{\varphi}_2 + m_2 l_1 l_2(-\sin(\varphi_1 - \varphi_2)(\dot{\varphi}_1 - \dot{\varphi}_2)\dot{\varphi}_1 + \cos(\varphi_1 - \varphi_2)\ddot{\varphi}_1) \quad (4.7.7)$$

# 4. MODELLBILDUNG
## 4.4 LAGRANGE GLEICHUNGEN → BEWEGUNGSGLEICHUNG

Fertige linke Seite der Lagrange Gleichung 2. Art (4.4) zeilenweise:

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_1}\right) - \frac{\partial L}{\partial q_1} = (m_1 + m_2) l_1^2 \ddot{\varphi}_1 + m_2 l_1 l_2 \sin(\varphi_1 - \varphi_2)\, \dot{\varphi}_2{}^2 + m_2 l_1 l_2 \cos(\varphi_1 - \varphi_2)\, \ddot{\varphi}_2 + (m_1 + m_2) g l_1 \sin(\varphi_1) \quad (4.7.8)$$

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_2}\right) - \frac{\partial L}{\partial q_2} = m_2 l_2^2 \ddot{\varphi}_2 - m_2 l_1 l_2 \sin(\varphi_1 - \varphi_2)\, \dot{\varphi}_1^2 + m_2 l_1 l_2 \cos(\varphi_1 - \varphi_2)\, \ddot{\varphi}_1 + m_2 g l_2 \sin(\varphi_2) \quad (4.7.9)$$

Mit den zusätzlichen nichtkonservativen Kräften (4.5.1) und (4.5.2):

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\boldsymbol{q}}^T}\right) - \frac{\partial L}{\partial \boldsymbol{q}^T} = \begin{bmatrix} u_1 - u_2 \\ u_2 \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

Ergibt sich die Bewegungsgleichung in Matrizenschreibweise:

$$\underbrace{\begin{bmatrix} (m_1 + m_2) l_1^2 & m_2 l_1 l_2\, cos(\varphi_1 - \varphi_2) \\ m_2 l_1 l_2\, cos(\varphi_1 - \varphi_2) & m_2 l_2^2 \end{bmatrix}}_{\boldsymbol{M}} \begin{bmatrix} \ddot{\varphi}_1 \\ \ddot{\varphi}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} m_2 l_1 l_2 \sin(\varphi_1 - \varphi_2)\, \dot{\varphi}_2{}^2 \\ -m_2 l_1 l_2 \sin(\varphi_1 - \varphi_2)\, \dot{\varphi}_1{}^2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} (m_1 + m_2) g l_1 \sin(\varphi_1) \\ m_2 g l_2 \sin(\varphi_2) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_1 - u_2 \\ u_2 \end{bmatrix} ;\mathrm{t} > 0 \quad (4.8)$$

# 4. MODELLBILDUNG
## 4.5 ZUSTANDSRAUMMODELL

Zustandsvektor $\boldsymbol{x}$ in Bewegungsgleichung (4.8) einsetzen und nach $\begin{bmatrix}\dot{x}_3\\ \dot{x}_4\end{bmatrix}$ umstellen ($\boldsymbol{M}^{-1}$ siehe (5.9)):

$$\boldsymbol{x} = \begin{bmatrix}x_1\\ x_2\\ x_3\\ x_4\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}\varphi_1\\ \varphi_2\\ \dot{\varphi}_1\\ \dot{\varphi}_2\end{bmatrix}; \qquad \begin{bmatrix}\dot{x}_3\\ \dot{x}_4\end{bmatrix} = \boldsymbol{M}^{-1}\underbrace{\left(-\begin{bmatrix}m_2 l_1 l_2 \sin(x_1 - x_2)\, {x_4}^2\\ -m_2 l_1 l_2 \sin(x_1 - x_2)\, {x_3}^2\end{bmatrix} - \begin{bmatrix}(m_1 + m_2) g l_1 \sin(x_1)\\ m_2 g l_2 \sin(x_2)\end{bmatrix} + \begin{bmatrix}u_1 - u_2\\ u_2\end{bmatrix}\right)}_{\boldsymbol{f}^*(\boldsymbol{x},\boldsymbol{u})} \quad (4.9)$$

$\dot{x}_1 = x_3\,;\ \ \dot{x}_2 = x_4$

Zustandsraum:

$$\dot{\boldsymbol{x}} = \begin{bmatrix}x_3\\ x_4\\ \boldsymbol{M}^{-1}\cdot \boldsymbol{f}^*(\boldsymbol{x},\boldsymbol{u})\end{bmatrix}\ ; t > 0 \quad (4.10.1) \qquad \boldsymbol{y} = \boldsymbol{x}\ ; \mathrm{t} \geq 0 \quad (4.10.2) \qquad \boldsymbol{x}_0 = \boldsymbol{x}(0) = \begin{bmatrix}\pi\, rad\\ \frac{\pi}{2}\, rad\\ 0\,\frac{rad}{s}\\ 0\,\frac{rad}{s}\end{bmatrix} \quad (4.10.3)$$

HEILBRONN UNIVERSITY
OF APPLIED SCIENCES

# 5. AUFGABE ZUR VORABGABE

- Für eine erfolgreiche Modellierung in Simulink muss die Massenmatrix invertierbar sein. Zeigen Sie, dass die Massenmatrix unabhängig von den Zustandsgrößen oder der Parameter Festlegung invertierbar ist.
- Bestimmen Sie allgemein die stationären Gleichungen des Systems.
- Zur späteren Regelung und Bahnplanung des Roboterarms wird folgende stationäre Gleichung $\bar{\varphi}_1 = f_s(\bar{\varphi}_2)$ mit der Vorgabe $\bar{u}_2 = \beta\bar{u}_1$ benötigt. Bestimmen Sie diese aus den stationären Gleichungen.

# 5. AUFGABE ZUR VORABGABE
## 5.1 STATIONÄRER ZUSTAND

Stationären Zustand $\overline{\dot{\varphi}}_1 = \overline{\dot{\varphi}}_2 = 0\,\frac{rad}{s}$; $\overline{\ddot{\varphi}}_1 = \overline{\ddot{\varphi}}_2 = 0\,\frac{rad}{s^2}$ in (4.7) einsetzen

Allgemeine stationäre Gleichung:

$$\begin{bmatrix} (m_1+m_2)l_1^2 & m_2 l_1 l_2 \cos(\varphi_1-\varphi_2) \\ m_2 l_1 l_2 \cos(\varphi_1-\varphi_2) & m_2 l_2^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} (m_1+m_2) g l_1 \sin(\overline{\varphi}_1) \\ m_2 g l_2 \sin(\overline{\varphi}_2) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \overline{u}_1 - \overline{u}_2 \\ \overline{u}_2 \end{bmatrix} \qquad (5.1.1)$$

$$\begin{bmatrix} (m_1+m_2) g l_1 \sin(\overline{\varphi}_1) \\ m_2 g l_2 \sin(\overline{\varphi}_2) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \overline{u}_1 - \overline{u}_2 \\ \overline{u}_2 \end{bmatrix} \qquad (5.1.2)$$

$\overline{u}_2 = \beta \overline{u}_1$ umgestellt nach $\overline{u}_1$:

$$\overline{u}_1 = \frac{1}{\beta} \overline{u}_2 \qquad (5.2)$$

# 5. AUFGABE ZUR VORABGABE
## 5.1 STATIONÄRER ZUSTAND

(5.2) in (5.1.2) einsetzen:

$$\begin{bmatrix} (m_1 + m_2) g l_1 \sin(\overline{\varphi}_1) \\ m_2 g l_2 \sin(\overline{\varphi}_2) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{\beta}\overline{u}_2 - \overline{u}_2 \\ \overline{u}_2 \end{bmatrix} \tag{5.3}$$

Dies ergibt sich zeilenweise zu:

$$(m_1 + m_2) g l_1 \sin(\overline{\varphi}_1) = \overline{u}_2 \left(\frac{1}{\beta} - 1\right) \tag{5.4}$$

$$m_2 g l_2 \sin(\overline{\varphi}_2) = \overline{u}_2 \tag{5.5}$$

(5.5) in (5.4) einsetzten und nach $\overline{\varphi}_1$ auflösen:

$$\overline{\varphi}_1 = \arcsin\left(\frac{m_2 l_2}{(m_1+m_2) l_1} sin(\overline{\varphi}_2) \left(\frac{1}{\beta} - 1\right)\right) \tag{5.6}$$

# 5. AUFGABE ZUR VORABGABE
## 5.2 BEWEIS DER INVERTIERBARKEIT DER MASSENMATRIX **M**

$$\boldsymbol{M}(\boldsymbol{\varphi}, \dot{\boldsymbol{\varphi}}) = \begin{pmatrix} (m_1 + m_2)l_1^2 & m_2 l_1 l_2 \cos(\varphi_1 - \varphi_2) \\ m_2 l_1 l_2 \cos(\varphi_1 - \varphi_2) & m_2 l_2^2 \end{pmatrix} \tag{5.7}$$

Zu zeigen: $\det(\boldsymbol{M}) \neq 0$

$$\begin{aligned} \det(\boldsymbol{M}) &= (m_1 + m_2)l_1^2 m_2 l_2^2 - (m_2 l_1 l_2 \cos(\varphi_1 - \varphi_2))^2 \\ &= l_1^2 l_2^2 (m_1 m_2 + m_2^2 (1 - \cos^2(\varphi_1 - \varphi_2))) \end{aligned} \tag{5.8}$$

Da $0 \leq \cos^2(\varphi_1 - \varphi_2) \leq 1$ für alle $\varphi_1, \varphi_2 \in \mathbb{R}$ gilt $1 - \cos^2(\varphi_1 - \varphi_2) \geq 0$

Weiterhin gilt für alle Parameter $l_1, l_2, m_1, m_2 > 0$

Damit ist auch $\det(\boldsymbol{M}) > 0$ für alle $\varphi_1, \varphi_2 \in \mathbb{R}$

→ Matrix **M** ist nicht singulär und somit invertierbar!

$$\boldsymbol{M}^{-1} = \frac{1}{\det(\boldsymbol{M})} \cdot \begin{pmatrix} m_2 l_2^2 & -m_2 l_1 l_2 \cos(\varphi_1 - \varphi_2) \\ -m_2 l_1 l_2 \cos(\varphi_1 - \varphi_2) & (m_1 + m_2) l_1^2 \end{pmatrix} \tag{5.9}$$

HEILBRONN UNIVERSITY
OF APPLIED SCIENCES

# 6. ARCHITEKTUR DES SIMULINK-MODELLS
## 6.1 OBERSTE EBENE

- Eingangssignale robot: Drehmomente $u_1, u_2$
- Wechsel zwischen berechneten stationären Werten $\bar{u}_1 = \mathrm{u1s},\ \bar{u}_2 = \mathrm{u2s}$ und frei einstellbarem Drehmoment im unteren Eingang ($0\ Nm$ sind voreingestellt)
- Ausgangssignale robot: $\boldsymbol{y} = [\varphi_1 \quad \varphi_2 \quad \dot{\varphi}_1 \quad \dot{\varphi}_2]^T$
- Anzeige von $\boldsymbol{y}$ im Scope
- Animation der Roboterarme durch Funktion “robot_display”

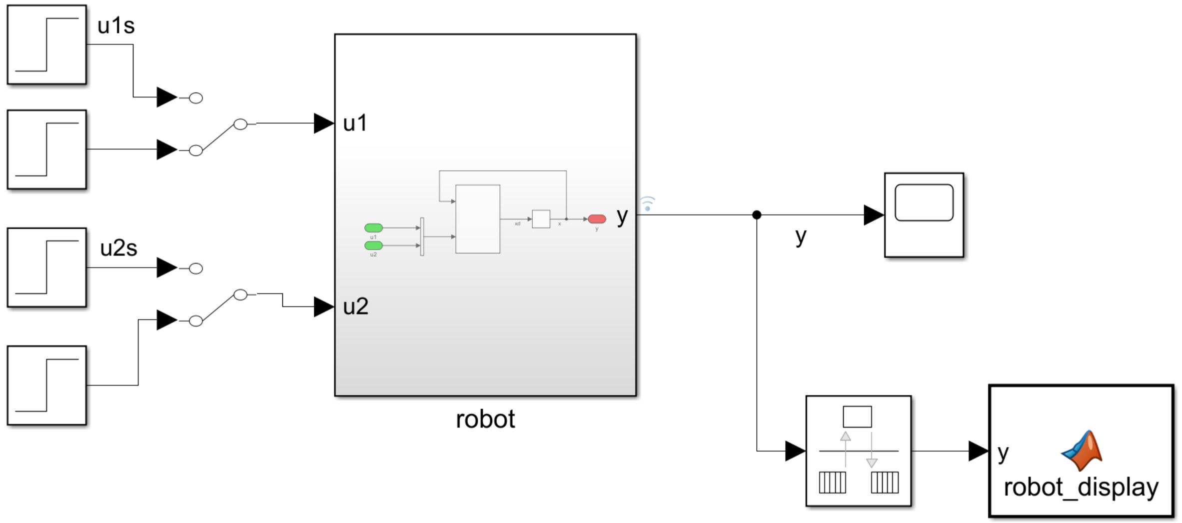



Abb. 3: Oberste Ebene des Simulink-Modells

# 6. ARCHITEKTUR DES SIMULINK-MODELLS

## 6.2 SUBSYSTEM ROBOT

> Bündelung der Eingangssignale $u_1, u_2$ in Eingangsvektor $\boldsymbol{u}$

> MATLAB function “rhs_robot” berechnet $\dot{\boldsymbol{x}} = \mathrm{xd}$ aus $\boldsymbol{u}$ und $\boldsymbol{x}$ nach Formel 4.10.1

> Integration von $\dot{\boldsymbol{x}}$ mit Anfangsbedingungen $\boldsymbol{x_0}$ (siehe 4.10.3) führt zum Zustandvektor $\boldsymbol{x}$

> Ausgangsvektor $\boldsymbol{y} = \boldsymbol{x}$

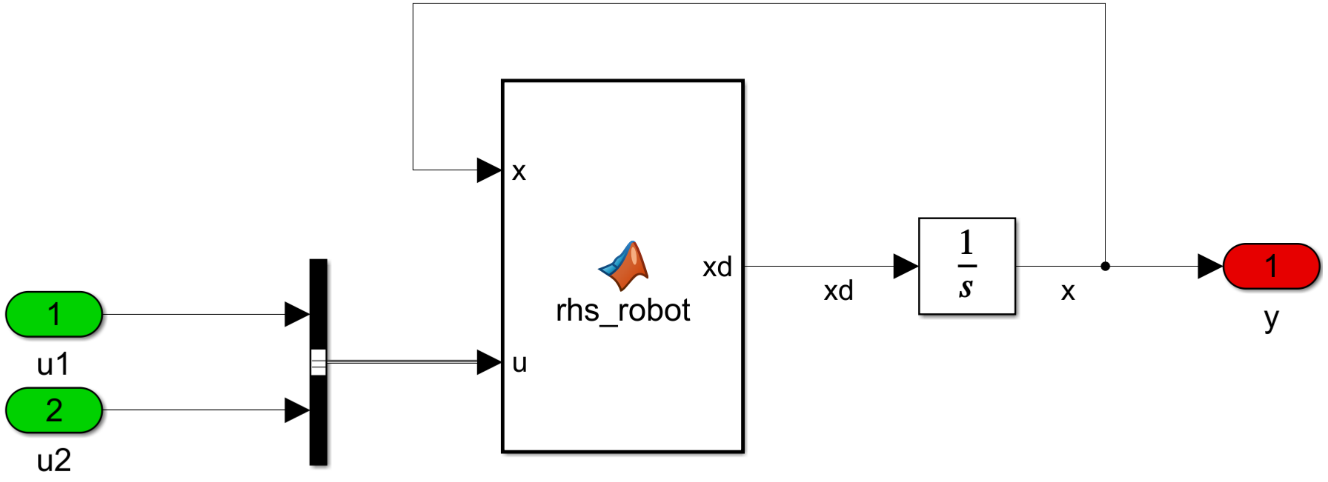



Abb. 4: Subsystem „robot“

HEILBRONN UNIVERSITY
OF APPLIED SCIENCES

# 7. DARSTELLUNG UND INTERPRETATION DER SIMULATIONSERGEBNISSE

- Simulation mit konstanten Drehmomenten von
  $\mathrm{u}_1 = 0Nm, \mathrm{u}_2 = 0Nm$
- Chaotisches Verhalten, Aufschwingen etc.

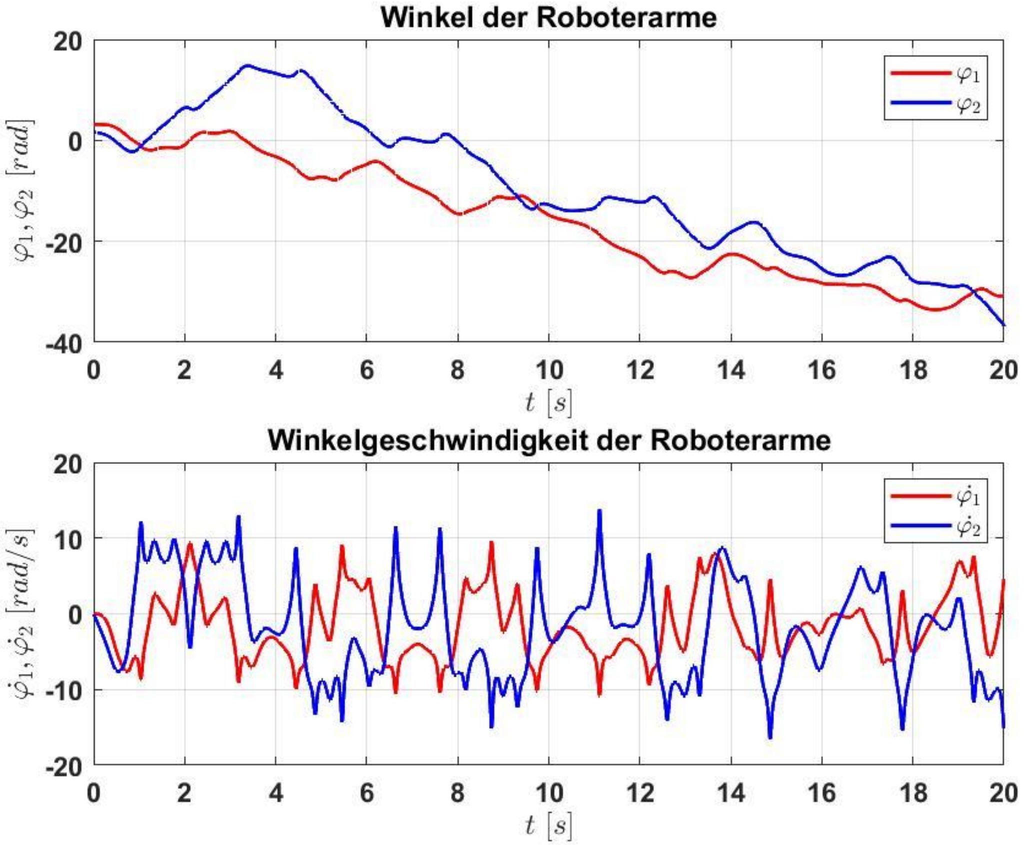



Abb. 5: Simulation mit $u_1, u_2 = 0Nm$

# 7. DARSTEULLUNG UND INTERPRETATION DER SIMULATIONSERGEBNISSE

> Simulation mit den stationären Drehmomenten

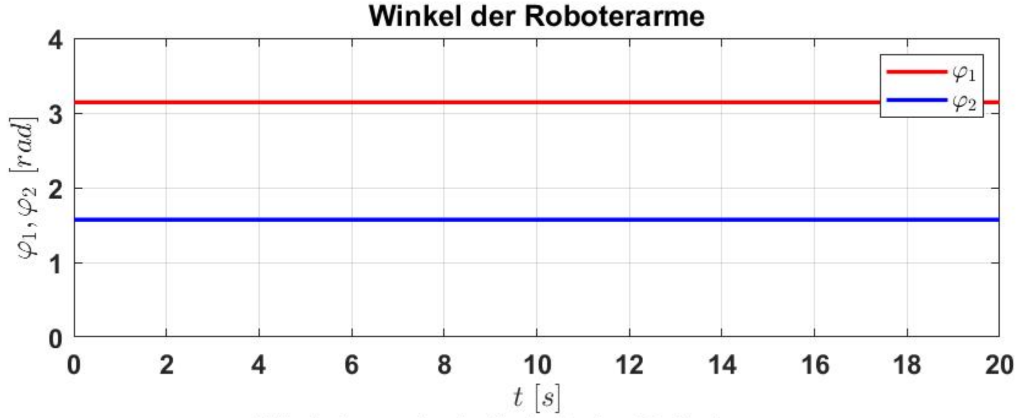
$\bar{u}_2 = m_2 g l_2 \sin(x_{02})$

$\bar{u}_1 = (m_1 + m_2) g l_1 \sin(x_{01}) + \bar{u}_2$

> Mit Anfangswerten $x_{02} = \frac{\pi}{2}\,rad$ und $x_{01} = \pi\,rad$

$\bar{u}_2 = 68{,}67\ Nm$ und $\bar{u}_1 = 68{,}67\ Nm$

> Roboterarme bleiben in Ruhe



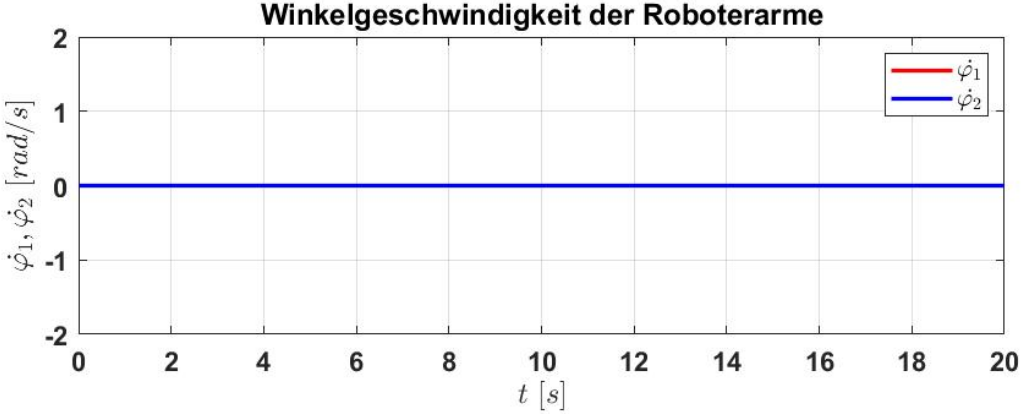




Abb. 6: Simulation mit $u_1 = \bar{u}_1,\ u_2 = \bar{u}_2$

HEILBRONN UNIVERSITY
OF APPLIED SCIENCES

# 8. BEWERTUNG, ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Bewertung:

> Alle Ziele der Aufgabenstellungen wurden erreicht

Zusammenfassung

> Der Roboterarm weißt ein chaotisches Verhalten auf

> Durch Ermittlung des stationären Drehmoment kann eine Position gehalten werden

Ausblick

> Positionsregelung der Roboterarme zu implementieren

> Erweiterung auf Drei-Dimensionalen Raum

# LITERATUR- UND ABBILDUNGSVERZEICHNIS


| Literatur |
|---|
| Woernle, Christoph (2022): Mehrkörpersysteme, 3. Auflage, Rostock, Deutschland, Springer Vieweg |

HEILBRONN UNIVERSITY
OF APPLIED SCIENCES

# DANKE!

Rückfragen bitte an:

**Moritz Höhnel**
Fakultät T1 | ASE
mhoehnel@stud.hs-heilbronn.de

**Marc Grosse**
Fakultät T1 | ASE
mgrosse@stud.hs-heilbronn.de

**Mattis Ritter**
Fakultät T1 | ASE
mritter@stud.hs-heilbronn.de