

# Steuerung und Regelung eines Doppelpendels

Projektseminar von Tobias Gebhard und Frederik Tesar

Tag der Einreichung: 30. September 2020

1. Gutachten: Prof. Dr.-Ing. Ulrich Konigorski

2. Gutachten: Dr.-Ing. Eric Lenz

Darmstadt



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT

REGELUNGSTECHNIK  
UND MECHATRONIK

**rtm**

Fachbereich Elektrotechnik  
und Informationstechnik

Steuerung und Regelung eines Doppelpendels

Projektseminar von Tobias Gebhard und Frederik Tesar

1. Gutachten: Prof. Dr.-Ing. Ulrich Konigorski

2. Gutachten: Dr.-Ing. Eric Lenz

Tag der Einreichung: 30. September 2020

Darmstadt

---

## **Erklärung zur Abschlussarbeit**

### **gemäß §22 Abs. 7 und §23 Abs. 7 APB der TU Darmstadt**

---

Hiermit versichere ich, Tobias Gebhard und Frederik Tesar, die vorliegende projektseminar ohne Hilfe Dritter und nur mit den angegebenen Quellen und Hilfsmitteln angefertigt zu haben. Alle Stellen, die Quellen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht worden. Diese Arbeit hat in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner Prüfungsbehörde vorgelegen.

Mir ist bekannt, dass im Fall eines Plagiats (§38 Abs. 2 APB) ein Täuschungsversuch vorliegt, der dazu führt, dass die Arbeit mit 5,0 bewertet und damit ein Prüfungsversuch verbraucht wird. Abschlussarbeiten dürfen nur einmal wiederholt werden.

Bei der abgegebenen Thesis stimmen die schriftliche und die zur Archivierung eingereichte elektronische Fassung gemäß §23 Abs. 7 APB überein.

Bei einer Thesis des Fachbereichs Architektur entspricht die eingereichte elektronische Fassung dem vorgestellten Modell und den vorgelegten Plänen.

Darmstadt, 30. September 2020

---

T. Gebhard F. Tesar

---

# Inhaltsverzeichnis

---

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>5</b>
<b>2</b>	<b>Grundlagen</b>	<b>6</b>
<b>3</b>	<b>Modellierung</b>	<b>7</b>
3.1	Modell des Schlitten-Pendel-Systems . . . . .	7
3.1.1	Koordinaten . . . . .	7
3.1.2	Herleitung der Bewegungsgleichungen . . . . .	7
3.1.3	Ruhelagen . . . . .	7
3.1.4	Coulomb-Reibung . . . . .	7
3.2	Motor-Modell . . . . .	8
3.3	Modellparameter . . . . .	8
3.4	Aufbau in SIMULINK . . . . .	8
3.5	Implementierung in MATLAB . . . . .	8
<b>4</b>	<b>Arbeitspunkt-Regelung</b>	<b>9</b>
4.1	Einleitung . . . . .	9
4.2	Aufbau in SIMULINK . . . . .	9
4.3	Implementierung in MATLAB . . . . .	9
4.4	Anfangswert-Tests . . . . .	9
4.5	QR Parameter Tests . . . . .	9
4.6	System Parameter Tests . . . . .	9
	<b>Literatur</b>	<b>11</b>



---

# 1 Einleitung

---

Hallo Pendel



---

## 2 Grundlagen

---

---

## 3 Modellierung

---

In diesem Kapitel wird die Modellierung des Gesamtsystems erläutert und auf dessen Implementierung in SIMULINK eingegangen.

---

### 3.1 Modell des Schlitten-Pendel-Systems

---

Die Modellierung des Schlitten-Pendel-Systems orientiert sich zunächst an den Modellen der vergangenen Arbeiten. Diese bezogen sich meist auf die Herleitung von [3]. Dabei gibt es die Variante *Kraftsystem*, das als Eingang die Kraft annimmt, welche am Schlitten wirkt, sowie das vereinfachte *Beschleunigungssystem*, das direkt die Beschleunigung des Schlittens als Eingang erhält.

#### 3.1.1 Koordinaten

Die Minimal-Koordinaten sind

$$q_0 = x_0$$

$$q_1 = \varphi_1$$

$$q_2 = \varphi_2$$

#### 3.1.2 Herleitung der Bewegungsgleichungen

Um auf die Bewegungsgleichungen des Systems zu gelangen, wird in [3] der *Lagrange*-Formalismus verwendet.

#### 3.1.3 Ruhelagen

#### 3.1.4 Coulomb-Reibung

Da die Coulomb-Reibung sowohl des Schlittens als auch der Pendelstäbe einen wesentlichen Einfluss zu haben scheint, darf diese nicht vernachlässigt werden. In den bisherigen Modellierungen wurde höchstens die Coulomb-Reibung des Schlittens berücksichtigt. Da jedoch durch die Neukonstruktion des Doppel-Pendels die Messsignalübertragung (zur Vermeidung einer Kabelaufwicklung) über einen Schleifring realisiert wurde, besteht die Vermutung, dass dieser für eine erhöhte Coulomb-Reibung verantwortlich

---

ist. Dies würde das System bereits um einen sehr kleinen Arbeitsbereich nicht-linear machen, was die Regelung erschwert.

Im vorigen Projektseminar [4] wurde die Reibung der Pendelstäbe mittels Identifikation ermittelt, aufgeteilt auf den viskosen und den Coulombanteil.

Die Formel der Gleitreibung lautet eigentlich

$$F_c = F_{c0} \cdot \text{sign}(\dot{x}),$$

allerdings führt diese Implementierung aufgrund der signum-Funktion zu Komplikationen in der Simulation. Daher wird der Verlauf bei sehr niedrigen Geschwindigkeiten mit der tanh Funktion angenähert.

---

### 3.2 Motor-Modell

---

---

### 3.3 Modellparameter

---

Apprich [1]

Chang [5]

Brehl [2]

Ribeiro [4]

---

### 3.4 Aufbau in SIMULINK

---

---

### 3.5 Implementierung in MATLAB

---



---

## 4 Arbeitspunkt-Regelung

---

In diesem Kapitel wird die Modellierung des Gesamtsystems erläutert und auf dessen Implementierung in Simulink eingegangen.

---

### 4.1 Einleitung

---

---

### 4.2 Aufbau in SIMULINK

---

---

### 4.3 Implementierung in MATLAB

---

---

### 4.4 Anfangswert-Tests

---

---

### 4.5 QR Parameter Tests

---

---

### 4.6 System Parameter Tests

---



---

# Literatur

---

- [1] Stefanie Apprich. *Konstruktion und Regelung eines inversiven Doppelpendels*. Studienarbeit. 2009.
- [2] Daniel Brehl. *Implementierung und Vergleich verschiedener Reglervarianten zur Regelung eines inversen Doppelpendels*. Bachelorarbeit. 2014.
- [3] Eric Lenz. *Modellierung Pendel*. Technische Universität Darmstadt, Fachgebiet rtm.
- [4] Vitaliy Omelchuk Igor de Sousa Ribeiro Thomas Gassen. *Steuerung und Regelung eines inversen Doppelpendels*. Projektseminar. 2020.
- [5] Feiyu Chang; Nicolas Fauvé; Antonia Gießler; Charles Studd Tchoutchui. *Konstruktion und Regelung eines inversen Doppelpendels*. Projektseminar. 2019.