

This thesis was submitted to the  
Institute for Fluid Power Drives and Systems  
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Katharina Schmitz

**Master's Thesis**

**Development of control strategies for a hydraulic inverse  
pendulum**

by  
*Dianming Lin B. Sc.*  
412231

Supervisors: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Katharina Schmitz  
Andreas Opgenoorth M. Sc.

Field of activity: Hydraulics, digitization

Aachen, January 9, 2023

## Eidesstattliche Versicherung

Dianming Lin

Matrikel-Nummer: 412231

Ich versichere hiermit an Eides Statt, dass ich die vorliegende Master's Thesis mit dem Titel

### **Development of control strategies for a hydraulic inverse pendulum**

selbstständig und ohne unzulässige fremde Hilfe erbracht habe. Ich habe keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt. Für den Fall, dass die Arbeit zusätzlich auf einem Datenträger eingereicht wird, erkläre ich, dass die schriftliche und die elektronische Form vollständig übereinstimmen. Die Arbeit hat in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner Prüfungsbehörde vorgelegen.

Aachen, January 9, 2023

---

Dianming Lin

### **Belehrung:**

#### **§ 156 StGB: Falsche Versicherung an Eides Statt**

Wer vor einer zur Abnahme einer Versicherung an Eides Statt zuständigen Behörde eine solche Versicherung falsch abgibt oder unter Berufung auf eine solche Versicherung falsch aussagt, wird mit Freiheitsstrafe bis zu drei Jahren oder mit Geldstrafe bestraft.

#### **§ 161 StGB: Fahrlässiger Falscheid; fahrlässige falsche Versicherung an Eides Statt**

(1) Wenn eine der in den §§ 154 bis 156 bezeichneten Handlungen aus Fahrlässigkeit begangen worden ist, so tritt Freiheitsstrafe bis zu einem Jahr oder Geldstrafe ein.

(2) Strafflosigkeit tritt ein, wenn der Täter die falsche Angabe rechtzeitig berichtigt. Die Vorschriften des § 158 Abs. 2 und 3 gelten entsprechend.

Die vorstehende Belehrung habe ich zur Kenntnis genommen:

Aachen, January 9, 2023

---

Dianming Lin

The present translation is for your convenience only.  
Only the German version is legally binding.

### **Statutory Declaration in Lieu of an Oath**

Dianming Lin

Student number: 412231

I hereby declare in lieu of an oath that I have completed the present Master's Thesis entitled

#### **Development of control strategies for a hydraulic inverse pendulum**

independently and without illegitimate assistance from third parties. I have used no other than the specified sources and aids. In case that the thesis is additionally submitted in an electronic format, I declare that the written and electronic versions are fully identical. The thesis has not been submitted to any examination body in this, or similar, form.

Aachen, January 9, 2023

---

Dianming Lin

#### **Official Notification:**

##### **Para. 156 StGB (German Criminal Code): False Statutory Declarations**

Whosoever before a public authority competent to administer statutory declarations falsely makes such a declaration or falsely testifies while referring to such a declaration shall be liable to imprisonment not exceeding three years or a fine.

##### **Para. 161 StGB (German Criminal Code): False Statutory Declarations Due to Negligence**

(1) If a person commits one of the offences listed in sections 154 to 156 negligently the penalty shall be imprisonment not exceeding one year or a fine.

(2) The offender shall be exempt from liability if he or she corrects their false testimony in time. The provisions of section 158 (2) and (3) shall apply accordingly.

I have read and understood the above official notification: :

Aachen, January 9, 2023

---

Dianming Lin

## **Master's Thesis**

by Dianming Lin B. Sc.

Student number: 412231

### **Development of control strategies for a hydraulic inverse pendulum**

---

The platform built by the Institute for Fluid Power Drives and Systems (ifas) is the subject of this thesis. An inverse pendulum consists of a pendulum and a sideways moving cart. Cart movement is controlled by a hydraulic system comprising of a hydraulic valve and a hydraulic linear motor for the lateral movement.

The purpose of controlling an inverted pendulum is to swiftly return it to balance while avoiding significant swings, extreme angles, and rapid motion. The system overcomes the random disturbances and maintains a stable position only after pendulum reaches the desired position.

The following subtasks are to be worked on for this:

- Familiarize the model topic and state of the art (3 weeks)
- Reference data and understand the model (4 weeks)
- Analyze data and build Simulation (6 weeks)
- Test bench adaptation and controller setup (2 weeks)
- Implement test stand (3 weeks)
- Documentation (4 weeks)

Supervisor: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Katharina Schmitz

Andreas Opgenoorth M. Sc.

## Contents

<b>Formula symbols and indices</b>	<b>v</b>
<b>List of abbreviations</b>	<b>vii</b>
<b>1 Abstract</b>	<b>1</b>
<b>2 Introduction</b>	<b>2</b>
<b>3 Fundamental</b>	<b>3</b>
3.1 Mechanical system . . . . .	3
3.2 Hydraulic system . . . . .	3
<b>4 Description</b>	<b>5</b>
4.1 Description of system . . . . .	5
<b>5 Outlook</b>	<b>6</b>
5.0.1 Aufzählungen mit Zahlen . . . . .	7
<b>List of literature</b>	<b>I</b>
<b>List of Tables</b>	<b>II</b>
<b>List of Figures</b>	<b>III</b>

## Formula symbols and indices

### Lower case latin letters as formula symbols

$d_{piston}$	m	Piston diameter
$d_{pipe}$	m	Pipe diameter
$d_{rod}$	m	Piston rod diameter
$d_{\dot{x}}$	$\frac{Ns}{m}$	Damping coefficient of velocity
$g$	$\frac{m}{s^2}$	Gravitational acceleration
$l_{pendulum}$	m	total length of pendulum
$l_{pipe}$	m	length of pipe
$l_{pole}$	m	length of pendulum pole
$l_{rod}$	m	length of piston rod
$m_{cart}$	kg	mass of cart
$m_{cylinder}$	kg	mass of pendulum cylinder
$m_{pole}$	kg	mass of pendulum pole
$r_{cylinder}$	m	radius of pendulum cylinder
$x$	m	position of cart
$\dot{x}$	$\frac{m}{s}$	velocity of cart
$\ddot{x}$	$\frac{m}{s^2}$	acceleration of pendulum cylinder

**Upper case latin letters as formula symbols**

$A_{piston}$	$m^2$	Area of piston
$C_{H,hydcyl}$	$m^5/N$	hydraulic cabarcity of hydraulic cylinder
$C_{H,pipe}$	$m^5/N$	hydraulic cabarcity of pipe
$C_{H,sum}$	$m^5/N$	hydraulic cabarcity of hydrylic cyliner and pipe
$E_{pipe}$	$\frac{N}{m^2}$	Young modulus of pipe
$E_{oil}$	$\frac{N}{m^2}$	Young modulus of oil
$F$	N	Extern force
$J_{pen}$	$kg\ m^2$	Moment of inertia of pendulum
$V_{Hyd.cyl}$	$m^3$	Volume of hydraulic cylinder(one side)
$V_{Py}$	bar/%	Pressure at opening point
$V_{Qy}$	$m^3/s/\%$	Flow characteristics at opening point
$V_{Qp}$	$\frac{m^3}{s\ Pa}$	Flow characteristics of pressure

**Lower case greek letters as formula symbols**

$\mu_{pen}$	–	Friction coefficient of joint
$\mu_{cart}$	–	Friction coefficient of cart
$\mu$	–	Friction coefficient of gravitatinal force
$\mu_{cart}$	–	Friction coefficient of cart
$\phi$	°	angle

## List of abbreviations

### General abbreviations

<b>FFT</b>	Fast-Fourier-Transformation
<b>IQR</b>	Interquartilsabstand
<b>ML</b>	Machine Learning
<b>PC</b>	Personal Computer
<b>PCA</b>	Hauptkomponentenanalyse



## **1 Abstract**

I don't know if we need this wenn we already have the issue.  
So will also be finishd at the end of the objects.

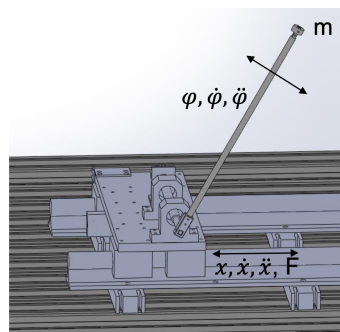
## 2 Introduction

### 3 Fundamental

Inverted pendulums, as indicated at the issue's outset, are common scientific items and find usage in various practical contexts. Model system construction by ifas is described in detail in Sections 3.1 and 3.2 of this chapter. Then, the fundamentals of mechanics and hydrodynamics for a realistic model are implemented in Section 1.3. The controller design is explored in detail in Section 1.4.

#### 3.1 Mechanical system

The pendulum consists of a cylinder and a pole, one end of the pole is inserted into the cylinder, and the other end is connected to the cart via a revolute joint, this joint allows the pendulum to rotate at least  $360^\circ$  during the movement of the cart. A rail which runs across the cart ensures that the cart's motion is restricted sideways sliding only. As seeing from Fig 3.1.



**Fig. 3.1.** sketch of inverse pendulum (/Fin15/)

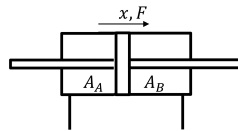
A sensor mounted on the joint measures the angle of the pendulum, and the sensor data is sent to the controller for calculate until the angle  $\phi$  reaches vertical equilibrium, aka.  $0^\circ$ .

#### 3.2 Hydraulic system

The hydraulic system is built by ifas. This system consists of a pump, a tank, a hydraulic cylinder, a capsule accumulator, and a 4/3 servo valve as its primary components.

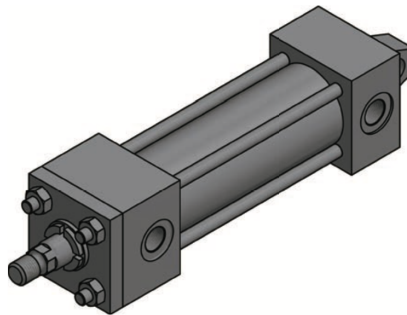
A hydraulic cylinder, also known as a linear hydraulic motor, is powered by the incompressible liquid hydraulic fluid compressed within the cylinder. By altering the pressure on both sides of the piston, the piston is pushed to move from side to side, therefore propelling the piston rod. Sketc.h will be shown form Fig 3.2.

Why would a hydraulic system be used to drive a cart instead of an electric motor? Hydraulics provides a simple yet effective method for generating a great deal of force in a small area,



**Fig. 3.2.** Sketch of hydraulic cylinder

which was designed fairly early on and requires just a very tiny apparatus to raise 1 or 2 tons of objects with using the hydraulic force. Due to the incompressibility of hydraulic oil, the oil in the cylinder resembles a solid at high pressure, which gives the Hydraulic cylinder excellent dynamic properties.



Parker Hannifin  
Cylinder Division  
Europe

**Fig. 3.3.** Parker® hydraulic cylinder HMI-ME6(/Par/)

Existing hydraulic cylinder can provide working pressure up to 700bar. The hydraulic cylinder in the unit is supplied by Parker® and the model HMI-ME6 can work up to 210 bar.

## **4 Description**

### **4.1 Description of system**

## **5 Outlook**

Hier kann man dann schreiben, was alles noch kommt.

## Beispielkapitel

Dieses Beispielkapitel dient der Darstellung häufig verwendeter Elemente in LaTeX wie Aufzählungen, Abbildungen, Tabellen oder Gleichungen. Es hat keinen Anspruch auf Vollständigkeit und kann gerne erweitert werden. Eine ausführliche Beschreibung der LaTeX-Befehle kann der Befehlsübersicht entnommen werden. Die Beispiele können kopiert und dann angepasst werden.

### Aufzählungen

#### Aufzählungen mit Punkten

- Körper
- Bindungselemente
- Koppелеlemente

#### 5.0.1 Aufzählungen mit Zahlen

1. Körper
2. Bindungselemente
3. Koppелеlemente

Abbildungen

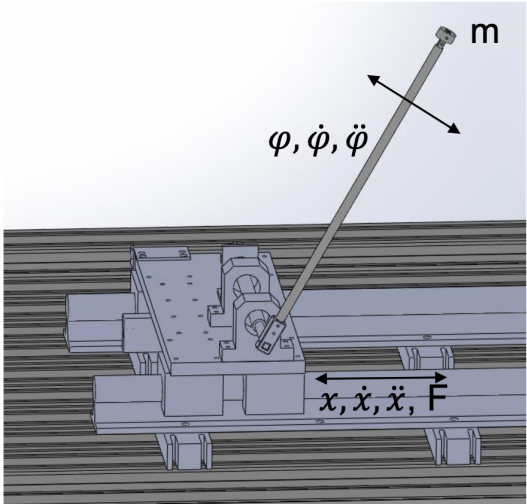


Fig. 5.1. Eine Abbildung (lange Abbildungsunterschrift mit Quelle, Quelle: /Mus12, p. 1/)

```
section*{Abbildungen}
\label{sec:abbildungen}

\begin{figure}[htbp]
\centering
\includegraphics[width = 0.5\textwidth]{Contents/Resources/superc.jpeg}
\caption{Eine Abbildung (kurze Abbildungsunterschrift ohne Quelle)}{Eine Abbildung (lange Abbildungsunterschrift mit Quelle)}
\label{fig:eine_abbildung}
\end{figure}

\begin{figure}[htbp]
\centering
\begin{subfigure}[t]{0.46\textwidth}
\includegraphics[width = 1\textwidth]{Contents/Resources/superc.jpeg}
\caption{Bild 1}
\label{fig:bild1}
\end{subfigure}
\begin{subfigure}[t]{0.46\textwidth}
\includegraphics[width = 1\textwidth]{pendulum.png}
\caption{Bild 2}
\label{fig:bild2}
\end{subfigure}
\caption{Zwei Abbildungen (Bild 1 (a) und Bild 2 (b))}
\label{fig:mehrere_abbildungen}
\end{figure}
```



(a) Bild 1

(b) Bild 2

Fig. 5.2. Bild 1 (a) und Bild 2 (b)



## Tabellen

**Table 5.1:** Tabelle mit automatischer Ausrichtung

l	c	r
a	b	c
aa	bb	cc
aaa	bbb	ccc

**Table 5.2:** Tabelle mit Ausrichtung an Trennungszeichen

a	b
1234.000,	1234
1234.000,	123
1234.000,	12
1234.000	1

**Table 5.3:** Tabelle mit Zellen über mehrere Zeilen oder Spalten

l	c	r
ab		c
aa	bb	cc
	bbb	ccc

## Gleichungen

Newton hat folgenden Zusammenhang entdeckt:

$$F = ma \quad (5.1)$$

Das war das mit dem Apfel und so.

## Anführungszeichen

Es gibt mehrere Möglichkeiten deutsche Anführungszeichen einzufügen:

„test“

"test"

## Zitationen

Zitation einer Quelle: /Mus12/

Zitation einer Quelle mit Seitenangabe: /Mus12, pp. 12–16/

Zitation mehrerer Quellen: /Mus12; Mus11/

Zitation mehrerer Quellen mit Seitenangabe: /Mus12, pp. 12–16; Mus11, p. 3/

## List of literature

- /Fin15/ Findeisen, S.  
*Zykluszeitreduzierung beim Druckgießen durch mehrteiligen Werkzeugaufbau*  
AutoUni, 2015.
- /Mus11/ Musterfrau, E.  
*Musterartikel*  
In: Musterjournal, 999 (2011) 11, pp. 1–12.
- /Mus12/ Mustermann, M.  
*Musterbuch*, Mustermäßig Bücher schreiben  
Musterstadt: Musterverlag, 2012.
- /Par/ Parker®  
*HMI/HMD Hydraulic Cylinders*.

**List of Tables**

5.1	Tabelle mit automatischer Ausrichtung . . . . .	9
5.2	Tabelle mit Ausrichtung an Trennungszeichen . . . . .	9
5.3	Tabelle mit Zellen über mehrere Zeilen oder Spalten . . . . .	9

## List of Figures

3.1	Inverse pendulum sketch . . . . .	3
3.2	Hydraulic cylinder sketch . . . . .	4
3.3	Parker® Hydraulic cylinder . . . . .	4
5.1	Eine Abbildung (kurze Abbildungsunterschrift ohne Quelle) . . . . .	8
5.2	Zwei Abbildungen . . . . .	8