

Regelung eines Furuta Pendulums

Thomas SCHILDHAUER

Dustin HORENBURG

Kai HAMANN

9. September 2015

Mechatronics Lab

Summer 2015

Advisor: Dipl.-Ing. Martin Gomse

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	3
2	Theorie	4
2.1	Furuta Pendel	4
2.1.1	Annahmen	5
2.1.2	Formulierung des Problems nach Lagrange	5
3	Identifikation der Parameter	10
4	Design der Controller	11
4.1	Pendelidentifikation	11
4.2	Signalverarbeitung	11
4.3	Swing-Up-Controller	12
4.4	Zweipunktregler	12
4.5	Catcher	12
4.6	Stabilizer	13
4.7	Soft-Switch	13
5	Ergebnisse	15
5.1	Swing-Up	15
5.2	Stabilisierer	15
5.3	Catcher	15
5.4	Watchdog	15

1 Einleitung

Diese Dokumentation...

2 Theorie

In diesem Abschnitt wird auf die Theorie des sogenannten *Furuta Pendels* eingegangen. Zunächst wird ein Modell des Pendels beschrieben. Im Anschluss wird die Theorie dieses Modells auf ein echtes Furuta Pendel angewandt.

2.1 Furuta Pendel

Bei dem *Furuta Pendel*, auch drehbares invertiertes Pendel genannt, handelt es sich um ein 1992 von Katsuhisa Furuta entwickeltes mechanisches Pendel. Es besteht aus einem angetriebenen Arm, welcher in der horizontalen Ebene rotieren kann. An diesem Arm ist ein Pendelarm befestigt, welcher frei in der zum angetriebenen Arm orthogonalen Ebene rotieren kann. Das Furuta Pendel ist ein Beispiel eines komplexen nichtlinearen Oszillators. Cazzolato and Prime (2011)

Antwort auf deine Frage: Lieber in der Einleitung!

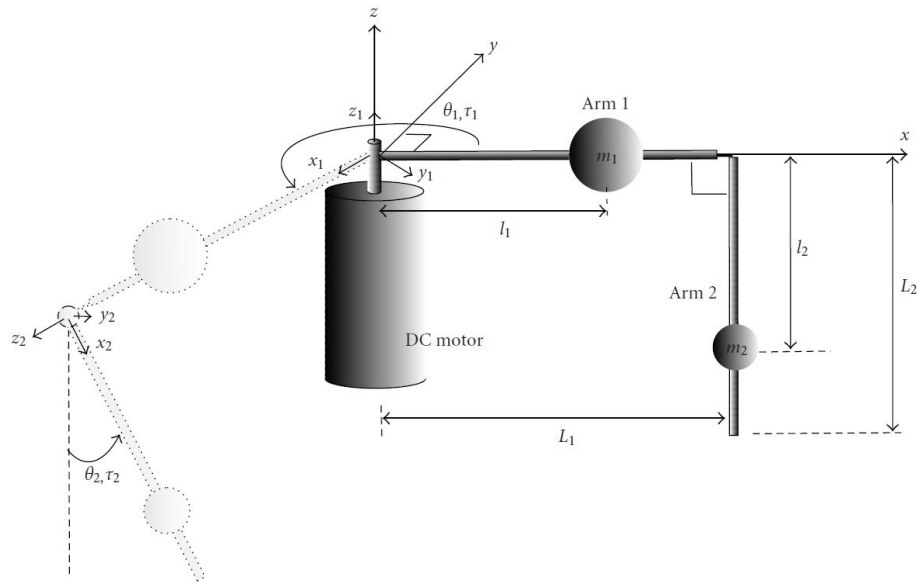


Abbildung 1: Schema des Furuta Pendels nach Cazzolato and Prime (2011).

Abbildung 2.1 zeigt das Schema eines Furuta Pendels, welches von einem DC-Elektromotor angetrieben wird. Mit dem Motor wird ein Drehmoment τ_1 auf Arm 1 des Pendels gebracht. Das Drehmoment τ_2 bezeichnet das Kopplungsmoment zwischen Arm 1 und Arm 2. Die Verbindung zwischen Arm 1 und Arm 2 rotiert frei und ist nicht angetrieben. Die beiden Arme haben Längen L_1 und L_2 sowie Massen m_1 und m_2 . l_1 und l_2 bezeichnen die jeweiligen Abstände der Massenmittelpunkte zum Rotationspunkt der Arme. Die Arme haben Trägheitstensoren

J_1 und J_2 um ihren jeweiligen Massenmittelpunkt und ihre Gelenke unterliegen linearer Dämpfung mit Dämpfungskonstanten b_1 und b_2 .

2.1.1 Annahmen

Vor der Aufstellung des Gleichungssystems werden in Cazzolato and Prime (2011) einige Annahmen getroffen, die an dieser Stelle kurz wiederholt werden:

- a. Die Kopplung zwischen Motorachse und Arm 1 wird als ideal starr angenommen.
- b. Die Motorachse und beide Pendelarme werden als ideal starr angenommen.
- c. Die Koordinatensysteme von Arm 1 und Arm 2 sind die Hauptachsensysteme, sodass die Trägheitstensoren diagonal sind.
- d. Die Trägheit des Motors wird vernachlässigt.
- e. Es wird von reiner linearer (viskoser) Dämpfung ausgegangen.

2.1.2 Formulierung des Problems nach Lagrange

Mit den in Abschnitt 2.1.1 getroffenen Annahmen erhalten wir durch den Ansatz von Lagrange'schen Tensoren die nachfolgenden Formeln ?.

Die potentielle und die kinetische Energie von Arm 1:

$$E_{p1} = 0 \quad E_{k1} = \frac{1}{2}(v_{1c}^T m_1 v_{1c} + \omega_1^T J_1 \omega_1) = \frac{1}{2} \dot{\theta}_1^2 (m_1 l_1 + J_{1zz})$$

Die potentielle und kinetische Energie von Arm 2:

$$E_{p2} = g m_2 l_2 (\cos(\theta_2) - 1)$$

$$\begin{aligned} E_{k2} &= \frac{1}{2}(v_{2c}^T m_2 v_{2c} + \omega_2^T J_2 \omega_2) \\ &= \frac{1}{2} \dot{\theta}_1^2 (m_2 L_2^2 + (m_2 l_2^2 + J_{2yy}) \sin^2(\theta_2) + J_{2xx} \cos^2(\theta_2)) \\ &\quad + \frac{1}{2} \dot{\theta}_2^2 (J_{2zz} + m_2 l_2^2) + m_2 L_1 l_2 \cos(\theta_2) \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 \end{aligned}$$

$$L = E_k - E_p \tag{1}$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) + b_i \dot{q}_i - \frac{\partial L}{\partial q_i} = Q_i \tag{2}$$

$$\begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left(\begin{array}{c} \ddot{\theta}_1(J_{1zz} + m_1 l_1^2 + m_2 L_1^2 + (J_{2yy} + m_2 l_2^2) \\ \times \sin^2(\theta_2) + J_{2xx} \cos^2(\theta_2)) + \ddot{\theta}_2 m_2 L_1 l_2 \cos(\theta_2) \\ - m_2 L_1 l_2 \sin(\theta_2) \dot{\theta}_2^2 + \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 \sin(2\theta_2) \\ \times (m_2 l_2^2 + J_{2yy} - J_{2xx}) + b_1 \dot{\theta}_1 \end{array} \right) \\ \left(\begin{array}{c} \ddot{\theta}_1 m_2 L_1 l_2 \cos(\theta_2) + \ddot{\theta}_2 (m_2 l_2^2 + J_{2zz}) \\ + \frac{1}{2} \dot{\theta}_1 \sin(2\theta_2) (-m_2 l_2^2 - J_{2yy} + J_{2xx}) \\ + b_2 \dot{\theta}_2 + g m_2 l_2 \sin(\theta_2) \end{array} \right) \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} J_1 &= \begin{bmatrix} J_{1xx} & 0 & 0 \\ 0 & J_{1yy} & 0 \\ 0 & 0 & J_{1zz} \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & J_1 & 0 \\ 0 & 0 & J_1 \end{bmatrix} \\ J_2 &= \begin{bmatrix} J_{2xx} & 0 & 0 \\ 0 & J_{2yy} & 0 \\ 0 & 0 & J_{2zz} \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & J_2 & 0 \\ 0 & 0 & J_2 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \hat{J}_1 &= J_1 + m_1 l_1^2 \\ \hat{J}_2 &= J_2 + m_2 l_2^2 \\ \hat{J}_0 &= J_1 + m_1 l_1^2 + m_2 L_1^2 \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left(\begin{array}{c} \ddot{\theta}_1 (\hat{J}_0 + \hat{J}_2 \sin^2(\theta_2)) + \ddot{\theta}_2 m_2 L_1 l_2 \cos(\theta_2) \\ - m_2 L_1 l_2 \sin(\theta_2) \dot{\theta}_2^2 + \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 \hat{J}_2 \sin(2\theta_2) + b_1 \dot{\theta}_1 \end{array} \right) \\ \left(\begin{array}{c} \ddot{\theta}_1 m_2 L_1 l_2 \cos(\theta_2) + \ddot{\theta}_2 \hat{J}_2 - \frac{1}{2} \dot{\theta}_1^2 \hat{J}_2 \sin(2\theta_2) \\ + b_2 \dot{\theta}_2 + g m_2 l_2 \sin(\theta_2) \end{array} \right) \end{bmatrix} \quad (6)$$

Die folgenden Gleichungen enthalten noch den Fehler, den wir finden sollten.

Ich habe die Lösung gerade nicht parat.

$$\ddot{\theta}_1 = \frac{\begin{bmatrix} -\hat{J}_2 b_1 \\ m_2 L_1 l_2 \cos(\theta_2) b_2 \\ -\hat{J}_2^2 \sin(2\theta_2) \\ -\frac{1}{2} \hat{J}_2 m_2 L_1 l_2 \cos(\theta_2) \sin(2\theta_2) \\ \hat{J}_2 m_2 L_1 l_2 \sin(\theta_2) \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \\ \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 \\ \dot{\theta}_1^2 \\ \dot{\theta}_2^2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \hat{J}_2 \\ -m_2 L_1 l_2 \cos(\theta_2) \\ \frac{1}{2} m_2^2 l_2^2 L_1 \sin(2\theta_2) \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \\ g \end{bmatrix}}{\hat{J}_0 \hat{J}_2 + \hat{J}_2^2 \sin^2(\theta_2) - m_2^2 L_1^2 l_2^2 \cos^2(\theta_2)} \quad (7)$$

$$\ddot{\theta}_2 = \frac{\begin{bmatrix} m_2 L_1 l_2 \cos(\theta_2) b_1 \\ -b_2 (\hat{J}_0 + \hat{J}_2 \sin^2(\theta_2)) \\ m_2 L_1 l_2 \hat{J}_2 \cos(\theta_2) \sin(2\theta_2) \\ -\frac{1}{2} \sin(2\theta_2) (\hat{J}_0 \hat{J}_2 + \hat{J}_2^2 \sin^2(\theta_2)) \\ -\frac{1}{2} m_2^2 L_1^2 l_2^2 \sin(2\theta_2) \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \\ \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 \\ \dot{\theta}_1^2 \\ \dot{\theta}_2^2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -m_2 l_2 \cos(\theta_2) \\ \hat{J}_0 + \hat{J}_2 \sin^2(\theta_2) \\ -m_2 l_2 \sin(\theta_2) (\hat{J}_0 + \hat{J}_2 \sin^2(\theta_2)) \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \\ g \end{bmatrix}}{\hat{J}_0 \hat{J}_2 + \hat{J}_2^2 \sin^2(\theta_2) - m_2^2 L_1^2 l_2^2 \cos^2(\theta_2)} \quad (8)$$

$$\begin{aligned}
\theta_{1e} &= 0 \\
\theta_{2e} &= \pi \\
\dot{\theta}_{1e} &= 0 \\
\dot{\theta}_{2e} &= 0
\end{aligned} \tag{9}$$

$$\begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \\ \ddot{\theta}_1 \\ \ddot{\theta}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} & A_{34} \\ A_{41} & A_{42} & A_{43} & A_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ B_{31} & B_{32} \\ B_{41} & B_{42} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \end{bmatrix} \tag{10}$$

$$\begin{aligned}
A_{31} &= 0 \\
A_{32} &= \frac{gm_2^2 l_2^2 L_1}{(\hat{J}_0 \hat{J}_2 - m_2^2 L_1^2 l_2^2)} \\
A_{33} &= \frac{-b_1 \hat{J}_2}{(\hat{J}_0 \hat{J}_2 - m_2^2 L_1^2 l_2^2)} \\
A_{34} &= \frac{-b_2 m_2 l_2 L_1}{(\hat{J}_0 \hat{J}_2 - m_2^2 L_1^2 l_2^2)} \\
A_{41} &= 0 \\
A_{42} &= \frac{gm_2 l_2 \hat{J}_0}{(\hat{J}_0 \hat{J}_2 - m_2^2 L_1^2 l_2^2)} \\
A_{43} &= \frac{-b_1 m_2 l_2 L_1}{(\hat{J}_0 \hat{J}_2 - m_2^2 L_1^2 l_2^2)} \\
A_{44} &= \frac{-b_2 \hat{J}_0}{(\hat{J}_0 \hat{J}_2 - m_2^2 L_1^2 l_2^2)} \\
B_{31} &= \frac{\hat{J}_2}{(\hat{J}_0 \hat{J}_2 - m_2^2 L_1^2 l_2^2)} \\
B_{41} &= \frac{m_2 L_1 l_2}{(\hat{J}_0 \hat{J}_2 - m_2^2 L_1^2 l_2^2)} \\
B_{32} &= \frac{m_2 L_1 l_2}{(\hat{J}_0 \hat{J}_2 - m_2^2 L_1^2 l_2^2)} \\
B_{42} &= \frac{\hat{J}_0}{(\hat{J}_0 \hat{J}_2 - m_2^2 L_1^2 l_2^2)}
\end{aligned} \tag{11}$$

$$\tau = K_m i \tag{12}$$

Herleitung der Parameter (1 zu 1 aus dem Dokument übernommen.. die Herangehensweise muss also noch verändert werden!):

$$\begin{aligned} L_1 &= l_a \\ L_2 &= l_{pm} \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} m_1 &= m_b + m_r + m_{sens} \\ m_2 &= m_p + m_{pm} \end{aligned} \quad (14)$$

$$J_{arm} = m_r \frac{l_r^2}{12} + m_r (\frac{1}{2}l_r + l_b - l_a)^2 \quad (15)$$

$$J_{pend1} = m_b l_a^2 \quad (16)$$

$$J_{sens} = m_{sens} (l_a - l_b - l_r - \frac{1}{2}l_c)^2 \quad (17)$$

$$J_{ps} = m_p (r_b + \frac{1}{2}l_p)^2 \quad (18)$$

$$J_{pm} = m_{pm} l_{pm}^2 \quad (19)$$

$$J_{arm} + J_{pend1} + J_{sens} = m_1 l_1^2 J_{pm} + J_{ps} = m_2 l_2^2 \quad (20)$$

$$l_1 = \sqrt{\frac{m_r \frac{l_r^2}{12} + m_r (\frac{1}{2}l_r + l_b - l_a)^2 + m_b l_a^2 + m_{sens} (l_a - l_b - l_r - \frac{1}{2}l_c)^2}{m_1}} \quad (21)$$

$$l_2 = \sqrt{\frac{m_{pm} l_{pm}^2 + m_p (r_b + \frac{1}{2}l_p)^2}{m_2}} \quad (22)$$

... Hier sollten wir gucken, ob wie die Umformungen evtl. anders vornehmen.

$$ListederZahlenwerte \quad (23)$$

$$(24)$$

$$(25)$$

Swing-Up

$$U = n \cdot g \cdot \text{sign}(E - E_0) \dot{\theta}_2 \cos(\theta_2) \quad (26)$$

$$E = E_{pot} + E_{kin} \tag{27}$$

$$\begin{aligned} E_{pot} &= m_2 g l_2 (\cos(\theta_2) - 1) \\ E_{kin} &= \frac{1}{2} \dot{\theta}_2^2 \hat{J}_2 \end{aligned} \tag{28}$$

$$\tag{29}$$

3 Identifikation der Parameter

4 Design der Controller

iiiiii HEAD

4.1 Pendelidentifikation

Beim Starten des Programmes zur Regelung des Pendels wird zunächst identifiziert, um welche Pendelaufbaus es sich handelt. Es wird dabei zwischen zwei zuvor definierten Pedenlarmmlängen unterschieden. Für die Identifikation wird durch den Motor ein kurzer Impuls auf das Pendel gegeben. Nach diesem Impuls wird das Pendel schwingen gelassen, während der Controller den Verlauf von θ_2 aufzeichnet. Im Anschluss daran ist es möglich, aus den erhobenen Daten die Frequenz von θ_2 zu berechnen. Da sich die Frequenzen der Pendelkonfогurationen unterscheiden, kann das Programm so die entsprechenden Modelldaten laden und für die Regelung verwenden. In Abbildung 4.1 ist dieser Vorgang in den ersten fünf Sekunden zu erkennen.

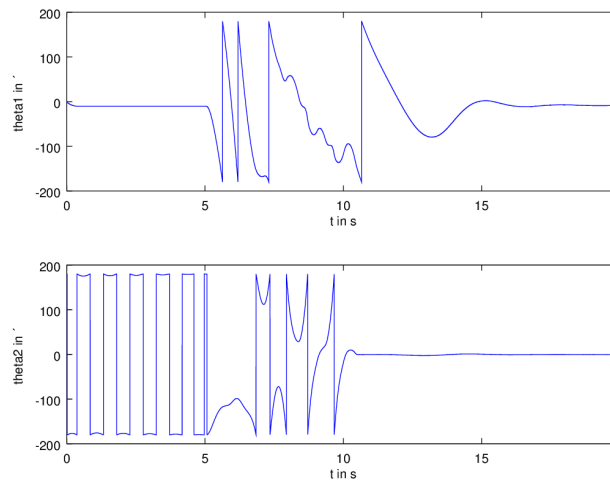


Abbildung 2: Initiale Pendelidentifikation

Irgendwas stimmt mit der Referenzierung auf diese Abbildung nicht. Was habe ich falsch gemacht?

Wobei ich gerade sehe, dass das bei Thomas oben ebenfalls nicht geklappt hat

=====

4.2 Signalverarbeitung

Das Ausgangssignal der Inkrementalgeber wird zunächst auf Radiant-Werte umgerechnet

4.3 Swing-Up-Controller

Der Swing-Up-Controller soll dem Aufschwingen des Pendels dienen und im Bereich zwischen circa $20^\circ < |\theta_2| < 90^\circ$ und basiert auf der Lyapunov-Funktion. Diese führt dazu, dass sich bei der Wahl von $\theta_2 = 0$ in der aufrechten Position des Pendels ein Regler ergibt, welche die Energie des Pendels minimiert:

$$U = n \cdot g \cdot \text{sign}(E - E_0) \dot{\theta}_2 \cos(\theta_2) \quad (30)$$

Der Term E_0 beschreibt die gewünschte, minimale Energie des Systems. Die Energie des Pendels E setzt sich aus der potentiellen Energie E_{pot} und der kinetischen Energie E_{kin} zusammen. Die potentielle Energie lässt sich aufgrund der Referenz im höchsten Punkt des Pendels wie folgt berechnen:

$$E_{pot} = m_2 \cdot g \cdot l_2 \cdot (\cos(\theta_2) - 1) \quad (31)$$

Die kinetische Energie ergibt sich zu:

$$E_{kin} = \frac{J_0}{2} \cdot \dot{\theta}_2^2 \quad (32)$$

Die Umsetzung des Reglers in Simulink ist in ABB zu sehen.

Abbildung 3: Swing-Up-Controller

4.4 Zweipunktregler

Für den Bereich zwischen circa $20^\circ < |\theta_2| < 90^\circ$ soll der Zweipunktregler (eng. Bang-bang control) das invertierte Pendel regeln. Dieser schaltet die maximale positive oder negative Spannung auf den Motor, abhängig von θ_2 und $\dot{\theta}_2$, daraus folgt Übertragungsfunktion:

$$U = -10 \cdot \text{sign}(\theta_2 \cdot \cos(\dot{\theta}_2)) \quad (33)$$

Das entsprechende Simulink-Modell in Abb. zu sehen.

Abbildung 4: Swing-Up-Controller

4.5 Catcher

Der Catcher dient der genaueren Regelung des Pendels nahe des oberen Equilibriums von θ_2 . Um in dem Bereich optimal und robust zu Regeln, wird ein LQ-Regler verwendet. Dieser basiert auf der Minimierung der Cost-Function, welche folgenden Form besitzt:

$$V = \int_0^\infty (x^T(t)Qx(t) + u^T(t)Ru(t))dt \quad (34)$$

Erhöht man die Diagonalwerte der Q-Matrix, werden die Fehler stärker gewichtet, allerdings steigt auch der Aufwand der Regelung. Die Matrix lässt sich über die Controllability-Matrix C und den linken Eigenvektor q der Matrix A wie folgt berechnen:

$$Q = C' \cdot q'^T \cdot q^T \cdot C \quad (35)$$

Für den Vektor q wurden folgenden Werte angenommen:

$$q = \begin{bmatrix} 180/\pi/180 \\ 0 \\ 0 \\ 180/\pi/0.1 \end{bmatrix} \quad (36)$$

Die Diagonalwerte der Matrix R der Cost-Funktion beeinflussen die Geschwindigkeit der Regelung und wurden zunächst für den Catcher auf eins gesetzt. Zusammen mit den Eingangs- und Ausgangsmatrizen A und B lässt sich mithilfe des Matlab-Befehls $F = -lqr(A, B, Q, R)$ der LQR-Controller generieren. Das Simulink-Modell ist in Abb zu sehen.

4.6 Stabilizer

Zur Rückführung des Pendels auf die Ausgangswinkel von θ_1 und Beibehaltung der oberen Equilibrium-Position wird auch eine LQ-Regelung verwendet, welche sich nur durch die dreifache Einheitsmatrix für R und folgenden q -Vektor von dem Catcher unterscheidet:

$$q = \begin{bmatrix} 180/\pi/1 \\ 0 \\ 0 \\ 180/\pi/0.1 \end{bmatrix} \quad (37)$$

~~~~~ master

## 4.7 Soft-Switch

Um den Übergang zwischen dem Catcher und dem stabilisierenden Controller möglichst weich zu gestalten, wurde ein Soft-Switch implementiert.

Ziel dieses Switches ist es, extreme Sprünge des Controllerausgangssignals beim Umschalten zwischen den Controllern zu verhindern, selbst wenn die einzelnen Regelsignale des Catchers und des Stabilisierers sehr weit auseinander liegen.

Die Umsetzung erfolgt, indem die einzelnen Regelsignale mit Verstärkungsfaktoren multipliziert werden, die in der Summe genau 1 ergeben, und sich das Gesamt-signal aus den gewichteten Einzelsignalen zusammensetzt.

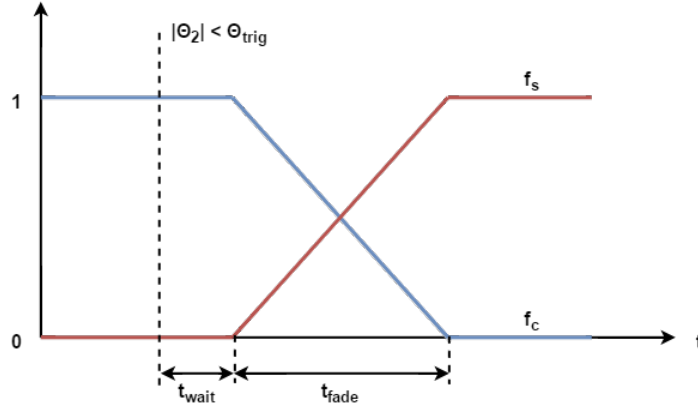


Abbildung 5: Soft-Switch

Zunächst ist lediglich der Catcher aktiv. Dies kommt dadurch zum Ausdruck, dass sein Verstärkungsfaktor  $f_c$  den Wert 1 besitzt. Folglich muss der Faktor  $f_s$  des Stabilisierers 0 betragen.

Wenn nun der Betrag des Winkels  $\theta_2$  für mindestens  $t_{wait}$  kleiner als  $\theta_{trig}$  ist, beginnt der Crossfader, das Verhältnis der Regelsignale zu verändern. Während der Faktor des Catchers innerhalb der Zeit  $t_{fade}$  linear von 1 auf 0 abfällt, erhöht sich der Faktor des Stabilisierers gegenläufig innerhalb derselben Zeit von 0 auf 1. Nach Abschluss dieses Vorgangs ist nur noch der Stabilisierer für die Regelung des Pendels zuständig (vgl. Abbildung 4.7).

Wird zu irgendeiner Zeit der Winkel  $\theta_{trig}$  überschritten, wird instantan mittels eines Hardswitches der Catcher wieder aktiv geschaltet.

In unserem Controller wurden die Werte wie folgt gewählt:

$$\begin{aligned}\theta_{trig} &= 5^\circ \\ t_{wait} &= 0.5s \\ t_{fade} &= 5s\end{aligned}$$

*Hinweis:* Die Funktionsweise dieses Verfahrens ist dabei identisch mit der eines Crossfaders, wie er teilweise beim Übergang zwischen zwei Musikstücken verwendet wird.

## 5 Ergebnisse

In diesem Kapitel sind Versuchsergebnisse dargestellt, die an dem geregelten Pendel gewonnen wurden. Dafür wurde, das stabilisierte Pendel mit einem kurzen Störimpuls beaufschlagt und die Reaktion aufgezeichnet. Dieser Störimpuls erfolgte per Hand und wurde in unterschiedlichen Stärken durchgeführt, um so die einzelnen Controller testen zu können.

### 5.1 Swing-Up

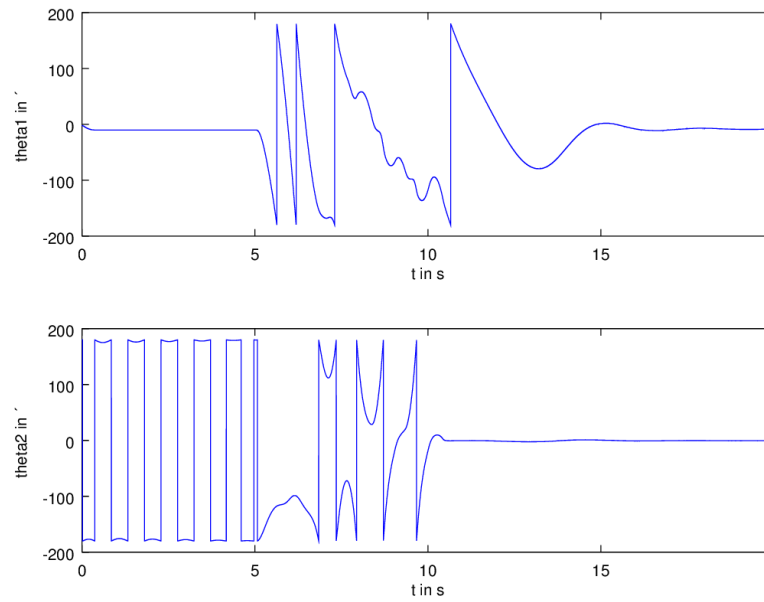


Abbildung 6: Der Swing-Up-Vorgang

### 5.2 Stabilisierer

### 5.3 Catcher

### 5.4 Watchdog

Hier habe ich echt wenig Ahnung von!

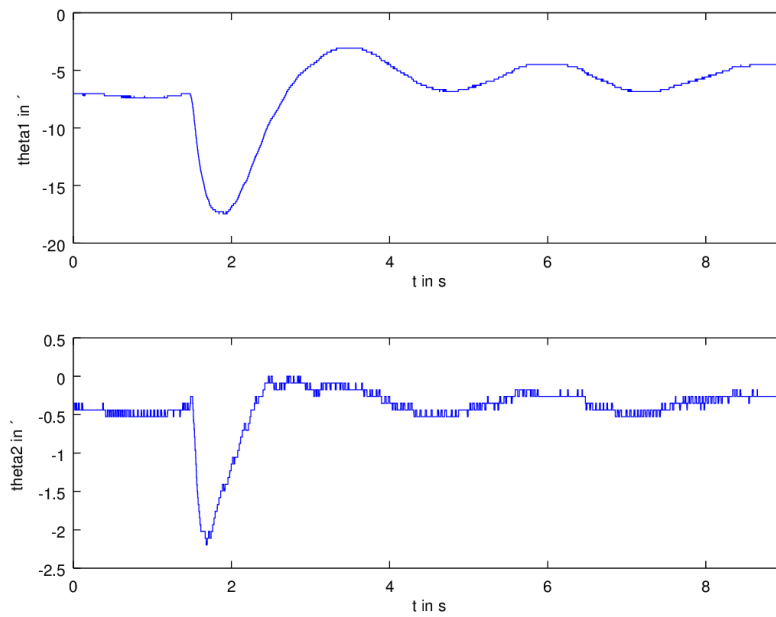


Abbildung 7: Störung  $> 5^\circ$



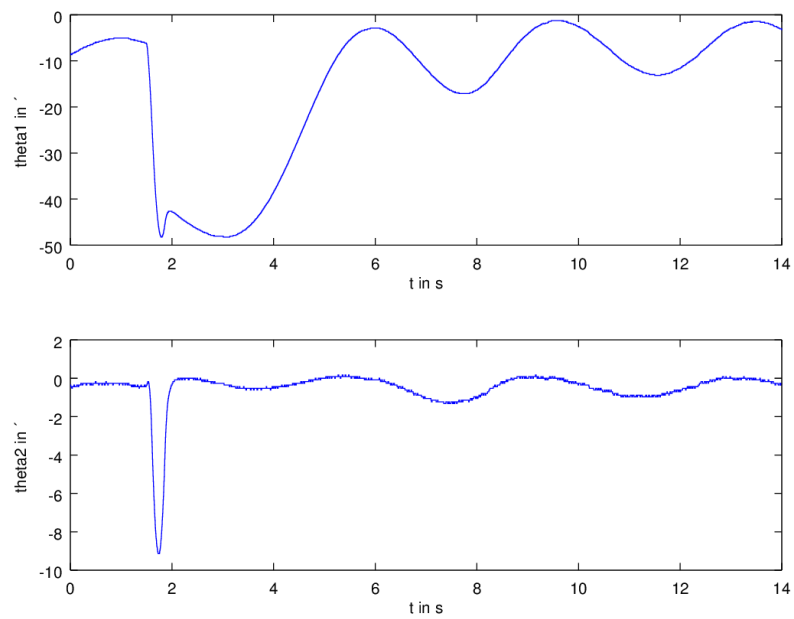


Abbildung 8: Störung  $<5^\circ$

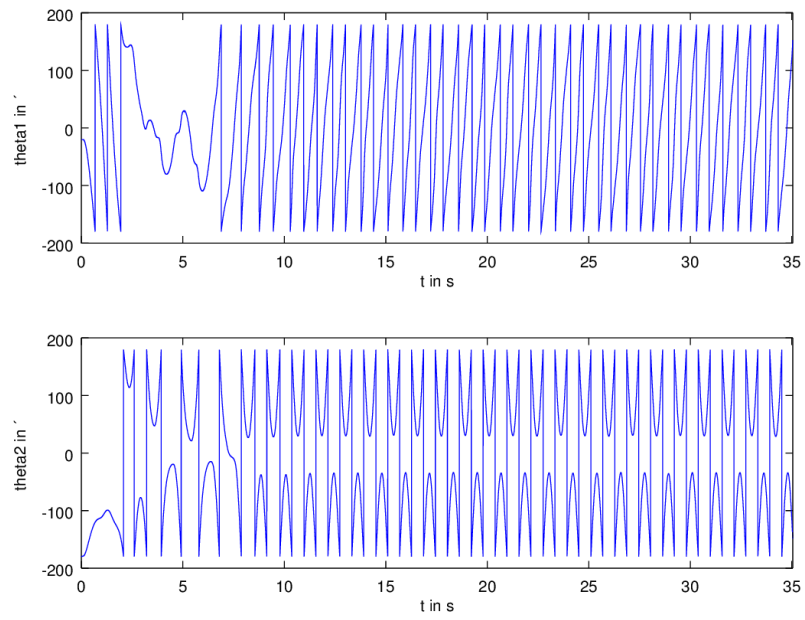


Abbildung 9: Watchdog

## Literatur

Cazzolato, B. S. and Prime, Z. (2011). On the dynamics of the furuta pendulum.  
*Journal of Control Science and Engineering*, 2011(6):1–8.