

Projektarbeit - Inverses Pendel

Thomas Enzinger

Fakultät Maschinenbau
Hochschule für angewandte Wissenschaften Regensburg

18. Mai 2015

Projektteam: Thomas Enzinger, Christoph Bachl, Heinz Neuhofer

Übersicht

- XPC - Target
- Versuchsaufbau
- Aufschwingen des Pendels
- Implementierung der Regelung
- Offene Aufgabenstellungen

Übersicht

- **XPC - Target**
- Versuchsaufbau
- Aufschwingen des Pendels
- Implementierung der Regelung
- Offene Aufgabenstellungen

XPC - Target, Inhalte

- Was ist XPC - Target?
- Kommunikation: XPC - Target mit Realsystem
- Wichtige Eckpunkte
- Beispiel

Was ist XPC - Target?

- Ein Produkt von MathWorks
- Echtzeit-Software-Entwicklungsumgebung
 - Simulink (bevorzugte Programmiertechnik)
 - Matlabskripte /-funktionen
 - C und Fortran-Routinen
- Unterstützung von x86-basierende Echtzeitsystemen

Kommunikation: XPC - Target mit Realsystem



Abb. 1, Quelle: Matlab R2011b XPC-Target Dokumentation

Wichtige Eckpunkte von XPC-Target

- Eine produktunabhängige Entwicklungsplattform
- Sehr niedrige Samplezeiten, "A small block diagram can run with a sample time as fast as $20 \text{ } \mu\text{s}$ (50 kHz)"
Quelle: Matlab R2011b XPC-Target Dokumentation
- Singalaufzeichnung im Programm steuerbar
- Support von unterschiedlichen Compilern (Visual C, ICC, GCC)

Programmbeispiel

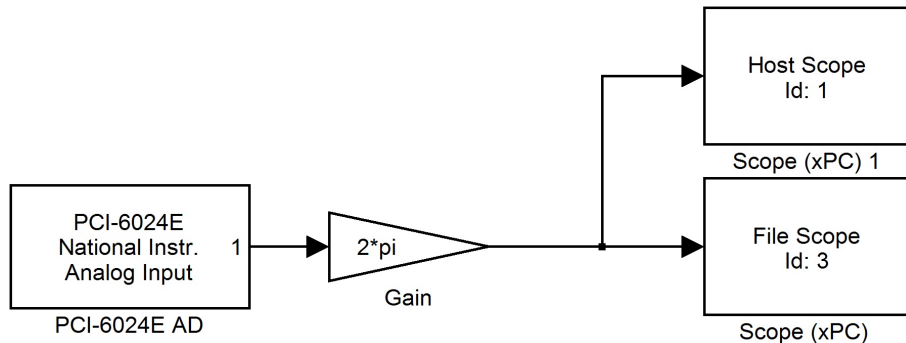


Abb. 2, Einfaches Simulink Beispiel

Übersicht

- XPC - Target
- **Versuchsaufbau**
- Aufschwingen des Pendels
- Implementierung der Regelung
- Offene Aufgabenstellungen

Versuchsaufbau, Inhalte

- Wichtige Daten für die Inbetriebnahme
- Winkelsensor
- Algorithmus zur Auswertung der Signalfolge
- Erste Eindrücke zwischen XPC - Target und dSpace

Wichtige Daten für die Inbetriebnahme

- Aktor: Elektromotor
 - Signalverstärker, Eingangssignal: $\pm 10V$
 - Netzteil, liefert nicht die benötigte Leistung \rightarrow elektr. Unterversorgung
- Winkelsensoren, Impulsgeber mit einer 3600 Teilung
- Echtzeitbetriebssystem von National Instrument
 - Rechner mit verbauten Multifunktions-Datenerfassungsmodul PCI-6024E
 - Anschlussblock
- weitere Bauelemente

Winkelsensoren



Abb. 3, Quelle:
Datenblatt MHL40

- Optoelektrischer Impulsgeber MHL40
Firma: MEGATRON Elektronik AG & Co.
- Auflösung: 3600 Impulse pro Umdrehung
- 2 Kanäle
- Betriebsspannung: 5V

Winkelsensoren - Interface

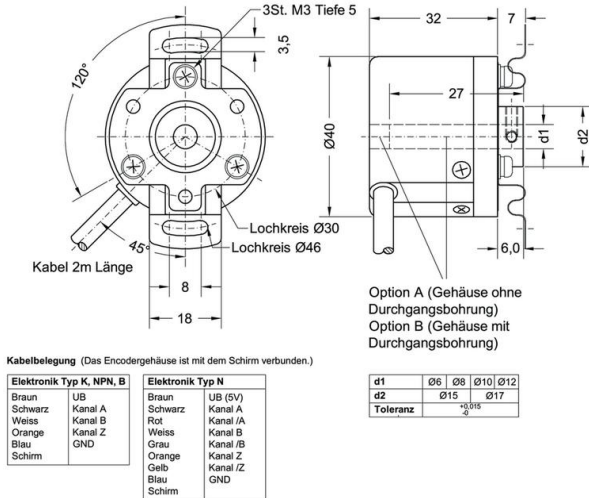
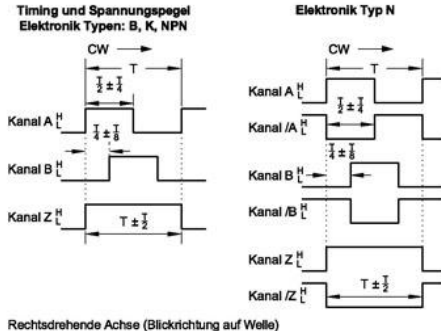


Abb. 4, Quelle: Datenblatt MHL40

Winkelsensor - Elektronik



Elektronik	Flankenanstieg
B, K	1µs bei Isink 20mA und 2m Kabel
NPN	12-24V bei 820 Ohm
	5V bei 4,7 kOhm
N	0,5µs bei Isink 20mA und 2m Kabel

Elektronik	Signalpegel
B	Low bei 30mA max 0,4VDC
	High bei 10mA min Ub -1,5VDC
K	Low bei 30mA max 0,4VDC
NPN	Low bei 10mA max 0,4VDC
	Low bei 20mA max 0,5V
N	High bei -20mA min Ub 2,5V

Abb. 5, Quelle: Datenblatt MHL40

Algorithmus zur Auswertung der Signalfolge

Ziel:

- Speicherung der beiden Kanäle als Zahlenfolge
- Ein Zahlenwert muss die Informationen der Kanäle abbilden.

Algorithmus zur Auswertung der Signalfolge

Ziel:

- Speicherung der beiden Kanäle als Zahlenfolge
- Ein Zahlenwert muss die Informationen der Kanäle abbilden.

Voraussetzungen für die Implementierung

- Datentyp des Speichers: signed intxxx
 - **signed** vorzeichenbehaftet
 - **int** integer, Ganzzahl
 - **xxx** Anzahl der verwendeten Bits für die Ganzzahl
Beispiel: 32bit → signed int32

Signalfolge von Kanal A und Kanal B

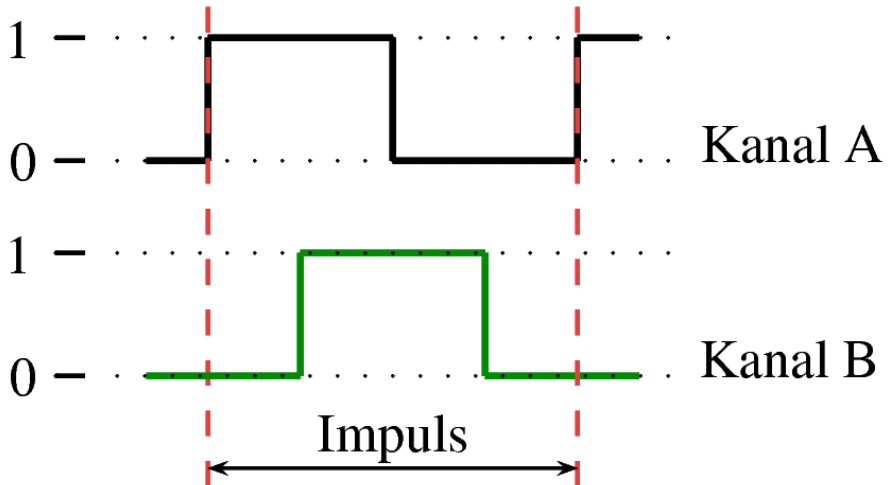


Abb. 6

Der XOR-Operator

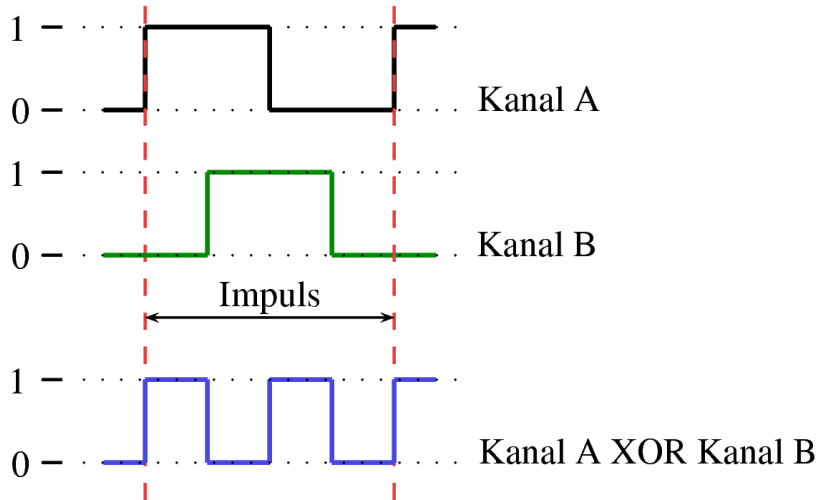


Abb. 7

Optimale Auswertung der Signalfolge

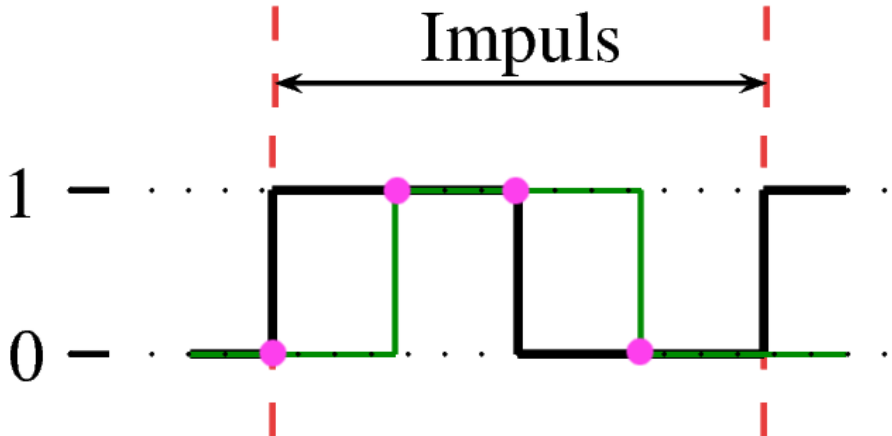


Abb. 8

Zusammenfassung

- Bei optimaler Auswertung folgen vier Ticks pro Impuls
- Drehrichtung kann aus der Phasenverschiebung ermittelt werden
- 2-3 zusätzliche Variablen vom Typ int1 bzw. boolean werden benötigt
- Endliche Genauigkeit
 - Begrenzung des Maximalwertes
 - Begrenzung der max. Umdrehungen in eine Richtung

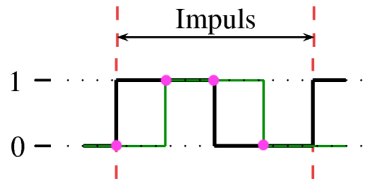
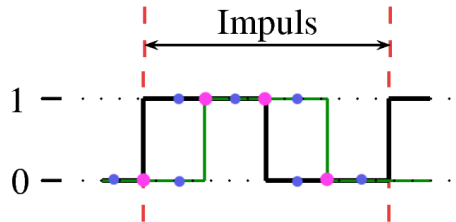


Abb. 8

- mehr als 4 Samples pro Impuls
- $n_{Motor, Nenndrehzahl} = 2.700 \frac{U}{min}$


$$\omega_{max} < \frac{1}{4} \frac{\phi_{Impuls}}{t_{Sample}}$$

Berechnung für den Motor

$$\omega_{Motor,max} = 2.700 \frac{U}{min} \cdot 2 \cdot \pi \cdot \frac{rad}{U} \frac{min}{60s} = 90\pi \frac{rad}{s} \approx 290 \frac{rad}{s}$$

$$\phi_{impuls} = \frac{2 \cdot \pi}{3600} rad = \frac{\pi}{1800} rad$$

$$t_{Sample,min} < \frac{1}{8} \frac{\phi_{Impuls}}{\omega_{Motor,max}} = \frac{\pi}{8 \cdot 1800 \cdot 90\pi} s = \frac{1}{1.296.000} s \approx 0,77 \mu s$$

Berechnung für den Motor

$$\omega_{Motor,max} = 2.700 \frac{U}{min} \cdot 2 \cdot \pi \cdot \frac{rad}{U} \frac{min}{60s} = 90\pi \frac{rad}{s} \approx 290 \frac{rad}{s}$$

$$\phi_{impuls} = \frac{2 \cdot \pi}{3600} rad = \frac{\pi}{1800} rad$$

$$t_{Sample,min} < \frac{1}{8} \frac{\phi_{Impuls}}{\omega_{Motor,max}} = \frac{\pi}{8 \cdot 1800 \cdot 90\pi} s = \frac{1}{1.296.000} s \approx 0,77 \mu s$$

min. Samplezeit XPC - Target = $20 \mu s > t_{Sample,min} \approx 0,77 \mu s$

→ Lösungsansätze zur beseitigung des Engpasses nötig.

Maximale Winkelgeschwindigkeit des Pendels?

Wie bekommt man Richtwerte für das Pendel?

- Mathematische Analyse des Systems, Betrachtung des worst-case Szenario
- Messungen am realen Modell
- Simulation des Aufschwingalgorithmus

Aufzeichnung des Signals vom Sensor-Pendel

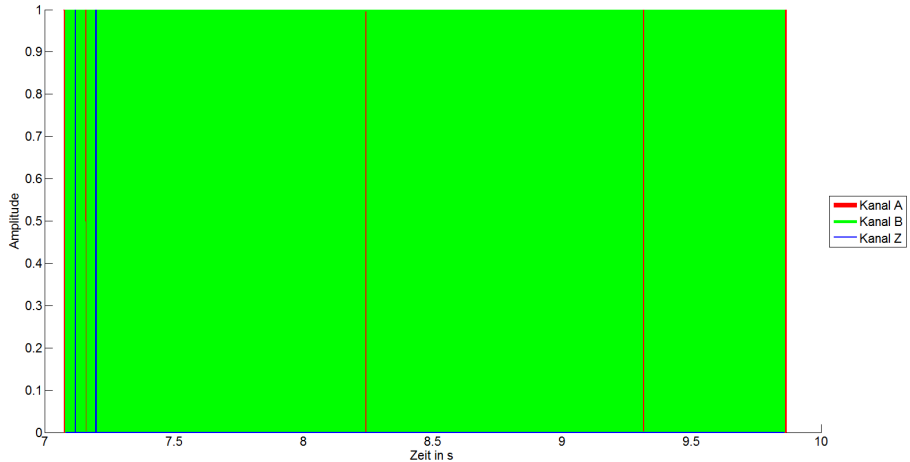


Abb. 10, Impuls Gesamtansicht, Startposition 90° , Samplezeit: $250\mu s$

Aufzeichnung des Signals vom Sensor-Pendel

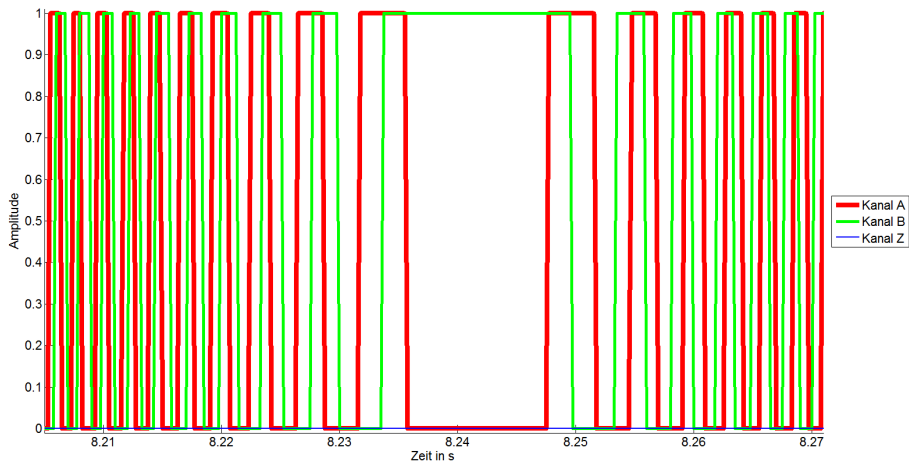


Abb. 11, Impuls Ausschnitt 1, Startposition 90° , Samplezeit: $250\mu s$

Aufzeichnung des Signals vom Sensor-Pendel

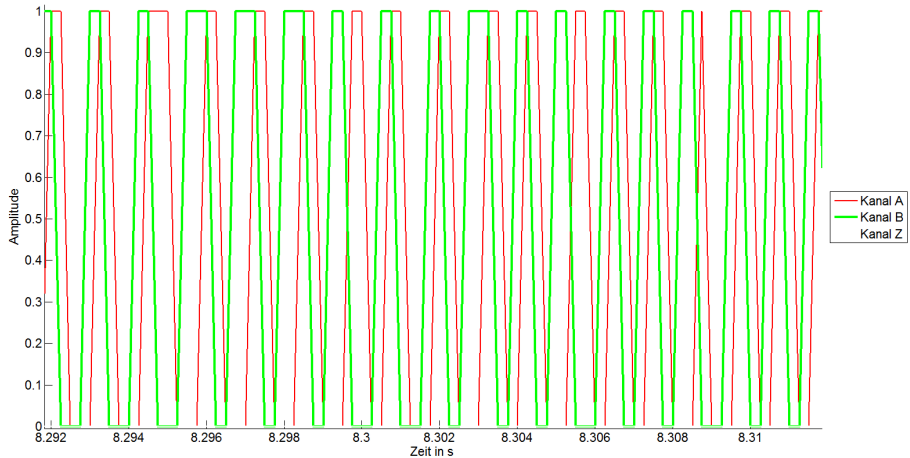


Abb. 12, Impuls Ausschnitt 2, Startposition 90° , Samplezeit: $250\mu s$

Lösungsansätze

- Absolutwertgeber
- Teilung des Impulsgeber minimieren
 - Kauf eines Impulsgebers mit einer geringeren Teilung
 - Leistungselektronik zur Minimierung der Impulse
z.B. 20 Impulse \rightarrow 1 Impuls
- Auslagerung des Algorithmus auf einen externen Mikrocontroller

Lösungsansätze

- Absolutwertgeber
- Teilung des Impulsgeber minimieren
 - Kauf eines Impulsgebers mit einer geringeren Teilung
 - Leistungselektronik zur Minimierung der Impulse
z.B. 20 Impulse \rightarrow 1 Impuls
- Auslagerung des Algorithmus auf einen externen Mikrocontroller
- Kauf eines National Instrument Board
mit internen Counter $\geq 1,5\text{Mhz}$
- Benutzung der vorhandenen dSpace Hardware $\geq 1,5\text{Mhz}$

Lösung

Benutzung der vorhandenen dSpace Hardware mit integriertem Counter



Abb. 13, dSpace PCI-Karte, Quelle: dSpace Board Specification

Algorithmus zur Auswertung der Signalfolge

Einige Änderungen auf Grund des Wechsels:

- Positions-Counter
 - Auflösung 24 bit
 - Max. Inputfrequenz 1,65 Mhz
- $\omega_{max} \approx 350 \frac{rad}{s}$
- Endliche Genauigkeit
 - Verwendete Bitzahl zur Speicherung unbekannt
 - Evtl. Verwendung einer Gleitkommazahl anstatt einer Ganzzkommazahl
 - Begrenzung des Wertebereiches = $f_{(size(mantisse))}$

Floating-Point-Number IEEE 754: $x = signum \ mantisse \cdot 2^{exponent}$

Erste Eindrücke zwischen XPC - Target und dSpace

Beschreibung	XPC - Target	dSpace
Samplezeit	$\geq 20\mu s$	$\geq 50\mu s$
Simulink	yes	yes
Grafische Schnittstelle	Matlab-GUI	dSpace Controll Center
Virtuelle Testumgebung	no	no
Debugging	Log-File	Log-File

Übersicht

- XPC - Target
- Versuchsaufbau
- **Aufschwingen des Pendels**
- Implementierung der Regelung
- Offene Aufgabenstellungen

Algorithmus zum Aufschwingen des Pendels, Inhalte

- Definition der Aufgabenstellung
- Energiefunktion
- Energieregler

Definition der Aufgabenstellung

Ausgangszustand

- Anfangswerte des Pendels beliebig
- Pendel befindet sich an einer beliebigen Position

Definition der Aufgabenstellung

Ausgangszustand

- Anfangswerte des Pendels beliebig
- Pendel befindet sich an einer beliebigen Position

Ziele

- Pendel in die obere Position befördern
- Winkelgeschwindigkeit des Pendels bei Endlage
 $\dot{\phi} \approx 0 \text{ s}^{-1}$
- Meldung, wenn Endzustand erreicht

Skizze des Systems

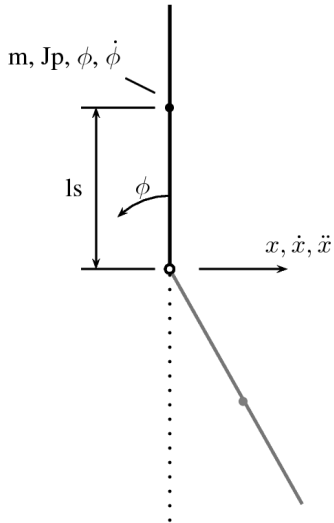


Abb. 14, vereinfachte Skizze des Pendels

Ansatz - Energiefunktion

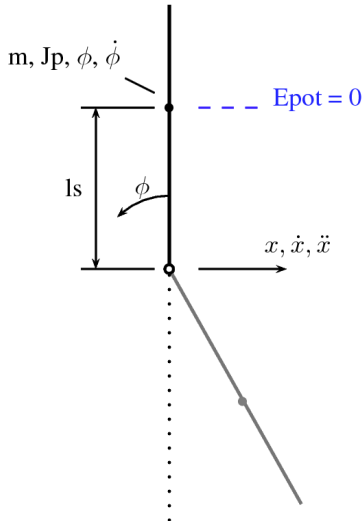
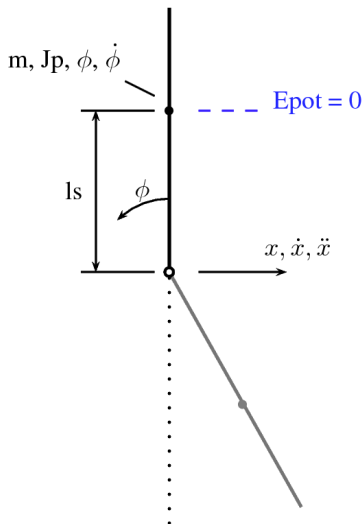


Abb. 15, Aufschwingen Skizze Energiefunktion

Definitionen / Voraussetzungen

- Beschreibung der enthaltenen Energie
- Obere Endlage $\rightarrow E_{pot} = 0$
- Zustandsgrößen des Systems bekannt

Formulierung der Energiefunktion



Energie des Pendels

$$E = \frac{1}{2} J_p \cdot \dot{\phi}^2 + m_p \cdot g \cdot l_s (\cos(\phi) - 1) \quad (\text{Gl. 1.1})$$

Änderung der Energie

$$\begin{aligned} \frac{dE}{dt} &= J_p \cdot \ddot{\phi} \cdot \dot{\phi} - m_p \cdot g \cdot l_s \cdot \dot{\phi} \sin \phi \\ \dot{E} &= J_p \cdot \ddot{\phi} \cdot \dot{\phi} - m_p \cdot g \cdot l_s \cdot \sin \phi \quad (\text{Gl. 1.2}) \end{aligned}$$

Abb. 15, Aufschwingen Skizze Energiefunktion

Grafische Darstellung der Energiefunktion

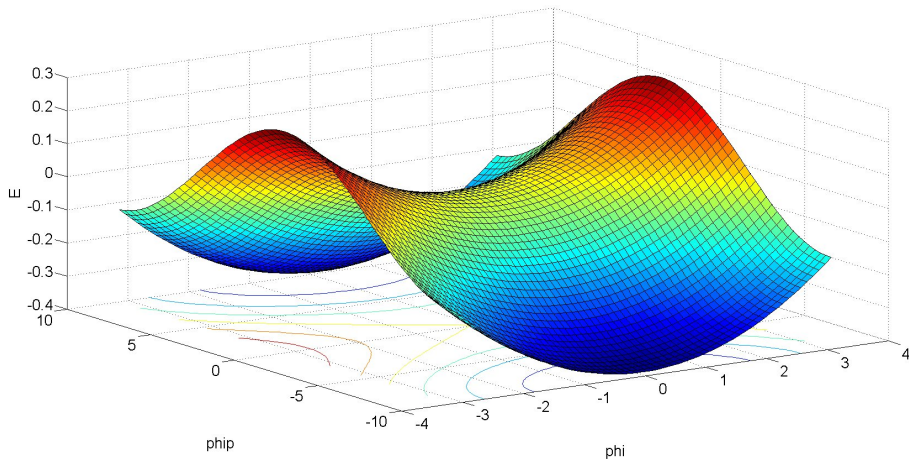


Abb. 16, Energiefunktion

Einschub, Gleichungen vom mathematischen Modell

Zusammenhang zwischen Stellsignal u und Schlittenposition x

$$\ddot{x} + \frac{1}{T_1} \dot{x} = \frac{K}{T_1} u \quad (\text{Gl. 1.3})$$

Beschreibung des Pendels

$$J_p \cdot \ddot{\phi} - m_p \cdot g \cdot l_s \cdot \sin \phi = \ddot{x} \cdot m_p \cdot l_s \cdot \cos \phi \quad (\text{Gl. 1.4})$$

Energiregler

mit Hilfe der Gleichungen

$$\frac{\dot{E}}{\dot{\phi}} = J_p \cdot \ddot{\phi} - m_p \cdot g \cdot l_s \cdot \sin \phi \quad (\text{Gl. 1.2})$$

$$J_p \cdot \ddot{\phi} - m_p \cdot g \cdot l_s \cdot \sin \phi = \ddot{x} \cdot m_p \cdot l_s \cdot \cos \phi \quad (\text{Gl. 1.4})$$

lässt sich ein Stellsignal zur Änderung der Energie des Pendels formulieren

$$\boxed{\frac{\dot{E}}{\dot{\phi}} = \ddot{x} \cdot m_p \cdot l_s \cos \phi} \quad (\text{Gl. 1.5})$$

$$\text{mit: } \dot{E} = \frac{dE}{dt} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{E(t+\Delta t) - E(t)}{\Delta t} \approx \frac{E(t+\Delta t) - E(t)}{\Delta t} = \Delta E \text{ für } \Delta t \ll 1$$

$$\boxed{\frac{\Delta E}{\dot{\phi}} = \ddot{x} \cdot m_p \cdot l_s \cos \phi} \quad (\text{Gl. 1.6})$$

Energiregler

Berechnung der Stellgrösse mit Hilfe Gl. 1.3 und 1.6

$$\ddot{x} + \frac{1}{T_1} \dot{x} = \frac{K}{T_1} u \quad ; \quad \frac{\Delta E}{\dot{\phi}} = \ddot{x} \cdot m_p \cdot l_s \cos \phi$$

$$u = \frac{\Delta E}{\dot{\phi}} \frac{T_1}{K \cdot m_p \cdot l_s \cdot \cos \phi} + \frac{1}{K} \dot{x} \quad (\text{Gl. 1.7})$$

Regeldifferenz

$$\Delta E = E_{Soll} - E \quad (\text{Gl. 1.8})$$

$$E_{Soll} \geq 0$$

Anmerkung

Bedingung für Zielenergie: $E_{Soll} = 0$

- Regler zeigt ein instabiles Verhalten, Ergebnis ist abhängig von Anfangsbedingungen
 - Erreichen der oberen Endlage mit $\dot{\phi} = 0$ bei $\phi = 0$
 - Schwingung des Pendels mit $E = \text{const}$

Anmerkung

Bedingung für Zielenergie: $E_{Soll} = 0$

- Regler zeigt ein instabiles Verhalten, Ergebnis ist abhängig von Anfangsbedingungen
 - Erreichen der oberen Endlage mit $\dot{\phi} = 0$ bei $\phi = 0$
 - Schwingung des Pendels mit $E = const$

→ **Entwurf eines Reglers basierend auf geom. Überlegungen**

Anmerkung

Bedingung für Zielenergie: $E_{Soll} = 0$

- Regler zeigt ein instabiles Verhalten, Ergebnis ist abhängig von Anfangsbedingungen
 - Erreichen der oberen Endlage mit $\dot{\phi} = 0$ bei $\phi = 0$
 - Schwingung des Pendels mit $E = const$

→ **Entwurf eines Reglers basierend auf geom. Überlegungen**

Alternative:

Lyapunov-Funktion mit $V = \frac{1}{2}E^2 \geq 0$

- Bronstein, Kap. 17 Dynamische Systeme und Chaos
- TU Berlin, Aufschwingen eines invertierten Pendels

Energeregler 2

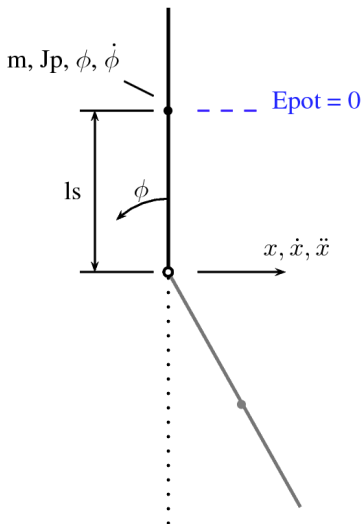


Abb. 15, Aufschwingen Skizze Energiefunktion

Energiezufuhr des Pendels = $f_{(\phi, \dots)}$

Ansatz: P-Regler $x_a(t) = K_P \cdot x_e(t)$

$$u = C \cdot \Delta E \cdot \sin \phi \quad (\text{Gl. 1.9})$$

mit

$$\Delta E = E_{\text{Soll}} - E \quad (\text{Gl. 1.8})$$

$$E_{\text{Soll}} \geq 0$$

Empfehlung

$$E_{\text{Soll}} > 0 \quad \&\& \quad E_{\text{Soll}} < E_{\text{Max}}$$

$$E_{\text{Max}} = \frac{1}{2} J_p \cdot \dot{\phi}_{\text{Max}}^2 \quad (\text{Gl. 1.10})$$

Übersicht

- XPC - Target
- Versuchsaufbau
- Aufschwingen des Pendels
- **Implementierung der Regelung**
- Offene Aufgabenstellungen

Implementierung der Regelung, Inhalte

- Features
- Programmstruktur, inverses Pendel
- Implementierung in Simulink
- Benutzerinterface

Features

Grundlegendes

- An-/Ausschalter
- Begrenzung des Schlittenwegs
- Grafische Benutzerschnittstelle

Aufgabenstellung

- Regelung des invertierten Pendels
- Verfahren des Schlittens im aufgeschwungenen Pendel

Optionales

- Aufschwingalgorithmus
- Regelung des math. Pendels
- Gleichmäßige Pendelbewegung (Energie Pendel = const.)

Programmstruktur, invertes Pendel

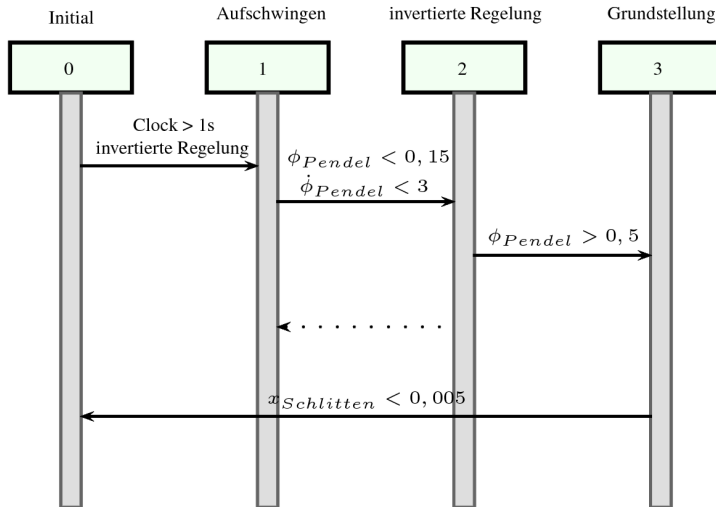
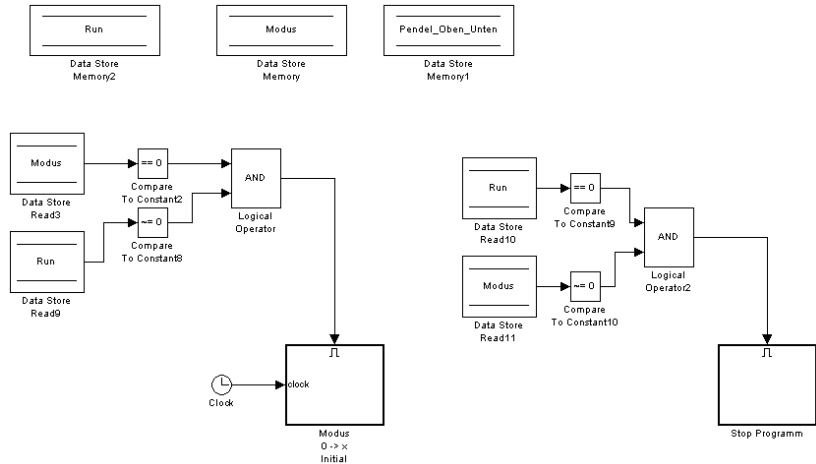
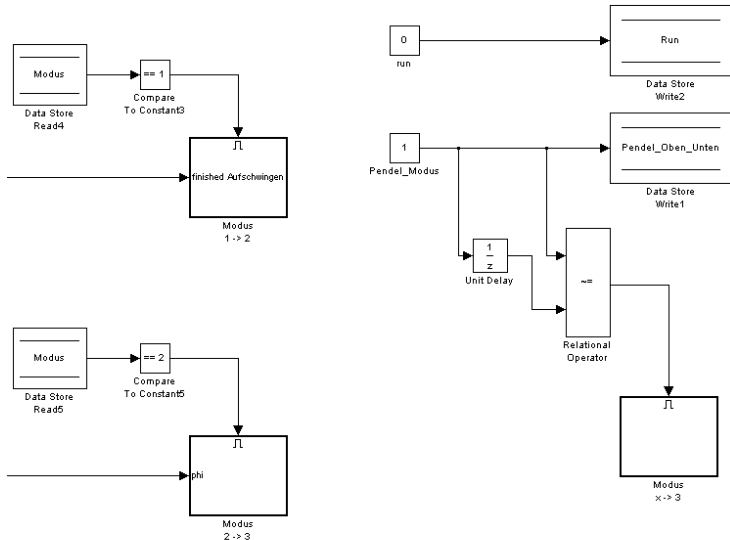


Abb. 17, Signalfluss invert. Pendel

Implementierung in Simulink



Implementierung in Simulink



Benutzerinterface

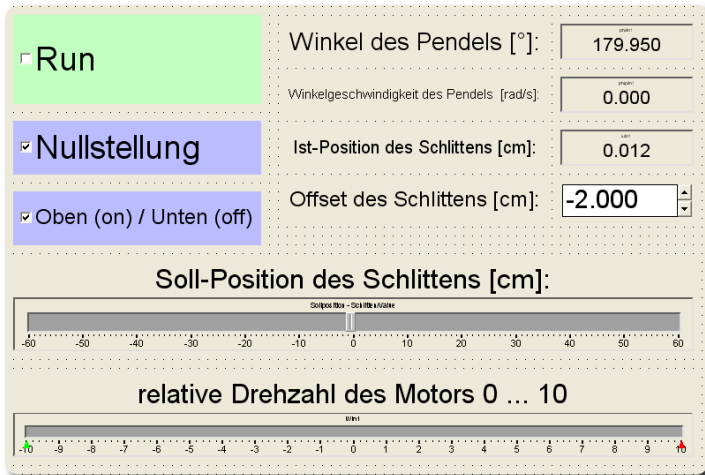


Abb. 18, dSpace GUI

Vorführung des Algorithmus

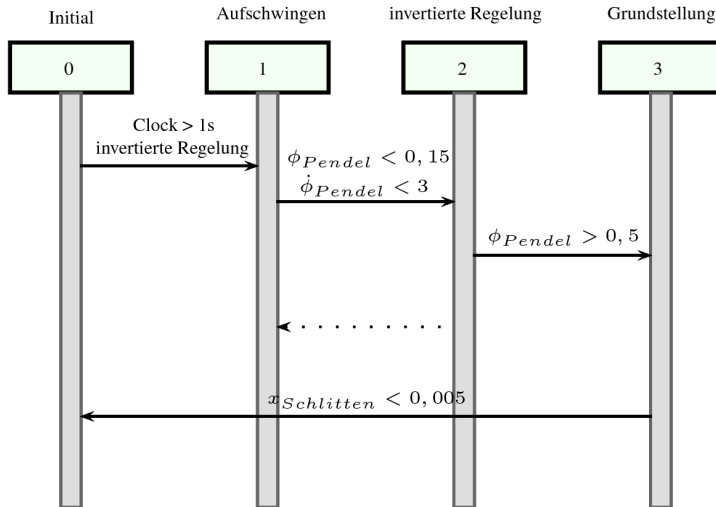


Abb. 17, Signalfluss invert. Pendel

Übersicht

- XPC - Target
- Versuchsaufbau
- Aufschwingen des Pendels
- Implementierung der Regelung
- **Offene Aufgabenstellungen**

Offene Aufgabenstellungen

- Grafische Schnittstelle für die Simulation
- Mathematisches Pendel
- Inverses Pendel, Schlittenbewegung

Grafische Schnittstelle für die Simulation

Aktueller Stand:

- In Arbeit
- Größte Aufgabe: Kopplung der GUI mit Simulink
- Fertigstellung Ende Dezember

Mathematisches Pendel

Aktueller Stand:

- Aufgabe wird nächste Woche begonnen
- Aufgabenstellung ähnlich wie invertes Pendel, System stabil
- Fertigstellung Mitte Dezember

Inverses Pendel, Schlittenbewegung

Fragestellung:

Welche Systemkomponente verursacht die Schlittenbewegung?

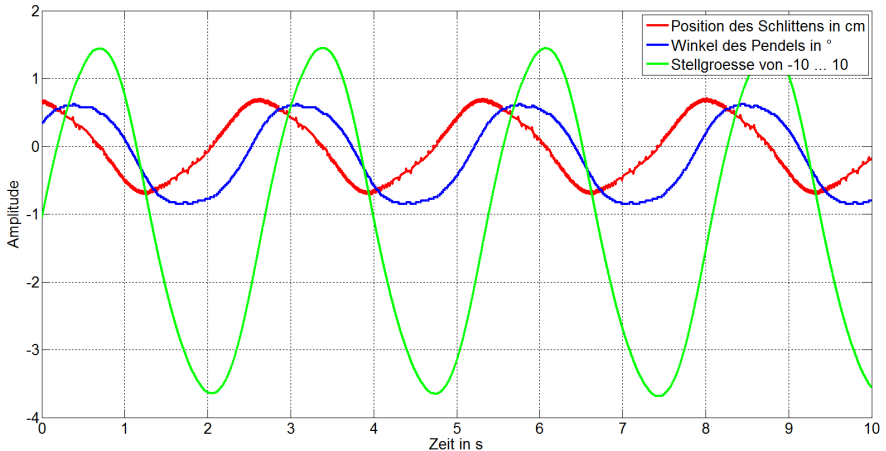


Abb. 19, Signalfluss invert. Pendel

Inverses Pendel, Schlittenbewegung

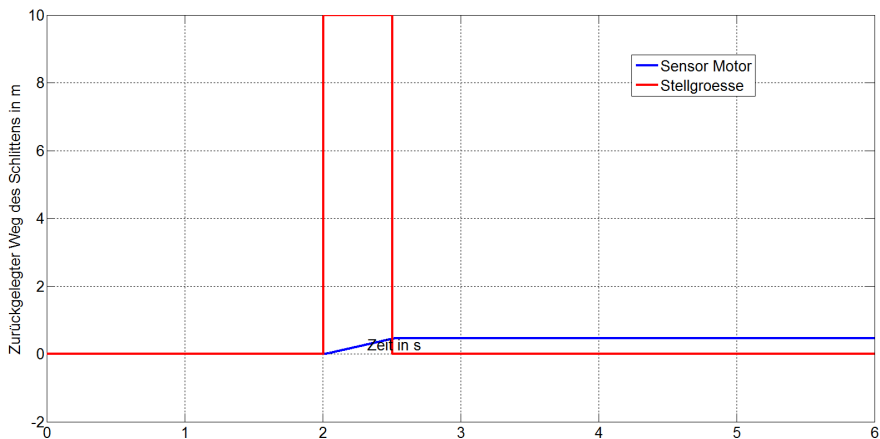


Abb. 20, Ansteuerung des Motors Gesamt; Samplezeit 1ms

Inverses Pendel, Schlittenbewegung

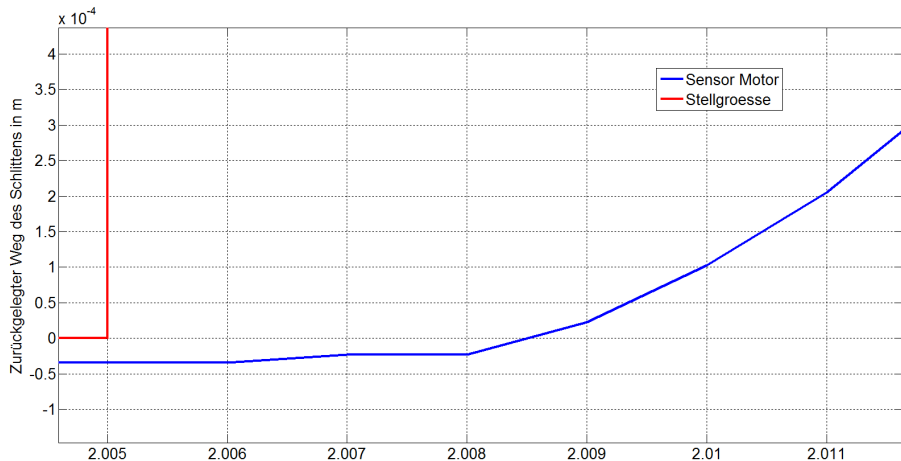


Abb. 21, Ansteuerung des Motors Anlauf; Samplezeit 1ms

Inverses Pendel, Schlittenbewegung

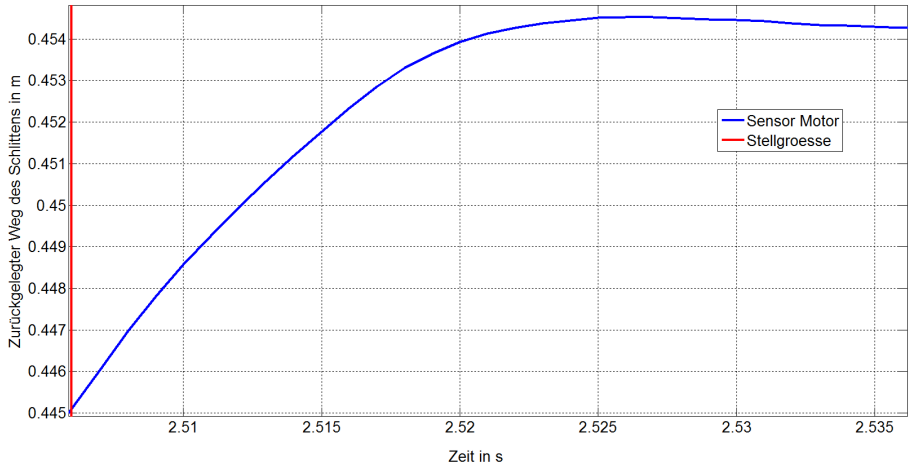


Abb. 22, Ansteuerung des Motors Ausschaltvorgang; Samplezeit 1ms

Inverses Pendel, Schlittenbewegung

Lösungsansätze:

- Verschiebung der Poletellen des Beobachters und der Rückführung auf der realen Achse weiter nach links
- Modellierung des Motors als PT2-System
- Anpassung des Netzgerätes und Servoverstärkers an Aktor
- Austausch des Aktors

Weiterführende Literatur

- LUNZE JAN, Regelungstechnik 2, 6. neu bearbeitete Auflage 2010
- HS Regensburg, Fakultät Maschinenbau, Prof. Dr. R. Schneider, Mess- und Regelungstechnik (Teil RT), Vorlesungsskript
- HS Regensburg, Fakultät Maschinenbau, Prof. Dr. Georg Rill, Technische Mechanik III, Vorlesungsskript
- Technische Universität Berlin, Fakultät IV Elektrotechnik und Informatik, Aufschwingen eines invertierten Pendels: Energiebasierter Reglerentwurf, Versuch Nr. 2, Version 1.0
- Matlab R2011b Dokumentation

Danke für die Aufmerksamkeit