

«««< HEAD =====  
»»»> Christian

# **Praktikumsarbeit zum Praktikum Regelungstechnik**

Christian Küllmer, Jonas Kallweidt, Leon Blum

August 15, 2019, Kassel

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Rechnerteil Aufgaben aus Kapitel 9.3 des Praktikumsskripts</b>	<b>6</b>
1.1	Aufgabe 9.3a Simulink-Modell erstellen . . . . .	6
1.2	Wichtiger Hinweis: . . . . .	6
1.3	Aufgabe 9.3.b Simulation ohne Eingangssignal mit Startwert . . . . .	7
1.4	Aufgabe c) . . . . .	8
1.5	Aufgabe 9.3.c Simulation mit Eingangssignal ohne Startwert . . . . .	8
1.6	Aufgabe 9.3.d Simulation mit Eingangssignal mit Startwert . . . . .	8
1.7	Aufgabe 9.3.e Überprüfung der These zur Positionsbeibehaltung . . . . .	9
1.8	Aufgabe 9.3.f Linearisierung des Modells . . . . .	10
1.9	Aufgabe 9.3.g Reglerentwurf zur Stabilisierung . . . . .	10
1.10	Aufgabe 9.3.h . . . . .	12
<b>2</b>	<b>Versuch Antrieb</b>	<b>12</b>
2.1	Aufgabe 5 Drehzalregelung) . . . . .	12
2.2	Drehzahlregelung . . . . .	12
2.2.1	Aufgabe 5.a . . . . .	12
2.2.2	Aufgabe 5.b . . . . .	12
2.2.3	Aufgabe 5.c . . . . .	13
2.2.4	Aufgabe 5.d . . . . .	13
2.2.5	Aufgabe5.b . . . . .	13
2.2.6	Aufgabe 5.d) . . . . .	13
2.2.7	Aufgabe 5.e . . . . .	14
2.2.8	Aufgabe 5.f . . . . .	14
2.2.9	Aufgabe 5.g . . . . .	14
2.3	Aufgabe 6 Kaskadierte Positionsregelung . . . . .	14
2.3.1	Aufgabe 6.a . . . . .	14
2.3.2	Aufgabe 6.b . . . . .	15
2.3.3	Aufgabe 6.c . . . . .	15
2.3.4	Aufgabe 6.d . . . . .	15
2.3.5	Aufgabe 6.e . . . . .	15
2.3.6	Aufgabe 6.f . . . . .	16
2.3.7	Aufgabe 6.g . . . . .	16
<b>3</b>	<b>Versuch Schwebekörper</b>	<b>17</b>
3.1	Einstieg in den Praktikumsversuch . . . . .	17
3.2	Mathematisches Modell erstellen . . . . .	17
3.3	Regelungsziele definieren . . . . .	18
3.4	Entwurf eines einfachen Reglers . . . . .	18
3.5	Test des einfachen Reglers am System . . . . .	19
3.6	Aufgabe 7 . . . . .	19
3.7	Aufgabe 8 . . . . .	19
3.8	Aufgabe 9 . . . . .	19
3.9	Aufgabe10 . . . . .	20

3.10	Verbesserte Positionsregelung . . . . .	21
3.10.1	Berechnen der Kaskadenregelung und der Führungsübertragungsfunktion . . . . .	21
3.10.2	Bestimmen der Verstärkung des P-Reglers . . . . .	21
3.10.3	Simulieren des Regler und Überprüfung auf die Vorgaben . . . . .	22
3.10.4	Implementation und versuch an der Maschine im Praktikum . . . . .	22
<b>4</b>	<b>Versuch Kran</b>	<b>24</b>
4.1	Vorbereitungsaufgaben . . . . .	24
4.2	Regelung der Wagenposition $y_w$ . . . . .	24
4.2.1	Arbeitsposition einnehmen . . . . .	24
4.2.2	Messung der Haftreibung . . . . .	24
4.2.3	Einfacher Proportionalregler . . . . .	24
4.2.4	Maximale Auslenkung innerhalb der Sättigung . . . . .	25
4.2.5	Implementierung des Reglers mit verschiedenen Parametern . . . . .	25
4.3	Aufgabe 4.4 Zusätzliche Regelung des Winkels $\alpha$ . . . . .	26
4.3.1	Aufgabe 4.4.a,b Darstellung der Reglerstruktur . . . . .	26
4.3.2	Aufgabe 4.4.c . . . . .	26
4.3.3	Aufgabe 4.4.d . . . . .	27
4.3.4	Aufgabe 4.4.e . . . . .	27
4.3.5	Aufgabe 4.4.f . . . . .	28
4.3.6	Aufgabe 4.4.g,h . . . . .	28
4.4	Digitale PD-Regelung von $y_w$ und $\alpha$ . . . . .	28
4.4.1	Einfluss der Abtastzeit . . . . .	28
4.4.2	Warum macht eine Erweiterung um einen PD-Regler Sinn? . . . . .	30
4.4.3	Test des PD-Regler im Realen System . . . . .	31
4.4.4	Filterung über ein PT-1 Glied . . . . .	31
4.5	Regelung mit zusätzlicher Stellgrößenbeschränkung . . . . .	32
4.5.1	Kann Stellgrößenbeschränkung für eine Regelverbesserung sorgen? . . . . .	32
4.6	Testen dieser theoretische Stellgrößenbeschränkung im realen Versuchsaufbau . . . . .	32
4.7	Regelung der x- und y- Achse . . . . .	33

## List of Figures

1	In Simulink gebautes Modell des Systems des Roboterarms . . . . .	6
2	Darstellung des Winkels für eine anfängliche Auslenkung von 40 Grad. . . . .	7
3	Darstellung des Winkels für eine anfängliche Auslenkung von 40 Grad. . . . .	8
4	Darstellung des Winkels für eine anfängliche Auslenkung von 40 Grad. . . . .	9
5	Darstellung des Winkelgraphen bei einem gegebenen Drehmoment . . . . .	10
6	Wurzelortskurve des Systems $G_s$ . . . . .	11
7	Anzeige des Ausgangswertes . . . . .	11
8	Wurzelortskurve des Systems $G_s$ mit der Anpassung zweier Nullstellen . . . . .	12
9	Simulink PT1 . . . . .	13
10	Simulation $\theta_{ist}$ und Experiment $\theta_{ist}$ . . . . .	16
11	Anzeige des Ausgangswertes . . . . .	18
12	PI Regelung . . . . .	20
13	PID Regelung . . . . .	20
14	Simulation der berechneten Regelgrößen und der Berechneten K-Werte bei der Führungsgröße $90^\circ$ . . . . .	22
15	Realer Messwert des Systems bei einer geregelten Drehung um $90^\circ$ . . . . .	23
16	Simulink Modell mit aufgetrennter Rückkopplung . . . . .	26
17	Gegenüberstellung Simulation und Experiment . . . . .	28
18	Verlauf des Experimentes mit einer Abtastzeit von 200ms . . . . .	29
19	Verlauf des Experimentes mit einer Abtastzeit von 1ms . . . . .	30
20	Aufbau der PD-Regelung im realen System . . . . .	30
21	Aufbau der PD-Regelung im realen System . . . . .	31
22	Aufbau der PD-Regelung im realen System ergänzt mit einer PT1- Strecke zur Filterung der Kleinstabweichungen . . . . .	32
23	Regelungsdarstellung mit der Stellgrößenbeschränkung und einem PD- Regler . . . . .	33

« « « < HEAD =====

» » » > master

## 1 Rechnerteil Aufgaben aus Kapitel 9.3 des Praktikumsskripts

In diesem Praktikumsteil geht es darum, einen Roboterarm am Computer mit Hilfe von Matlab zu simulieren und zu analysieren.

### 1.1 Aufgabe 9.3a Simulink-Modell erstellen

Es sind diverse Konstanten und ein Blockschaltbild des Roboterarms gegeben, aus denen es zunächst ein Simulink-Modell zu erstellen gilt. Dabei ist zu beachten, dass das Modell initialisierbar sein soll und deshalb der Motor als eigener geschlossener Regelkreis implementiert werden muss. Aus diesen Vorgaben resultiert das folgende Simulink-Modell:

Teil/SimulinkModell.jpeg

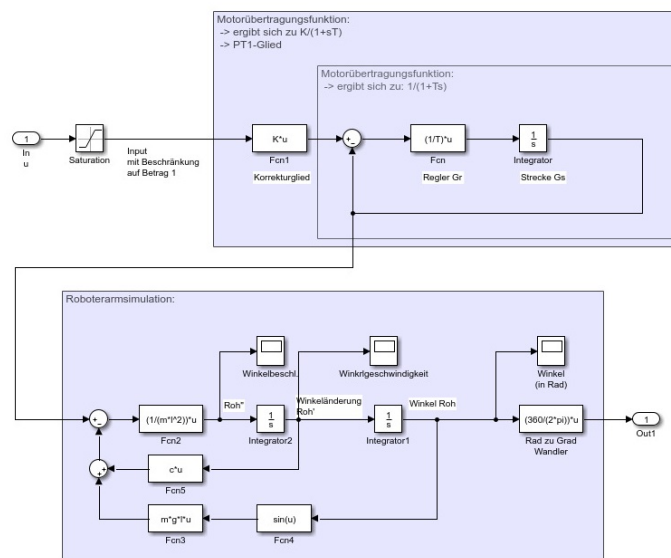


Figure 1: In Simulink gebautes Modell des Systems des Roboterarms

### 1.2 Wichtiger Hinweis:

Für alle in diesem Bereich folgenden Auswertungen gibt folgende Farbkonvention

- Die rote Kurve entspricht dem Winkel  $\varphi$

- Die blaue Kurve entspricht dann der Winkelgeschwindigkeit  $\dot{\varphi}$
- Die grüne Kurve entspricht der Winkelbeschleunigung  $\ddot{\varphi}$

### 1.3 Aufgabe 9.3.b Simulation ohne Eingangssignal mit Startwert

Das System wird gemäß den Vorgaben simuliert und die Zustandsgrößen werden über einen Zeitverlauf dargestellt. Dabei entstehen das folgende Diagramm:

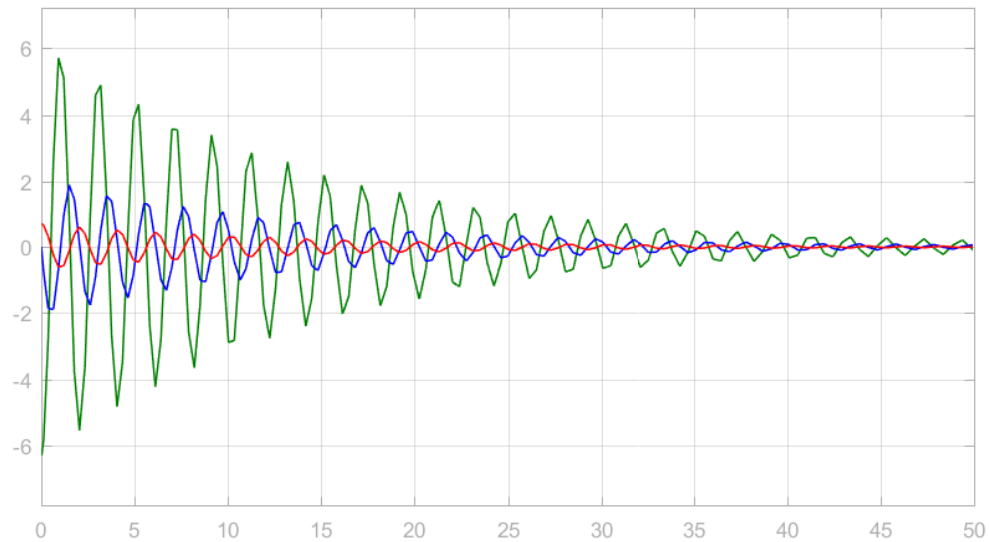


Figure 2: Darstellung des Winkels für eine anfängliche Auslenkung von 40 Grad.

Aus dem obenstehenden Diagramm geht hervor, dass das System ein stabiles System darstellt, solange keine Stellgröße eingeprägt wird. Für gewöhnlich kann das System eine Ruhelage bei  $0^\circ$  annehmen, wenn vorher keine Auslenkung vorgenommen wurde. Hier geht die Auslenkung auf keinen stationären Endwert, da die Exponentialfunktion zur Beschreibung der Dämpfung niemals null wird. In einem Realen System wird hier aber wahrscheinlich ein Stillstand nach beliebig langer Wartezeit eintreten, wenn der Roboterarm die Haftreibung nicht mehr Überwinden kann und die Bewegung im Aperiodischen Grenzfall endet.

## 1.4 Aufgabe c)

### 1.5 Aufgabe 9.3.c Simulation mit Eingangssignal ohne Startwert

Es soll eine Simulation mit den folgenden Vorgaben durchgeführt werden: »»»> Jonas

$$\varphi(0) = 0 \quad (1)$$

$$\dot{\varphi}(0) = 0 \quad (2)$$

$$u(t) = \begin{pmatrix} 0 & \text{für } t < 1 \\ 0.17 & \text{für } t \geq 1 \end{pmatrix} \quad (3)$$

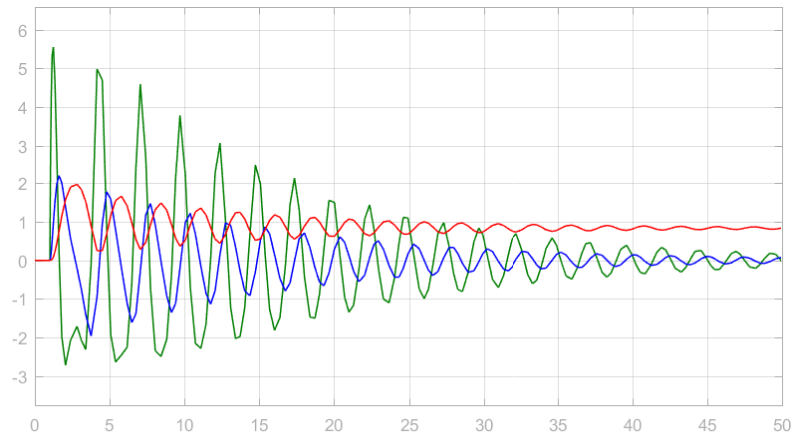


Figure 3: Darstellung des Winkels für eine anfängliche Auslenkung von 40 Grad.

Das System befindet sich zunächst in Ruhelage zum Zeitpunkt  $t = 1$  wird ein Drehmoment vom Motor aufgebaut, das den Roboterarm nach Durchlaufen eines Einschwingvorgangs um die neue Ruhelage in eben diese auslenkt. Diese neue Ruhelage hängt von dem Eingangsdrehmoment ab. Der Einschwingvorgang weist dabei ein ähnliches Verhalten wie der Einschwingvorgang von Aufgabe 9.3b auf.

### 1.6 Aufgabe 9.3.d Simulation mit Eingangssignal mit Startwert

gegeben sei:

$$\varphi(0) = 0 \quad (4)$$

$$\dot{\varphi}(0) = 0 \quad (5)$$

$$u(t) = \begin{pmatrix} 0 & \text{für } t < 1 \\ 0.18 & \text{für } t \geq 1 \end{pmatrix} \quad (6)$$



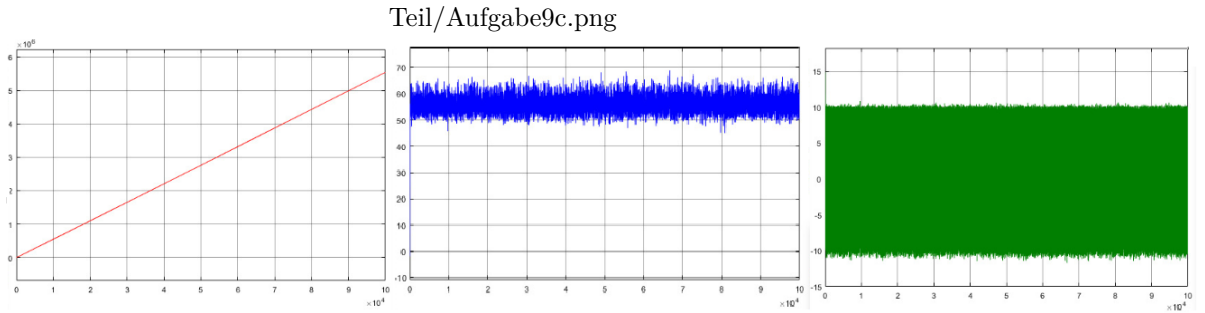


Figure 4: Darstellung des Winkels für eine anfängliche Auslenkung von 40 Grad.

Anders als im Versuch 9.3.c befindet sich der Roboterarm nun zum Zeitpunkt  $t = 0$  nicht mehr in der Ruhelage bei einem Winkel von  $0^\circ$ , sondern in einem Winkel von  $40^\circ$ . Dies hat zur Folge, dass der Arm zunächst in der Zeit bis  $t = 1$  sowie in der darauffolgenden Sättigungszeit des PT1-Gliedes das den Motor beschreibt, zurückschwingen kann. Sobald das Drehmoment des Motors aufgebaut ist legt der Roboterarm an Geschwindigkeit zu und überschreitet dabei sogar die kritische  $180^\circ$  Marke, ab der der Arm nicht mehr zurückschwingt, sondern einen Überschlag vollführt und weiter an Geschwindigkeit gewinnt. Da es sich bei dem betrachteten Roboterarm um ein gedämpftes Modell handelt, geht die Geschwindigkeit in eine Sättigung über, bis diese um einen konstanten Wert fluktuiert.

### 1.7 Aufgabe 9.3.e Überprüfung der These zur Positionsbeibehaltung

Um zu überprüfen, ob der Motor bei einem Arm bei einem Eingangssignal von einer Ruhelage bei  $40^\circ$  zur Einstellung bringt. Wird dies in Matlab mit folgendem Eingangssignal geprüft:

$$u_0 = \frac{m * g * l * \sin(\varphi(0))}{300} = 0,1471 \quad (7)$$

Dies entspricht einem Drehmoment von  $44,1402 \text{ Nm}$ . Dieses Drehmoment wird im Modell als konstante Eingangsgröße eingegeben. Der resultierende Winkel wird dann in Grad angegeben und sollte entsprechend der Erwartung einen Winkel von  $40^\circ$  entsprechen.

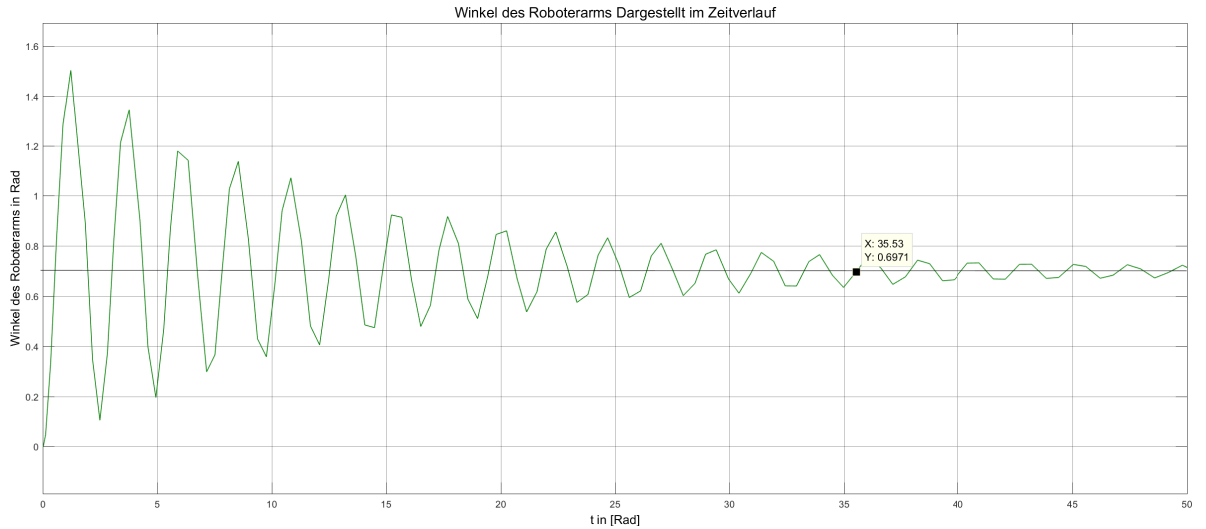


Figure 5: Darstellung des Winkelgraphen bei einem gegebenen Drehmoment

An dem Diagramm ist explizit zu sehen, dass es sich bei der Auslenkung durch das Drehmoment  $u_0$  einstellt. Diese Auslenkung entspricht im Mittel einem Wert von 0,6971 Rad. Daraus ergibt sich eine neue Auslenkung von  $40^\circ$ . Damit wird die Angabe aus dem Aufgabenscript bestätigt.

### 1.8 Aufgabe 9.3.f Linearisierung des Modells

Bei der Linearisierung durch Softwarenutzung von Matlab ergibt sich folgendes Ergebnis für Winkel im Bogenmaß:

$$G_s = \frac{428.6}{(s^3 + 10.14 * s^2 + 8.944 * s + 75.15)} \quad (8)$$

Die Abweichung zur Musterlösung in der dritten Nachkommastelle des Zählers lässt sich dabei durch einen veränderten Rundungsalgorithmus im Programm begründen. Die Ergebnisse stimmen also überein wodurch  $G_s$  von nun an unsere Funktion der Strecke beschreibt.

### 1.9 Aufgabe 9.3.g Reglerentwurf zur Stabilisierung

Um einen Regler zu finden, der die Stabilitätskriterien einhält stellen wir zunächst die originale Wurzelortskurve dar.

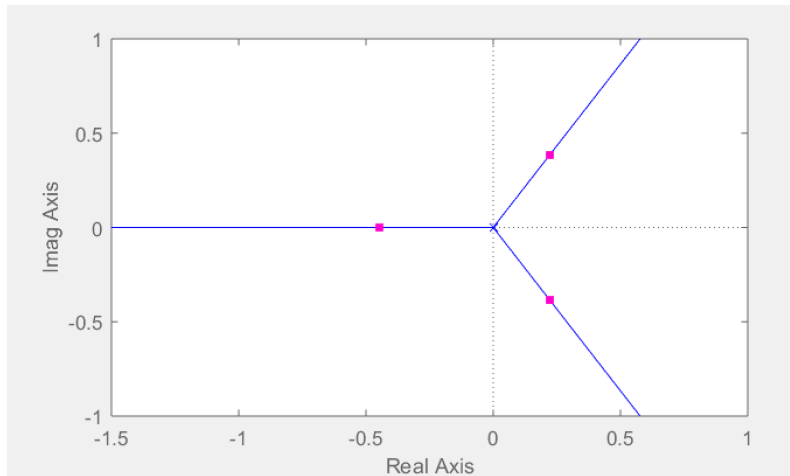


Figure 6: Wurzelortskurve des Systems  $G_s$

In der Wurzelortskurve kann man direkt sehen, dass zwei Nullstellen in Richtung der zwei Nullstellen im positiven Bereich einen guten Regler darstellen würden. Diese müssen dabei nicht die die Polstellen kompensieren, sondern lediglich im Imaginären Anteil des Wurzel Ortskurve liegen um dort den die Zerphilien Anteile der Wurzelortskurve anzuziehen. Es entsteht folgende Ausgabe:

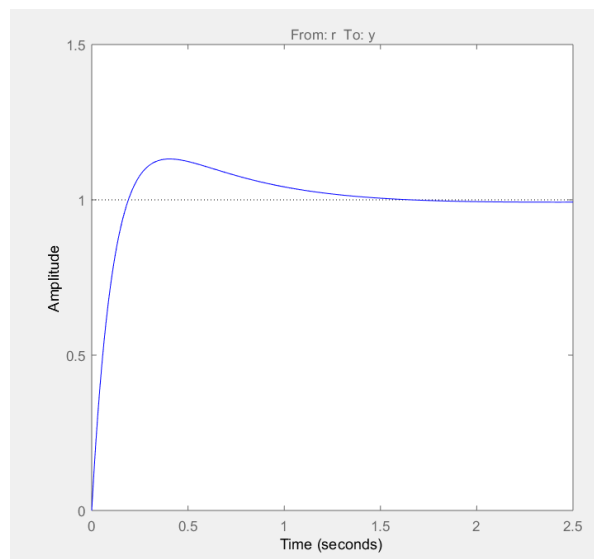


Figure 7: Anzeige des Ausgangswertes

Die sich damit realisierende Ausgabe wurde von dieser Wurzelortskurve erzeugt.

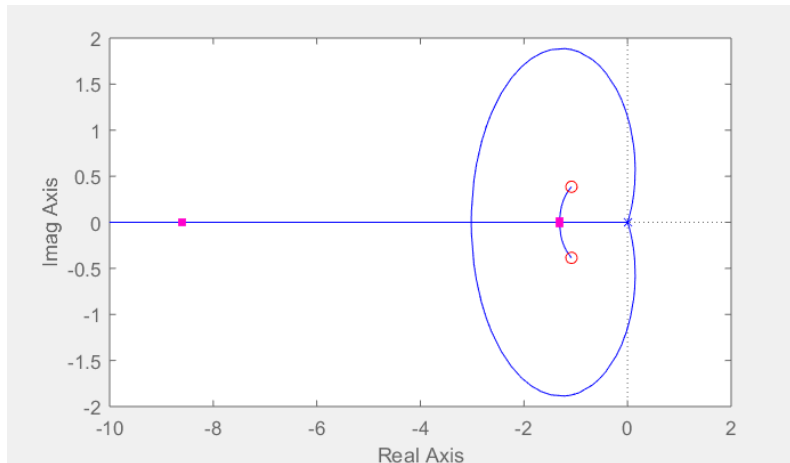


Figure 8: Wurzelortskurve des Systems  $G_s$  mit der Anpassung zweier Nullstellen

«««< HEAD Man sieht deutlich, dass es hier eine Stabilisierung der Funktion ergibt. Es ist natürlich keine unbegrenzte Stabilität von dem System zu erwarten. Der K-Wert sollte dabei so gewählt werden, dass die realen Pole alle im Linken teil der Kurve liegen sollten. Das wiederum hat dann die Folge, dass sich der K-Wert in einem gewissen Rahmen einstellen lassen können muss. =====

### 1.10 Aufgabe 9.3.h

»»»> Jonas

«««< HEAD

=====

## 2 Versuch Antrieb

### 2.1 Aufgabe 5 Drehzahlregelung)

### 2.2 Drehzahlregelung

#### 2.2.1 Aufgabe 5.a

Die Sprungantwort des Systems soll ohne Filter ermittelt werden. Dabei zeigt sich, dass die Sprungantwort stark um den Wert von 1400 fluktuiert, die Abweichung beträgt dabei  $\pm 150$ .

#### 2.2.2 Aufgabe 5.b

Wird die Sprungantwort mit eingeschaltetem Filter aufgenommen, so fallen signifikante Unterschiede auf. Das ansteigen der Sprungantwort verläuft nur unwesentlich langsam-

mer dafür ergibt sich ein im Verhältnis zur Anfangsmessung geglättetes Signal, die Restwelligkeit beträgt nur noch  $\pm 10$ . Daraus kann die Übertragungsfunktion durch ein PT1 Glied angenähert werden. Es gilt dabei jedoch zu beachten, dass die Übertragungsfunktion lediglich als Näherung angesehen werden kann, da die wirkliche Sprungantwort um ca 50 überschwingt. Die bestimmte Näherung lautet:

$$G(s)_{PT1} = \frac{1275}{1 + 9,17s} \quad (9)$$

### 2.2.3 Aufgabe 5.c

Auf Basis der angenäherten Übertragungsfunktion kann nun ein Simulink Modell erstellt werden, in Figure 9 dargestellt. Durch dies kann ein Regler ausgelegt werden um ihn im realen Versuchsaufbau einzusetzen.

### 2.2.4 Aufgabe 5.d

Die Vorgabe für den Regler soll eine  $t_{5\%}$  Zeit von 0,3 Sekunden sein. Mithilfe einer Faustformel kann nun der Realteil des Poles bestimmt werden. Es ergibt sich dafür ein Realteil von -10 für den Pol des Geschlossenen Regelkreises des P Reglers. Der Geschlossene Regelkreis weist folgende Form auf:

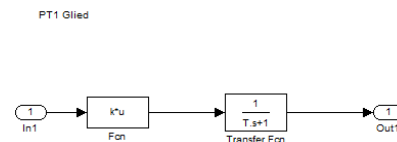


Figure 9: Simulink PT1

$$G(s)_{PT1} = \frac{1275}{1 + 9,17s} \quad (10)$$

### 2.2.5 Aufgabe 5.b

Auf Basis der angenäherten Übertragungsfunktion kann nun ein Simulink Modell erstellt werden. Auf dies kann ein Regler ausgelegt werden und am realen Versuchsaufbau getestet werden.

### 2.2.6 Aufgabe 5.d)

Die Vorgabe für den Regler soll eine  $t_{5\%}$  Zeit von 0,3 Sekunden sein. Mithilfe einer Faustformel kann nun der Realteil des Poles bestimmt werden. Es ergibt sich dafür ein Realteil von -10 für den Pol des Geschlossenen Regelkreises des P Reglers. Der Geschlossene Regelkreis weist folgende Form auf:

$$G(s)_{(geschl.)} = \frac{1275K_p}{1275K_p + 1 + 9,17s} \quad (11)$$

Daraus werden die Pole in Abhängigkeit des Faktors  $K_p$  bestimmt. Es folgt ein  $K_p$  Wert von 0,0711

### 2.2.7 Aufgabe 5.e

Der P-Regler wird nun am Simulink Modell getestet. Der Sollwert beträgt  $1600^\circ/\text{s}$ , als Stationärer Endwert wird 1 angestrebt. Um diesen Zu erreichen wird eine Vorsteuerung mit dem Verstärkungsfaktor  $K_{\text{vor}} = \frac{1600}{1581,5}$  implementiert. die benötigte Stellgröße liegt über 5 Volt aber im realistischen Bereich, dennoch liegt diese über 0,3 Sekunden lang an, sodass hier Handlungsbedarf besteht falls das Reale System einen Error Code ausgibt.

### 2.2.8 Aufgabe 5.f

Der P-Regler wird mit Vorsteuerung an der realen Maschine getestet. Der Filter ist dabei einzuschalten. Es fällt auf das die Maschine trotz eines überschreitens der kritischen Überspannungszeit, welche in der Simulation auftritt, korrekt arbeitet. Hier sind die Modellabweichungen so groß, dass wir die kritische Spannung weniger als 0,3 Sekunden lang halten. Es lässt sich durch die nur näherungsweise zutreffende Streckenübertragungsfunktion in Form eines PT1 Gliedes erklären. Das System ist nur für den einen Sollwert von 1600 Grad/s stationär genau. Umso mehr die Sollwertgröße von 1600 Grad/sec abweicht desto Größer wird die Abweichung des Stationären Endwertes. Dies fällt erst bei weniger als 800 Grad/s deutlich auf und ist bei 400 Grad/s gut zu erkennen.

### 2.2.9 Aufgabe 5.g

Um Stationäre Genauigkeit für alle Sollwerte zu erreichen wird dem Regler ein I-Anteil hinzugefügt. Der PI-Regler wird über das SISO Tool ausgelegt. Aus den Anforderungen  $t_{5\%} = 0,4\text{s}$  und keinem Überschwingen, woraus sich ergibt das die Pole rein reell sein müssen, ergibt sich für den schnellst möglichen Regler die Übertragungsfunktion:

$$G(s)_{PI} = 0,00745 * \frac{1 - 7,1s}{s} \quad (12)$$

ferner ist keine Vorsteuerung erforderlich, da der PI-Regler ohnehin eine stationäre Genauigkeit aufweist.

## 2.3 Aufgabe 6 Kaskadierte Positionsregelung

### 2.3.1 Aufgabe 6.a

Statt dem PI-Regler soll nun eine Regelstruktur bestehend aus einem kaskadiertem P-Regler verwendet werden. Die Übertragungsfunktion des geschlossenen Regelkreises

lautet:

$$\begin{aligned} G(s)_{ua\dot{\theta}} &= G(s)_{PT1} * G(s)_p \\ G(s)_{ua\dot{\theta}} &= \frac{90,6525}{91,6252 + 9,17s} \end{aligned} \quad (13)$$

### 2.3.2 Aufgabe 6.b

Erweitert man diese Gleichung um die Eigenschaften der Positionsregelung so ergibt sich die folgende Übertragungsfunktion:

$$G(s)_{ua\theta} = G(s)_{ua\dot{\theta}} * \frac{1}{s} = \frac{90,653}{91,653s + 9,17s^2} \quad (14)$$

### 2.3.3 Aufgabe 6.c

Mithilfe des SISO Tools kann ein P-Regler ausgelegt werden der die  $t_{5\%}$  Zeit minimiert ohne dabei überzuschwingen. Als Verstärkungsfaktor des P-Reglers wurde 2,5262 ermittelt.

### 2.3.4 Aufgabe 6.d

Die bestimmte Kaskadenregelung wird in Simulink getestet. Als Sollwert wird dabei 90 Grad angenommen. Die dabei benötigte Stellgröße liegt in einem realistischen Bereich und ist der Simulation nach zu Urteilen keine Gefahr für das reale System, da sie nicht länger als 0,3 Sekunden über einem Wert von 5 Volt liegt.

### 2.3.5 Aufgabe 6.e

Der zuvor in Simulink überprüfte Kaskaden-Regler wird in das Reale System eingebaut und als Sollwert werden 90 Grad angelegt. Der Regler im echtem System bietet im Gegensatz zur Simulation keine Stationäre Genauigkeit. Dies liegt daran, dass das Modell keine Reibung berücksichtigt. Die Unterschiede zwischen Simulation und Experiment sind in Figure 10 dargestellt. Es fällt auf das das Experiment durch die nicht ideale Simulation, PT1 Näherung und es wurde keine Reibung berücksichtigt. Weiterhin steigt der Graf des Realem Systems im Bereich bis ca 60 Grad schneller an, als der Graf der Simulation. Dies kann mithilfe des in Abschnitt 5b beobachteten Überschwingens, welches auf Imaginäre Pole in der Realen Übertragungsfunktion hindeutet, erklärt werden. Diese verursachen oft ein schnelleres Ansteigen als es bei Übertragungsfunktionen mit rein Reellen Polen der Fall wäre.

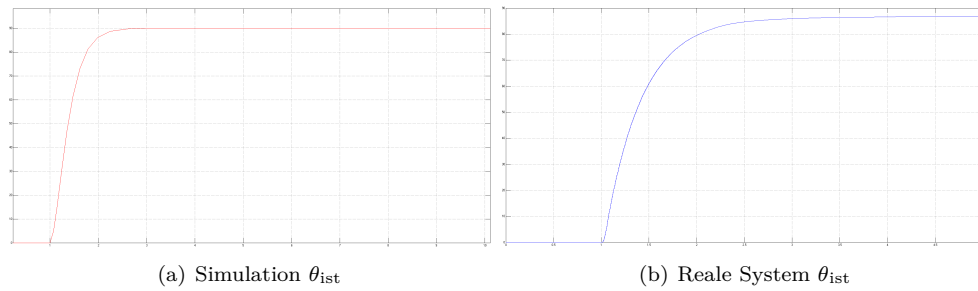


Figure 10: Simulation  $\theta_{ist}$  und Experiment  $\theta_{ist}$

### 2.3.6 Aufgabe 6.f

Als Sollwert werden 10000 Grad angelegt. Allerdings ist dies ohne weiteres nicht möglich da das reale System einen Error Code ausgibt. Dies liegt an mehreren Problemen. «««< HEAD

### 2.3.7 Aufgabe 6.g

Zuerst muss das Problem der Überspannung gelöst werden. Dies kann dadurch geschehen, dass ein Sättigungsblock in den Regelkreis eingebaut wird, sodass der Motor mit Maximal 5 Volt versorgt wird. Als nächstes muss die zu große Winkelgeschwindigkeit verringert werden. Dazu wird wieder ein Sättigungsblock eingebaut, welcher die Winkelgeschwindigkeit auf Maximal 2000 Grad/sec wachsen lässt. Sind diese Probleme behoben kann der Motor in diesem Versuch einwandfrei benutzt werden.



## 3 Versuch Schwebekörper

### 3.1 Einstieg in den Praktikumsversuch

Zu Beginn dieses Praktikumsversuchs gilt es, sich Mittels Joystick mit der Anlage vertraut zu machen. Dabei fällt schnell auf, dass die Voreinstellungen der Scope-Blöcke noch nicht sinnvoll gewählt worden sind. Um die graphische Ausgabe physikalisch sinnvoll darzustellen, müssen die Skalierung der Eingangsgröße sowie eine y-Achsenverschiebung wie folgt vorgenommen werden:

1. Die Stellgröße des Systems muss auf Grund des im Experiment verbauten Leistungsteil für den Lüfter mit dem Faktor 1,2 skaliert werden.
2. Die Regelgröße muss zunächst negiert werden, um einen positiven Ausschlag zu erzeugen. Anschließend wird der Offset eliminiert und der Maximale Ausschlag des Systems richtig skaliert, sodass sich eine Anpassung von

$$G_{(s)} = \frac{-TatsächlicheMaximaleHöhe * (Eingang - Offset)}{VorläufigeMaximaleHöhe} \quad (15)$$

$$= -18,34 * (u - 6) \quad (16)$$

ergibt.

### 3.2 Mathematisches Modell erstellen

Ein mathematisches Modell lässt sich dank des zur Verfügung stehenden Matlab-Skripts *grafident.m* durch Ausführen des Skriptes leicht erstellen. Das Skript gibt einen grafischen Verlauf der Sprungantwort und die wichtigsten Kenngrößen aus.

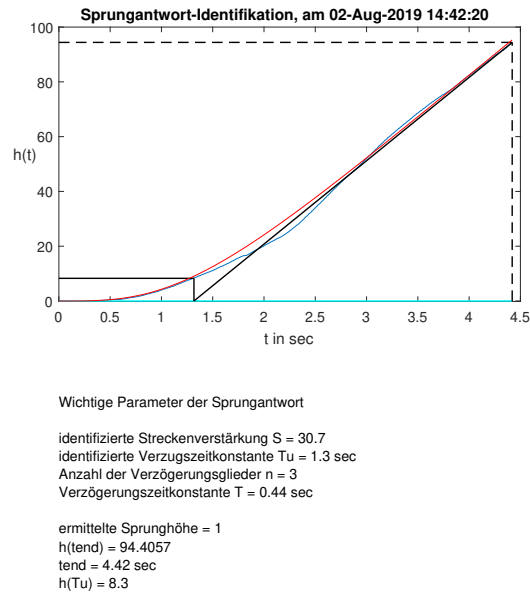


Figure 11: Anzeige des Ausgangswertes

### 3.3 Regelungsziele definieren

Generell sind natürlich minimale Einschwingzeit und möglichst geringes Überschwingen erwünscht. Häufig lassen sich jedoch diese beiden Parameter nicht getrennt von einander optimieren. Unser Regelziel ist an dieser Stelle eine Einschwingzeit von

$$t_{5\%} = 3 \quad (17)$$

und ein Überschwingen, dass nicht den Versuchsaufbau verletzt.

### 3.4 Entwurf eines einfachen Reglers

Es soll nun mithilfe des jetzigen Kenntnisstands ein möglichst einfacher Regler entworfen werden, der den Schwebekörper auf einer Wunschposition halten kann. Hier erfüllt ein P-Regler mit einer Verstärkung von  $K = 0,012954$  zunächst noch die vorgegebenen Voraussetzungen.

### 3.5 Test des einfachen Reglers am System

Testet man nun das Modell am realen System, treten deutliche Abweichungen auf. Es benötigt wesentlich länger um die vorgegebene Höhe zu erreichen. Hat es die Wunschkhöhe erreicht, kommt es vor, dass der Schwebekörper nochmal aus der Position ausbricht und anschließend neu eingeregelt werden muss. Das System scheint auf Störungen zu reagieren, wie zum Beispiel das Berühren der Röhrenwand, die im Modell nicht berücksichtigt wurden.

### 3.6 Aufgabe 7

Weiterhin ist der im Vorherigem aufgabenteil behandelte P-Regler der einfachste Regler Typ. Anstelle des P-Reglers entschieden wir uns in diesem Aufgabenteil für einen PI-Regler. Der I-Anteil macht den gesamten Regler zwar langsamer verleiht ihm aber eine wesentlich bessere Störgrößen Ausregelung. Der PI-Regler schafft es im Gegensatz zum P-Regler sämtliche konstante Störgrößen komplett aus zu regeln, um wieder stationär genau zu werden. Dafür hat der I-Anteil in der Streckenübertragungsfunktion nicht ausgereicht. Gemäß den im vorherigem Aufgabenteil definierten Regelungszielen und den am PI-Regler zur Verfügung stehenden Freiheitsgraden wurde die folgende Übertragungsfunktion gewählt.

$$G(s)_{PI} = 0,0023995 * \frac{1 + 5,9s}{s} \quad (18)$$

### 3.7 Aufgabe 8

Der Regler wird in das Reale Modell eingebaut und getestet. Nach etwa 30 Sekunden Simulationszeit wird wie im Versuch 6 eine Störgröße aufgeschaltet. Das führt dazu, dass die Kugel wieder absinkt. Die Stellgröße damit ansteigt und der Regler den über ihn gesteuerten Luftstrom erhöht. Nach ca 13 Sekunden hat der Regler die Störgröße ausgeregelt. Insgesamt entspricht das Ergebniss den Erwartungen.

### 3.8 Aufgabe 9

Um die  $t_{5\%}$  Zeit zu minimieren, ist es ratsam einen D-Anteil einzufügen. Dies liefert der PID-Regler. Mit diesem soll die Einschwingzeit möglichst kurz sein, sowie die Störungsausregelung möglichst schnell geschehen. Als weitere Einschränkung soll der Regler eine reelle Nullstelle zwischen 0 und -3 enthalten. Als Überschwingweite sollten ca 50% eingehalten werden. Um dies zu erreichen wird der Regler im SISO Tool angelegt. Es ergibt sich dabei die Übertragungsfunktion

$$G(s)_{PID} = 0,0071761 * \frac{(1 + 3,3s)(1 + 0,67s)}{s(1 + 0,02s)} \quad (19)$$

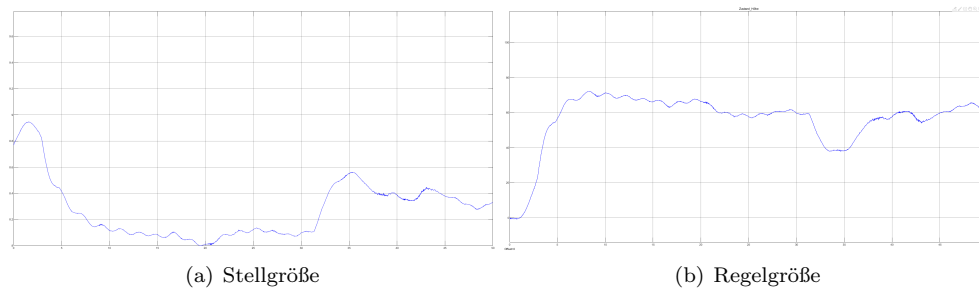


Figure 12: PI Regelung

### 3.9 Aufgabe10

Der oben entworfene PID-Regler wird in das Reale Modell implementiert. Das System Soll die Endlage bei 60 cm Höhe erreichen. Nach ca 20 Sekunden wird wie in Aufgabe 8 die Störgröße aufgeschaltet. Diese Regelt der regler sehr schnell aus. In ca 5 Sekunden hat sich das System in das 5% Band eingependelt. Das sind ca 50% weniger Zeit als der PI-Regler benötigt hat und damit ist der PID Regler trotz des Komplexeren aufbaus bisher die Beste Wahl. Bei ca 35 Sekunden wird erneut eine Störgröße aufgeschaltet, auch hier benötigt der PID-Regler wieder 5 Sekunden um in das 5% Band zurück zu kommen. Auffällig ist das die Stellgröße außer direkt nach dem Anlegen eines Sollwertes am anfang der Grafik sehr konstant wirkt, was an der im vergleich zum PI-Regler geäderten Skalierung liegt. Der Peak am Start lässt sich durch den D-Anteil erklären welcher Differenzierendes Verhalten besitzt. Idealerweise wäre der Peak beim Sprung zwischen zwei Werten damit unendlich groß. Dies kann in einem Realem Modell nicht der Fall sein. Dennoch liegt der Sprung mit einer Höhe von ca 55 schon sehr hoch.

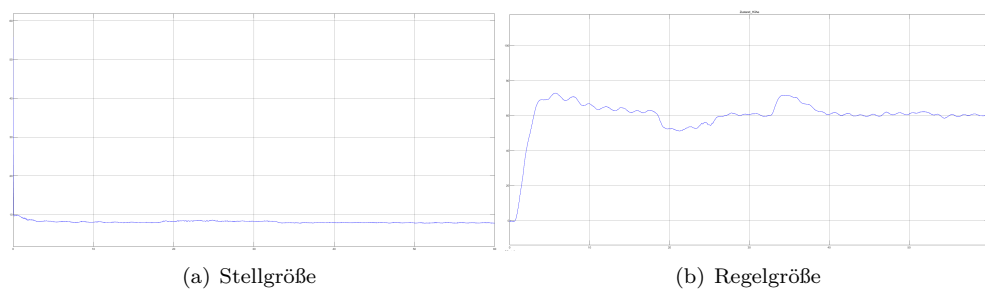


Figure 13: PID Regelung

Zuerst muss das Problem der Überspannung gelöst werden. Dies kann dadurch geschehen, dass ein Sättigungsblock in den Regelkreis eingebaut wird, sodass der Motor mit Maximal 5 Volt versorgt wird. Als nächstes muss die zu große Winkelgeschwindigkeit verringert werden. Dazu wird wieder ein Sättigungsblock eingebaut, welcher die Winkelgeschwindigkeit auf Maximal 2000 Grad/sec wachsen lässt. Sind diese Probleme behoben kann der Motor in diesem Versuch einwandfrei benutzt werden.

### 3.10 Verbesserte Positionsregelung

#### 3.10.1 Berechnen der Kaskadenregelung und der Führungsübertragungsfunktion

Die Faustformel aus der Vorlesung schreibt folgende Berechnung der Führungsübertragungsfunktion dar:

$$m = \frac{Im(\lambda)}{Re(\lambda)} \quad (20)$$

Es soll der dominante Pol unter diesem Hinblick untersucht werden. Dabei wird folgendes Ergebnis erzielt:

- Berechnen der Pole der Streckenübertragungsfunktion und das prozentuale Überschwingen:

$$G_w = \frac{186,0496}{(s + 13,46) * (s - 13,46)} \quad (21)$$

Daraus ergeben sich folgende Polstellen:

$$x_1 = 23.4600, \quad x_2 = -10.0000 - 13.4600i \quad (22)$$

#### • 3.10.2 Bestimmen der Verstärkung des P-Reglers

Bestimmen der P-Regelkoeffizienten dieser Anordnung kann folgend vorgenommen werden: Bei der Anordnung können die kaskadierten Werte der P-Regler  $K_P$  und  $K_I$

Allgemein gilt für die Formel:

$$G_w = \frac{\frac{K_P * K_s * K_D}{T}}{s^2 + \left(\frac{K_D * K_P}{T} + \frac{1}{T}\right) * s + \frac{K_P * K_I * K_s}{T}} \quad (23)$$

$$G_w = \frac{186,0496}{(s + 13,46) * (s - 13,46)} \quad (24)$$

Aus der oben genannten Gleichung kann also gefolgert werden:

$$\frac{K_P * K_s * K_I}{T} = 186,0496 \quad (25)$$

Wir können also  $K_R$  bestimmen als:

$$K_P * K_I = K = 0,04377637647 \quad (26)$$

- **3.10.3 Simulieren des Regler und Überprüfung auf die Vorgaben**

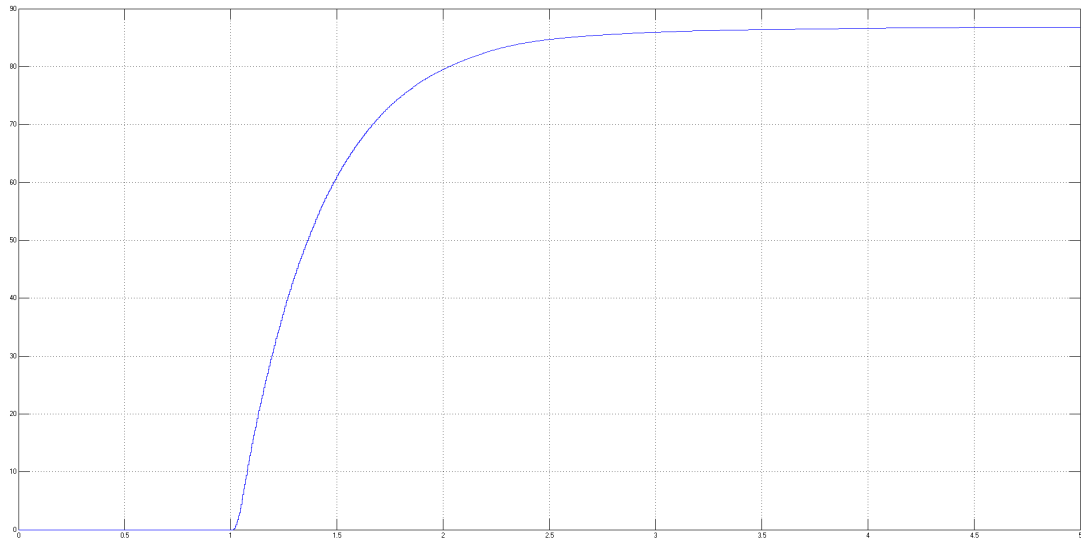


Figure 14: Simulation der berechneten Regelgrößen und der Berechneten K-Werte bei der Führungsgröße 90 °.

Anhand der Führungsgröße bleibt zu sehen, dass nun angepasst Verhalten von  $\Delta m$  und  $t_{5\%}$ . Beim Ablesen der Werte aus dem Diagramm können folgende Werte Festgehalten werden:

$$\Delta m = 0 \quad (27)$$

Dies könnte ebenfalls daraus gefolgert werden, dass es sich um ein PT-1-Glied handelt und diese in keinem Fall ein Überschwingen erzeugen.

$$t_{5\%} = 3s \quad (28)$$

Die  $t_{5\%}$  Zeit liegt mit 3 Sekunden im erwarteten Rahmen.

### 3.10.4 Implementation und versuch an der Maschine im Praktikum

Der Test im realen System zeigt, dass das System sich real nicht, wie ein PT-1-Glied verhält. Dies ist vorallem mit den sehr hohen Reibungskoeffizienten am Versuchsaufbau zu erklären. Daraus ergibt sich folgendes Diagramm der Drehung um 90 °.

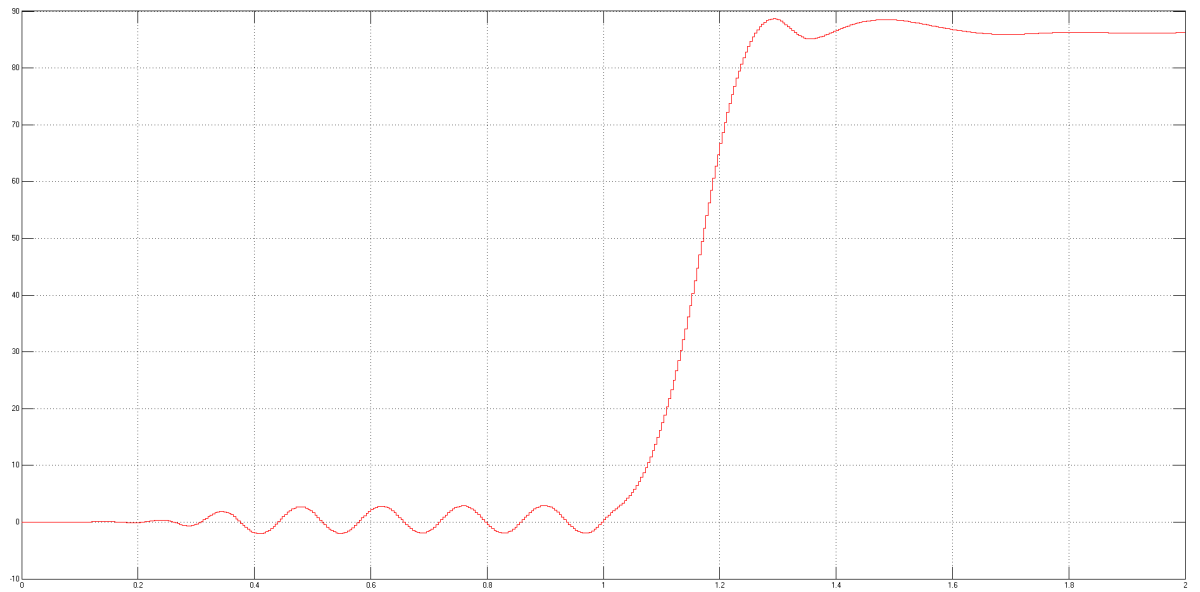


Figure 15: Realer Messwert des Systems bei einer geregelten Drehung um  $90^\circ$

Man könnte im Nachgang diesen Versuch mit etwas Öl auf den Lagern wiederholen um verbesserte Ergebnisse zu erzielen, ein Überspringen ist ebenfalls nicht eingetreten allerdings hat der Verlauf des realen System nicht die erwarteten Gemeinsamkeiten mit einer PT-1-Strecke.

## 4 Versuch Kran

### 4.1 Vorbereitungsaufgaben

### 4.2 Regelung der Wagenposition $y_w$

#### 4.2.1 Arbeitsposition einnehmen

Der Kran ist in die zukünftige Arbeitsposition zu bewegen, das bedeutet er soll sich auf der mittleren  $x_w$ -Position sowie auf der mittleren R-Position (Höhenposition) befinden. Diese beiden Parameter sowie die dazugehörigen Stellgrößen bleiben für den Rest des Versuchs unverändert, während in der  $y_w$ -Richtung gearbeitet wird. Dafür gibt es prinzipiell verschiedene Möglichkeiten:

1. Man kann den Kran mit Hilfe der Bedienoberfläche (Aufruf mit Hilfe des commands *cr*) „3DCrane“ ansteuern. Hier ist unter dem Begriff Tools der Button „Go To Center“ zu finden, der dafür sorgt, dass der Kran sich automatisch in die mittlere  $x_w$ - sowie R-Position begibt.
2. In der Bedienoberfläche finden sich neben diversen Commandpresets auch das Tool „Manual Setup“ mit dem man die Parameter des Krans sowohl ablesen als auch manuell einstellen kann.

#### 4.2.2 Messung der Haftreibung

In Aufgabe 4.3.b gilt es, die Haftreibung des Kransystems zu bestimmen, da diese später eine direkte Auswirkung auf die Regelung haben wird. Dafür wird zunächst sichergestellt, dass sich der Kran in Ruhe befindet und alle Stellgrößen gleich Null sind. Nun kann die Spannung die als „Y control“ Stellgröße benötigt wird, um den die Haftreibung des Wagens zu überwinden zunächst grob geraten werden und in einem zweiten Schritt genauer bestimmt werden. Es ergibt sich experimentell eine Spannung von:

$$u_y = 0,059 \quad (29)$$

#### 4.2.3 Einfacher Proportionalregler

In Aufgabenteil 4.3.c soll ein linearer Positionsregler herangezogen werden, der direkt proportional zur Abweichung der Position zur Wunschposition die Spannung  $u_y$  bestimmt. Nach der im Skript geforderten Vorgabe, soll die aus einer Positionsabweichung von  $2\text{cm}$  resultierende Stellspannung  $u_y$  gerade noch so genügen, um die Haftreibung des Systems zu überwinden. (Dies bedeutet gleichzeitig, dass wir versuchen, den Wagen mind. auf  $2\text{cm}$  genau einzuregeln.) Durch Umstellen der gegebenen Formel

$$u_y = R_y * (\bar{y}_w - y_w) \quad (30)$$



ergibt sich ein Verstärkungsfaktor von

$$R_y = 2,95 \quad (31)$$

#### 4.2.4 Maximale Auslenkung innerhalb der Sättigung

Nun soll ermittelt werden, ab welchem Regelfehler das Stellsignal für  $R_y = 5$  die Sättigung erreicht. Dies lässt sich mit der vorangestellten Formel durch Einsetzen lösen. Man erhält eine Abweichung von  $20\text{cm}$ , ab denen das System nicht stärker regelt.

#### 4.2.5 Implementierung des Reglers mit verschiedenen Parametern

Im Folgenden werden drei verschiedene Implementierungen dieses Reglers betrachtet (und hinsichtlich der Positionsgenauigkeit, Geschwindigkeit und Pendeldauer begutachtet): Gegeben sind der Verstärkungsfaktor  $R_y$  und die Positionsabweichung von der Wunschposition

$$R_y = 5\bar{y}_w - y_w = 0,2 \quad (32)$$

### 4.3 Aufgabe 4.4 Zusätzliche Regelung des Winkels $\alpha$

#### 4.3.1 Aufgabe 4.4.a,b Darstellung der Reglerstruktur

Das im folgenden beschriebene System ist in Figure 11 dargestellt. Es handelt sich um ein um die Ruhelage linearisiertes Zeitinvariantes System, das heißt der Zeitpunkt bei dem beispielsweise ein Sprung in das System eingeprägt wird ist irrelevant, das folgende Verhalten des Systemes im Rahmen der Messungenauigkeit und Statistischen Abweichung ist immer identisch. Dies wird im LTI Block implementiert. Die Rückkopplungen sind ebenfalls Linear weshalb die gesamte Regler Struktur Linear ist. Das Linearisierte Modell kann in zwei Versionen in Matlab bzw. Simulink implementiert werden:

1. Es kann über die Verschiedenen Beziehungen der einzelnen Zustandsgrößen und Eingangsgrößen ein Simulink Modell erstellt werden.
  2. Die Linearisierten Gleichungen in Matrizen Form können direkt in Matlab eingegeben werden, woraus Matlab selbstständig ein LTI System realisiert.
- Beide Varianten liefern das gleiche Ergebnis. Wir benutzten den 1. Weg.  
Die Konstante  $R_y$  besitzt den Wert 5 und die Startwerte der Integratorenkette sind identisch, gleich Null.

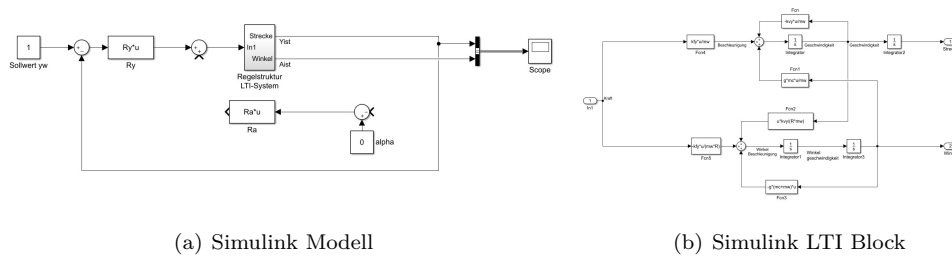


Figure 16: Simulink Modell mit aufgetrennter Rückkopplung

#### 4.3.2 Aufgabe 4.4.c

Aus dem Modell werden die Übertragungsfunktion und ihre Pole bestimmt.

$$G(s)_{\text{offen}} = \frac{s}{(s + 49)(s + 0,05 \pm 4,5i)} \quad (33)$$

Diese Übertragungsfunktion besitzt folgende Pole aufgeteilt nach Last und Wagen Last:

$$\begin{aligned} &-0,05 + 4,5i \\ &-0,05 - 4,5i \end{aligned}$$

Wagen:

$$-49$$

Die Last ist, im Gegensatz zum Wagen, schwingungsfähig, weshalb diese Pole einen imaginären Anteil aufweisen. Die Pole des Wagens werden hingegen rein reell modelliert. Daraus ergibt sich die über die Faustformel für das Einschwingen in das 5% Band Folgender Ausdruck

$$t_{(5\%)} = \frac{-3}{\operatorname{Re}(s_D)} = 33,3 \quad (34)$$

#### 4.3.3 Aufgabe 4.4.d

Als sinnvolle Einschwingzeit für das geregelte System wurde eine Einschwingzeit von 3,3 Sekunden gewählt, was einer Dekade weniger als die des ungeregelten Systems beträgt. Aus dieser Überlegung ergibt sich als gewünschter Überlegung über die obrige Faustformel ein Realteil des dominanten Poles der Last von -1. Über eine Bedingung für die Maximale Überschwingweite könnte an dieser Stelle ein eventueller Imaginäranteil des Pols bestimmt werden.

#### 4.3.4 Aufgabe 4.4.e

Mithilfe des SISO Tools kann der Regler Parameter  $R_a$  über die Wurzelortskurve und die Sprungantwort bestimmt werden.  $R_a = -2,6$

Legt man die Gleichung 16 des offenen Regelkreises zugrunde kann die Gleichung des geschlossenen Regelkreises hergeleitet werden. Daraus ergeben sich die Pole des geschlossenen Regelkreises:

$$\begin{aligned} G(s)_{\text{geschlossen}} &= \frac{G(s)_{\text{offen}}}{1 + G(s)_{\text{offen}}} \\ G(s)_{\text{geschlossen}} &= \frac{-34,18s + 0,04443}{s^3 + 48,51s^2 + 954,4} \end{aligned} \quad (35)$$

Diese Übertragungsfunktion besitzt folgende Pole:

$$\begin{aligned} &-48,3558 \\ &-0,0939 + 4,437i \\ &-0,0939 - 4,437i \end{aligned}$$

#### 4.3.5 Aufgabe 4.4.f

Das System wird für folgende Parameter simuliert:  $R_a = 1$   $y_w = 1$   
Das Ergebniss der Simulation ist in Figure 12 a) dargestellt.

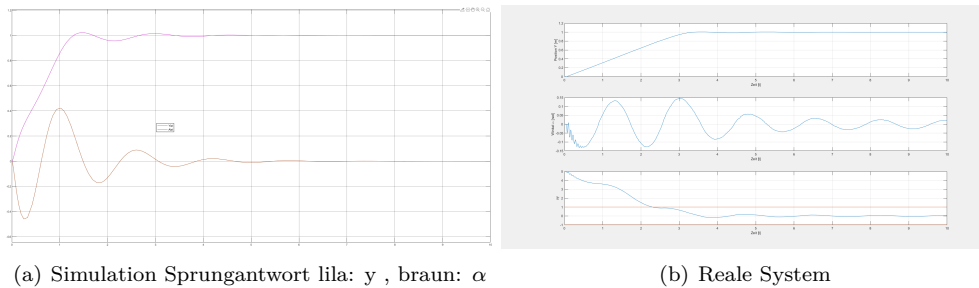


Figure 17: Gegenüberstellung Simulation und Experiment

#### 4.3.6 Aufgabe 4.4.g,h

Der Regler soll nun am Realem System getestet werden, dabei fällt auf, dass der Regler die Schwingung deutlich besser dämpft als das ungeregelte System. Es liegt aber trotzdem weit weg von der Simulation, bei der wir nach 3,3 Sekunden im 5% Band liegen. Im Vergleich, dieser Zustand ist im realen System erst nach ca. 5,5 Sekunden erreicht. Dennoch liegt die Maximale Winkelauslenkung des Realem Systems unter der der Simulation. Das verlangsamte einschwingen kann durch die Sättigung des Motors erklärt werden, welcher nur bei Spannungen bis 5Volt die Regelung des Winkes einbeziehen kann. Das führt dazu, dass die Regelung erst später beginnt zu arbeiten und damit das System langsamer wird. Die Regelung arbeitet die Erste 2,5 Sekunden nicht und diese Braucht das reale System länger um die Ruhelage zu erreichen. Das Maximale Überschwngen ist geringer, da der Motor auch die Bewegung in y Richtung nicht beliebig Schnell durchführen kann sondern auch hier gesättigt ist. Außerdem wurde im Modell keine Gleitreibung berücksichtigt.

### 4.4 Digitale PD-Regelung von $y_w$ und $\alpha$

#### 4.4.1 Einfluss der Abtastzeit

In diesem Versuch wird der Einfluss der Abtastzeit auf das Ergebnis der Regelung genommen. Da wir die Regelfunktion des PD-Regler diskretisiert haben und danach sich das Ergebnis im k Bereich befindet, muss dieses Ergebnis dann noch in die

Bildebene Z gebracht werden.

$$G(s)_R = K_P + K_D s = K_P * s + K_D * \dot{u}(1 + s * T_D) \quad (36)$$

$$y_k = K_P * k + \frac{K_D}{T_D} * (k - 1) \quad (37)$$

$$G(z)_R = K_p * z + \frac{K_D}{T_D * T} * \frac{z - 1}{z} \quad (38)$$

Was dabei einkalkuliert wurde, ist, dass T direkt die Abtastzeit des Reglers Berücksichtigt und daraus sich der Regelkreis beeinflussen lässt.

1. Die Abtastzeit wird auf  $t =$  festgelegt.

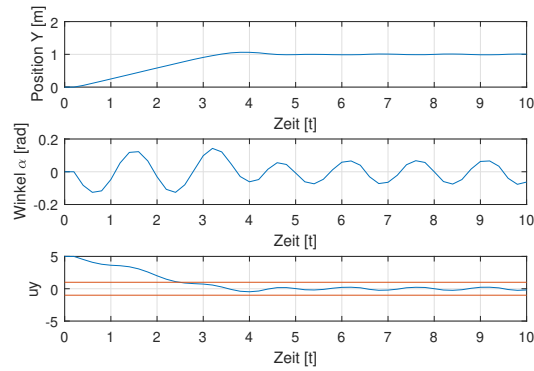


Figure 18: Verlauf des Experimentes mit einer Abtastzeit von 200ms

Beobachtung: Bei der Abtastzeit im oberen Grenzbereich schaukelt sich die eigentliche Grundbewegung auf und die Pendelbewegung wird eher verstärkt als gedämpft. Das sorgt für eine stärkere Pendelbewegung als die unregelte Bewegung.

2. Die Abtastzeit wird auf  $t = 1$  ms festgelegt.

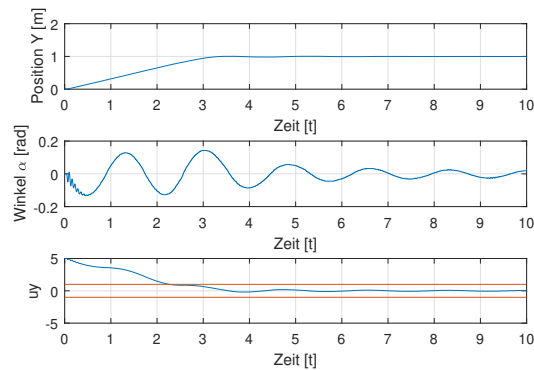


Figure 19: Verlauf des Experimentes mit einer Abtastzeit von 1ms

Beobachtung: Bei dieser kleineren Abtastzeit arbeitet der Regler so, dass das Schwingen des Seils stark vermieden wird. Es sorgt dafür, dass die Auslenkung des Seils verringert wird.

**Fazit:** Das Fazit, was aus diesem Versuch gezogen werden muss ist, dass die diskretisierung einer Messung und die diskretisierung eines Reglers in ausreichender Genauigkeit vorgenommen werden muss.

#### 4.4.2 Warum macht eine Erweiterung um einen PD-Regler Sinn?

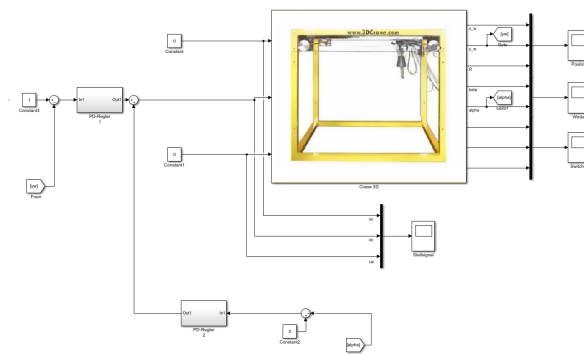


Figure 20: Aufbau der PD-Regelung im realen System

Dazu müssen wir uns die Beschreibung des Systems anschauen und mit den Zielen der Regelung vergleichen. Es soll die Abweichung des Seilwinkels möglichst gering sein und die Position des Krans möglichst exakt erreicht werden. Da ein P-Regler immer eine dauerhafte Regelabweichung mit sich bringt, so kann mit dem PD-Regler gut auf eine schnelle Änderung reagiert werden, da dieser besser auf die Veränderung einer

Regelgröße reagiert. Diese Veränderung kann gut mit einem D-Regler geregelt werden um weiter einer möglichen dauerhaften Abweichung Regelungstechnik zu begegnen werden die P-Regelanteile genutzt. Dies macht den PD-Regler an dieser Stelle zum idealen Regler für den Kran.

#### 4.4.3 Test des PD-Regler im Realen System

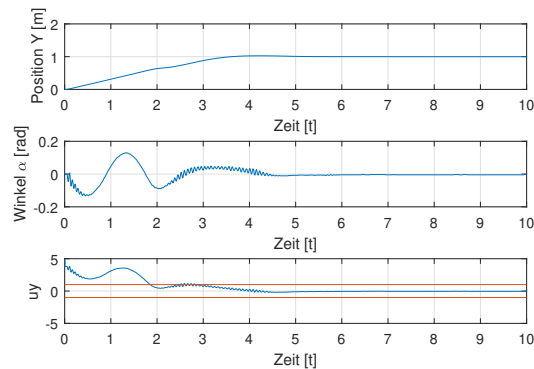


Figure 21: Aufbau der PD-Regelung im realen System

Bei diesem Versuch lässt sich beobachten, dass es in der Eingelphase, wenn die Überlagerung des P-Reglers nicht mehr mehr in der Sättigung des Stellmotors ist, ein zittern der Kurve zu beobachten. Auch beim Versuch im realen System gibt es dieses Regelflackern.

#### 4.4.4 Filterung über ein PT-1 Glied

Es soll zu dem Regler ein PT-1 Filter implementiert werden. Die Idee bei diesem Versuch ist es, dass das Rauschen unterdrückt wird und die Zitterbewegungen am Ende zu vermeiden und damit gleichzeitig auch die Ausregelzeit verkürzen. Wir implementieren dazu das PT-1 Glied in das gegebene Simulinkmodell des Vorversuchs. Dieses Modell wird sowohl im Winkel, wie auch in der Streckenregelung im ein PT-1 Glied erweitert.

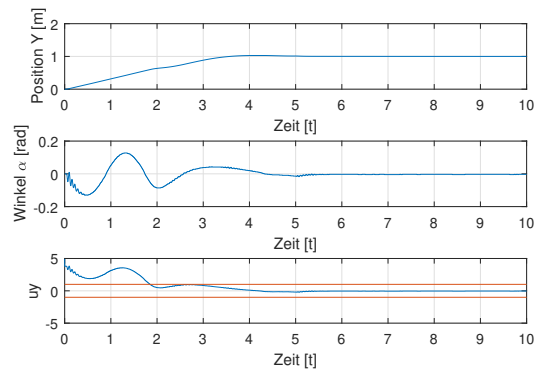


Figure 22: Aufbau der PD-Regelung im realen System ergänzt mit einer PT1-Strecke zur Filterung der Kleinstabweichungen

## 4.5 Regelung mit zusätzlicher Stellgrößenbeschränkung

### 4.5.1 Kann Stellgrößenbeschränkung für eine Regelverbesserung sorgen?

Die neue Struktur korrigiert das Problem in gewisser Weise, weil das Verhältnis von Wegstreckeänderung zu Winkel eingeschränkt werden kann. Wenn der Stellgrößenanteil, der Wegstrecke nicht mehr voll ausgestreckt werden kann, begrenzt sich die Geschwindigkeit mit der der Krankwagen bewegt werden kann. Dieser Regelgrößenanteil steht dann der Regelung des Seilwinkels zu. Zusätzlich ist eine begrenzte Beschleunigung des Kranwagens nicht mehr dazu in der Lage einen unbegrenzt großen Winkel zu produzieren. Daraus lässt sich Schlussfolgern, dass eine Stellgrößenbeschränkung die Regelungsgenauigkeit verbessert.

## 4.6 Testen dieser theoretische Stellgrößenbeschränkung im realen Versuchsaufbau

Nach einigen Versuchsreihen wurde ein Stelle sich der beste Kompromiss bei einer Stellgrößenbeschränkung auf einen Wert von 0,9 ergeben. Das Ergebnis dieser Dokumentation wurde hier dann festgehalten.



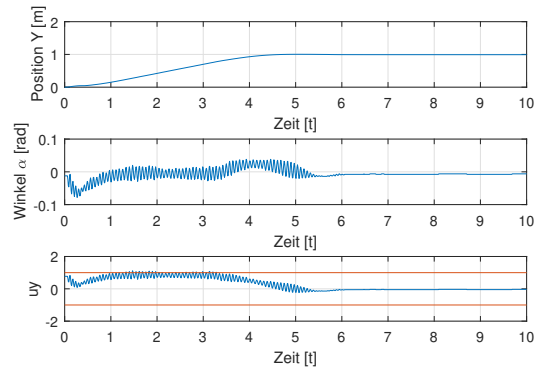


Figure 23: Regelungsdarstellung mit der Stellgrößenbeschränkung und einem PD-Regler

Es lässt sich dabei festhalten, dass zwar eine Regelverbesserung eintritt, allerdings das Zittern des Versuchs erneut vorhanden ist. Vielleicht könnte dies mit dem im Kapitel vorher gezeigten Filterglied in der Griff verbessert werden. Hierbei muss also die Abtastzeit der Messeinrichtung berücksichtigt werden um dieses Zittern zu vermeiden und eine bessere Regelaussteuerung zu ermöglichen.

#### 4.7 Regelung der x- und y- Achse

## List of Figures