

BEUTH HOCHSCHULE
FÜR TECHNIK
BERLIN

University of Applied Sciences

Fachbereich VI - Technische Informatik - Embedded Systems
Fach Rapid Control Prototyping
SS 2014

Regelung einer simulierten Druckregelstrecke (II)

Eingereicht am
13. Juli 2014

Eingereicht von
Matthias Hansert s791744
Marcus Perkowski s798936
Marcel Burde s798984

[Hansert]

Aufgabenstellung

Entwerfen und optimieren Sie einen Regelkreis, der den Arbeitspunktdruck für alle möglichen Belastungsfälle (Schalter ein und anschließend Schalter aus) möglichst schnell und ohne Übersteuerung der Stellgröße ausregelt und stationär konstant hält.

Berücksichtigen Sie dabei, dass primär Störungen ausgeregelt werden sollen. Eine Führung des Kreises in den Arbeitspunkt erfolgt nur nach Inbetriebnahme der Strecke (ca. 1 mal pro Woche).

Nehmen Sie (bis auf das Einstecken der notwendigen Kabelanschlüsse und die Betätigung des Störschalters) keine Änderungen (z.B. Veränderung von Potentiometereinstellungen) am Simulationsgerät vor.

Das Simulationserät simuliert einen elektrisch steuerbaren hydraulischen Druckgenerator für den Antrieb einer Arbeitsmaschine. Die Anschlußkonfiguration der Eingangs- und Ausgangssignale ist auf dem folgenden Bild (nächste Seite) dargestellt:

- Mittels einer Steuerspannung $u(t)$, die einen Aussteuerbereich von -10V bis 10V hat, aber nur im positiven Bereich genutzt werden soll, kann der Druck zwischen 0 und einem Maximalwert verstellt werden.
- $y_M(t)$, die Meßgröße des erzeugten Drucks, kann auf der rechten Seite der Anordnung an einer Buchse in Form einer elektrischen Spannung gemessen werden. Die Meßeinrichtung arbeitet linear und der Verstärkungsfaktor beträgt $V = 0,08 \frac{V}{Bar}$.
Die Meßeinrichtung habe PT1-Verhalten, wobei ihre Zeitkonstante klein gegen die der Strecke ist, so daß sie vernachlässigt werden kann.

Der Generator arbeitet mit einem Arbeitspunktdruck von 50 Bar bei einer Grundlast, die anliegt, wenn der „Störschalter“ in der Stellung ohne Beschriftung (also nach unten) steht. Durch eine Schalterbewegung in Richtung „ein“ (nach oben) kann eine maximale Entlastung des Druckgenerators simuliert werden.

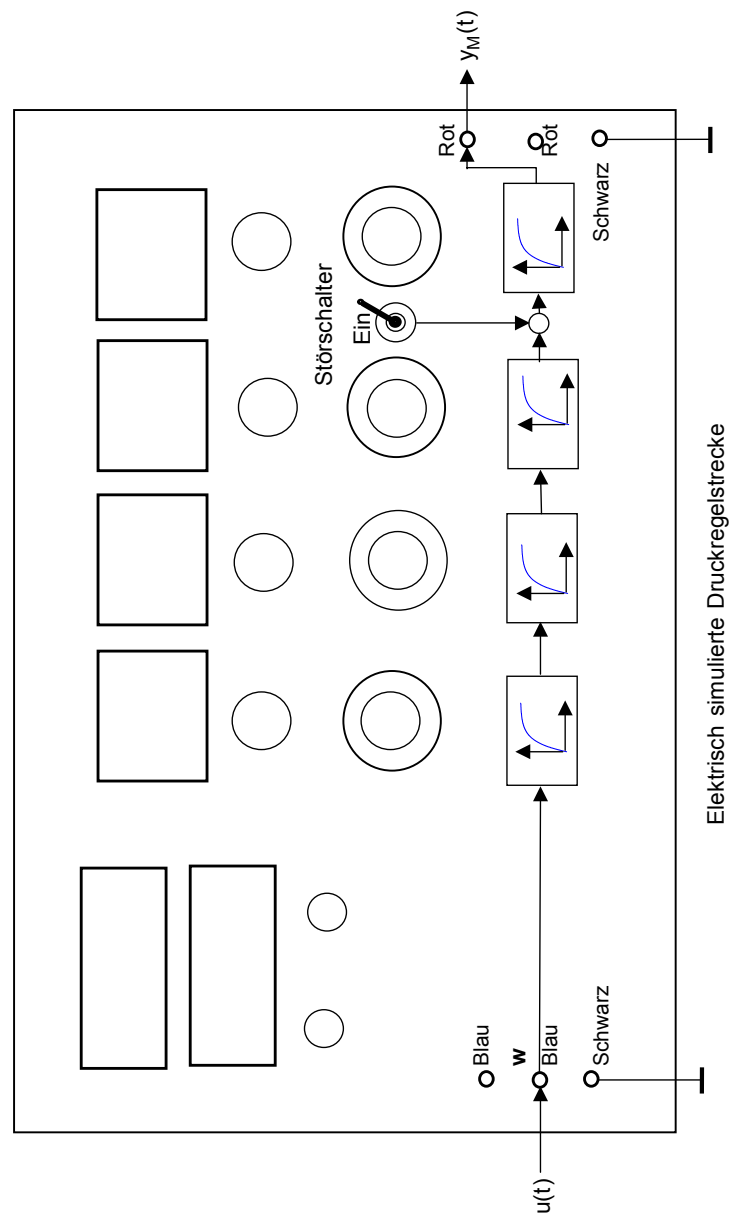


Abbildung 1: Elektrische simulierte Druckregelstrecke

[Hansert]

Auflistung aller abgegebenen Dateien

- **01_Vorbereitung**
 - *reinraus2007b.mdl*
 - *input_Mittelwert_Offset.m*
 - **02_Statische_Kennlinie**
 - *Berechnung_Kennlinie.m*
 - *Statische_Kennlinie.mdl*
 - *Scope_Out.mat*
 - *ScopeIn.mat*
 - **03_Steuerverhalten_Strecke**
 - *Statische_Kennlinie.mdl*
 - *modell_sys_id.mat*
 - *Scope_Out.mat*
 - *sprungantwort.mat*
 - *UebfktAnalyse.mat*
 - **04_Stoerverhalten_Strecke**
 - *arbeitspunkt.mdl*
 - *stoer_err.mat*
 - *stoerung.mat*
 - *StorfktAnalyse.mat*
 - **05_Simulation_Strecke**
 - !!!!! besprechen !!!!!
 - **06_Reglerentwurf**
 - ...
 - **07_Simulation_Regelkreis**
 - *simulation_regelkreis.mdl*
 - **08_Regler_Reale_Strecke**
 - *regler_strecke.mdl*
 - *Regler_und_reale_Strecke.mdl*
 - **09_Sonstiges**
 - Vorgehensweise_zur_Erstellung_Belegarbeit
 - Labor-Übung 11 (Simulierte Druckregelstrecke_2)
-

- **10_Hilfsprogramme**

- polkomp.m
- sys_id
- tf2vn.m

Inhaltsverzeichnis

1	Zu regelndes Objekt kennen lernen	2
1.1	Offset	3
2	Festlegung des Arbeitspunktes	4
2.1	Statisches Verhalten	4
3	Messtechnische Identifikation des Steuerverhaltens der Strecke	6
3.1	Dynamisches Verhalten	6
3.2	Identifikation der Strecke	6
4	Messtechnische Identifikation des Störverhaltens der Strecke	8
5	Simulation des Steuer- und Störverhaltens der Strecke	9
6	Entwurf des Reglers	10
7	Simulation des Regelkreises mit dem entworfenen Regler	15
8	Implementierung des Reglers in den realen Regelkreis	17
	Literatur- und Quellenverzeichnis	20

1 Zu regelndes Objekt kennen lernen

Bei dem zu regelnden Objekt handelt es sich um einen elektrischen, steuerbaren, hydraulischen Druckgenerator für den Antrieb einer Arbeitsmaschine. Zu beachten ist, dass es sich um eine simulierte Druckregelstrecke handelt. Bekannte Größen sind:

- Steuerspannung $-10V \leq u(t) \leq 10V$, wobei nur der positive Bereich betrachtet wird, da der Druck von 0 bis zu einem Maximalwert verstellt wird
- die Messgröße $Y_M(t)$ wird in Form einer Spannung gemessen
- der Verstärkungsfaktor der Messeinrichtung V_M beträgt $0,08 \frac{V}{Bar}$
- bei einer Grundlast liegt der Arbeitspunktdruck bei $50Bar$
- die Messeinrichtung hat ein PT1-Verhalten, bei welchem die Zeitkonstante vernachlässigt werden kann

Wenn man das Objekt (Abbildung 2) genauer betrachtet, können die Teile eines Standard-Regelkreises erkannt werden:

- $u(t)$ Regelgröße
- $y(t)$ Stellgröße
- Stelleinrichtung und Regelstrecke

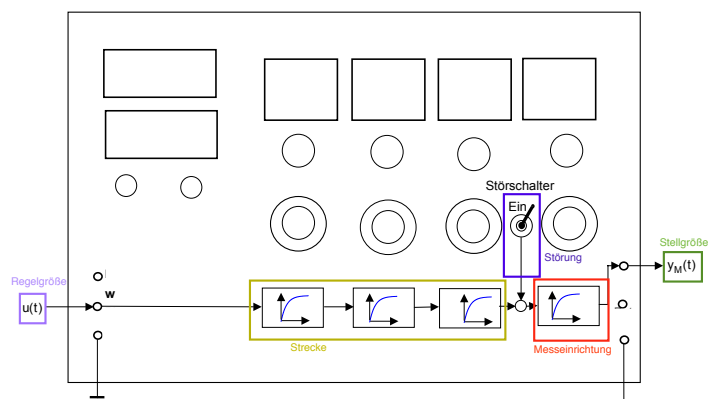


Abbildung 2: Elektrische simulierte Druckregelstrecke mit Standard-Regelkreis

Um alle Größen zu bestimmen bzw. zu messen und um den Reger zu entwickeln, werden die Programme MATLAB/Simulink eingesetzt. Dies geschieht mit dem Tool Real-Time-Workshop und einer A/D-D/A Wandlerkarte.

1.1 Offset

Um das System mit dem Rechner zu verbinden wird eine Wandlerkarte eingesetzt. Die Wandlerkarte ist im PC eingebaut. Um Fälschungen im Ergebnis zu umgehen, muss der Eingangs- und Ausgangsoffset gemessen werden. Um diese Werte zu messen wurde das *reinraus2007b.mdl* Simulinkmodell benutzt.

Für den Eingangsoffset der Wandlerkarte wurde ein Display für die Ausgabe benutzt. Wichtig ist, dass die Leitungen für die Verbindung von der Wandlerkarte zum System kurzgeschlossen werden. Auf dieser Weise werden zum Beispiel $5V$ angelegt und diese $5V$ werden vom Ergebnis subtrahiert. Unser Eingangsoffset beträgt $0,1292V$.

Um den Ausgangsoffset zu ermitteln werden die zwei Leitungen an ein Voltmeter angeschlossen. Dieser sollte bei einem nicht vorhandenen Offset null zeigen. In unserem Fall konnten wir einen Ausgangsoffset von $0,1050V$ ablesen.

Diese beide Werte werden bei Simulationen in den Kapiteln 5 und 7 jeweils subtrahiert, um die Verfälschung von Ergebnissen zu vermeiden.

[Hansert]

2 Festlegung des Arbeitspunktes

Laut Aufgabestellung liegt der Arbeitspunktdruck bei einer Grundlast bei 50Bar . Da unser System einen Spannungsbereich von 0 bis 10V besitzt, müssen wir den Druck in eine Spannung übersetzen.

$$\text{Arbeitspunkt} = \text{Arbeitspunktdruck} * \text{Verstaerkung}$$

$$\text{Arbeitspunkt} = 50\text{Bar} * 0,08\text{V}/\text{Bar}$$

$$\text{Arbeitspunkt} = 4\text{V}$$

Um den Arbeitspunkt zu ermitteln muss zuerst das Verhalten des Systems festgestellt werden.

2.1 Statisches Verhalten

Um die Kennlinie des Systems zu ermitteln wird, mithilfe des Simulinkmodells *Statische_Kennlinie.mdl*, eine sprungförmige Erregung mit 20 Schritten, bei jedem Schritt $t = \text{sek}$ die Spannung um $0,5\text{V}$ erhöht. t wurde so gewählt dass das System einen stationären Zustand erreicht, bevor es neu angeregt wird (Siehe Abbildung 3 und 4).

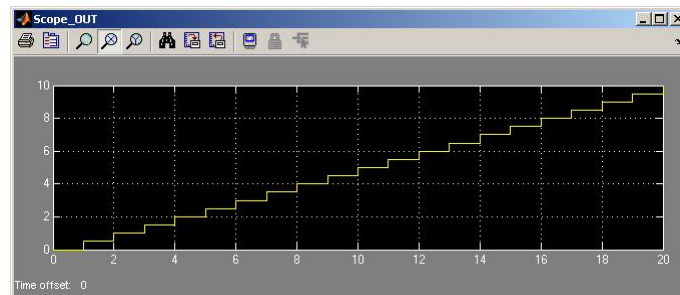


Abbildung 3: Ausgangssignal, Erregung des Systems



Abbildung 4: Eingangssignal, Antwort des Systems

Die Antwort wird in der Matrix *ScopeIn.mat* gespeichert und mit dem MATLAB Script *Berechnung_Kennlinie.m* wird die statische Kennlinie berechnet und gezeichnet (siehe Abbildung 5). Um Fehler zu vermeiden haben wir uns dazu entschieden einen Durchschnittswert zu berechnen, dieser besteht aus 20 Werten bevor das System neu erregt wird.

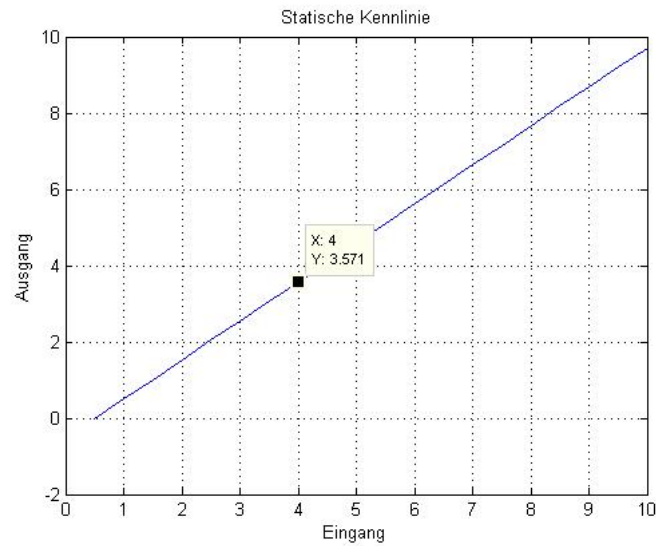


Abbildung 5: Statische Kennlinie, Ausgang $y(t)/V$, Eingang $u(t)/V$

In der Abbildung 5 ist deutlich zu erkennen, dass es sich um ein lineares System handelt, da die Verstärkung konstant bleibt.

3 Messtechnische Identifikation des Steuerverhaltens der Strecke

3.1 Dynamisches Verhalten

Zur Ermittlung des dynamischen Verhaltens wird eine Messung durchgeführt, in der die Strecke mit einem Sprung an der Stellgröße erregt wird. Wir wissen bereits, dass der Arbeitspunkt bei 50bar beträgt, daher können wir das System in der Nähe des Arbeitspunktes (mit einem Sprung von 4V auf 5V) erregen.

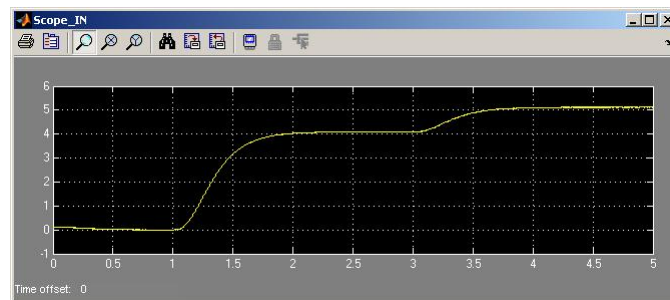


Abbildung 6: Sprungantwort - dynamische Kennlinie

3.2 Identifikation der Strecke

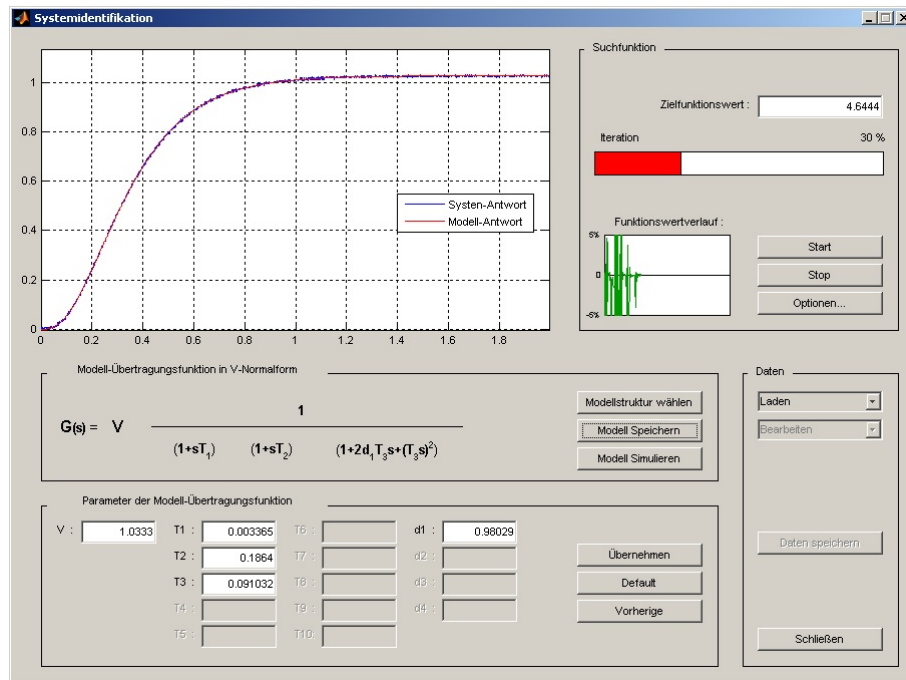
Mit Hilfe des Tools *sis_id.m* können wir die Strecke identifizieren. Dafür müssen die Vektoren *ySystem* (Sprungantwort), *uerr* (Sprung) und *t* (Zeitachse) im Workspace bekannt sein. Im Tool *sis_id.m* muss eine Vorauswahl der Übertragungsglieder erfolgen. Da die Sprungantwort am Anfang eine Verzögerung hat, handelt es sich mindestens um ein PT2-Glied. Nach der Berechnung und Ausprobieren von *sys_id* ist im Abb. zu sehen, dass am Ende die Strecke aus einem System besteht, das in Reihe PT1, PT2 und PT3 geschaltet ist. Die Parameter der Übertragungsfunktion in V-Normalform können unter im Feld abgelesen werden. Die Übertragungsfunktion kann mit Button "Model speichern" in der Form von Polynom im Workspace abgespeichert werden.

Die ermittelte Formel aus dem Tool *sis_id*:

$$G(s) = \frac{1,03}{(1 + 0,003365s) * (1 + 0,1864s) * (1 + 2 * 0,98029s + (0,091032s)^2)}$$

Gerundete Formel für Polkompensation:

$$G(s) = \frac{1,03}{0,000005s^4 + 0,0017s^3 + 0,043s^2 + 0,368s + 1}$$

Abbildung 7: Tool *sis_id* für Identifikation der Strecke

[Perkowski]

4 Messtechnische Identifikation des Störverhaltens der Strecke

Da das Verhalten der Störübertragungsfunktion zu ermitteln ist, kann wie im Kapitel 3 durchgeführt werden. Die Strecke wird erst in den Arbeitspunkt erregt und dann die Störgröße mit einem Schalter an der Hardware zugeschaltet. Wir haben die Störmessung aufgezeichnet (*stoer_err.mat*).

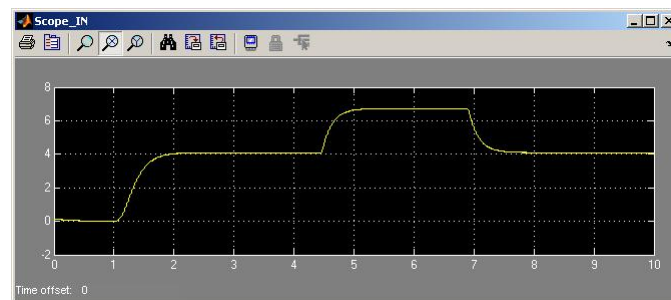


Abbildung 8: Strecke mit Störung

Nachdem wir die gemessene Sprungantwort betrachten, sind wir aufgrund des typischen Verhaltens ausgegangen, dass es sich um PT1-System handelt. Da mit Hilfe des Tools *sys_id* die Zeitachse der Störung eingegrenzt werden kann, kann an dieser Stelle die Identifikation der Störstrecke durchgeführt werden. Das Ergebnis kann im folgenden Bild nachvollzogen werden.

Die ermittelte Störungsfunktion:

$$G(s)_{stoer} = \frac{2,6424}{1 + 0,16207s}$$

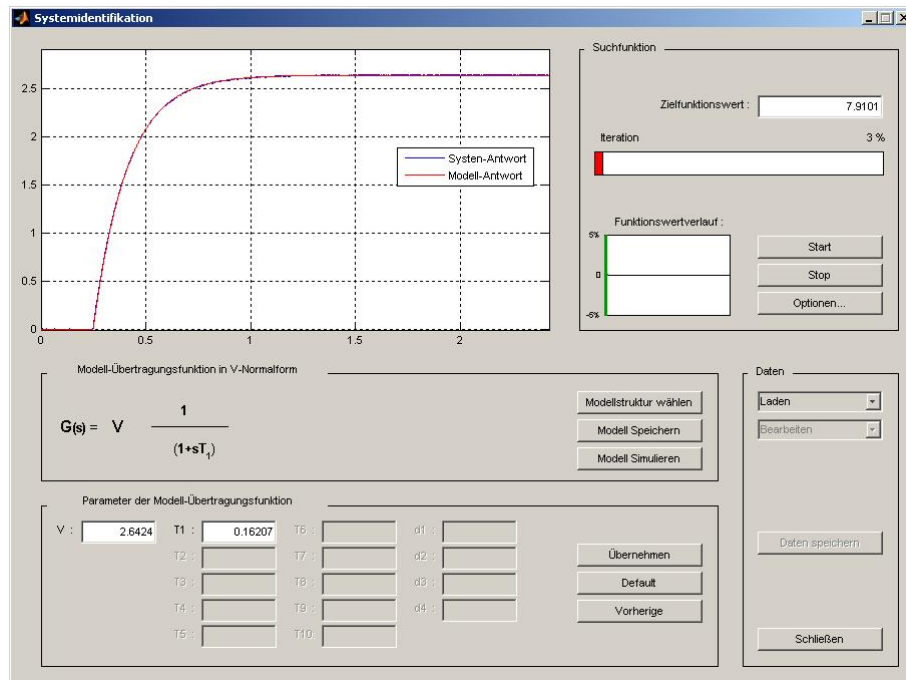


Abbildung 9: erster Ausschnitt Übertragungsfunktion mit Störung

[Perkowski]

5 Simulation des Steuer- und Störverhaltens der Strecke

Zur Überprüfung der Modellierung mit Simulink wird mit Stelleinrichtung, Strecke, Messeinrichtung sowie Erregungssignale, wie im Kapitel drei und vier gewählt wurden, durchgeführt. Das simulierte System wird in den Arbeitspunkt erregt, und dann zusätzlich mit der Störung zuge-
schaltet. So konnten wir das Verhalten der Strecke mit der Störung analysieren.

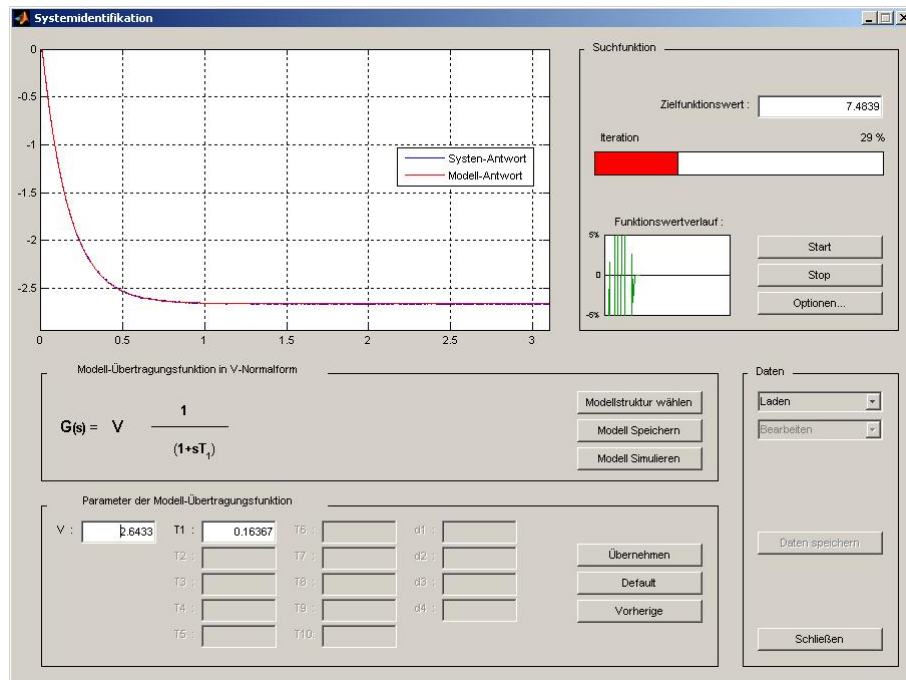


Abbildung 10: zweiter Ausschnitt Übertragungsfunktion mit Störung

[Burde]

6 Entwurf des Reglers

Nachdem nun die Strecke zunächst identifiziert und anschließend das Steuer- und Störverhalten simuliert wurde, soll nun der passende Regler entworfen werden. Der Regler hat dabei folgende Aufgaben: Er soll dafür sorgen, dass die Regelgeschwindigkeit des Regelkreises möglichst hoch wird, also eine möglichst kleine Anstiegszeit t_r besitzt und er soll bleibende Regelabweichungen verhindern, also eine hohe Regelgenauigkeit vorweisen.

Die Entscheidung fällt zunächst einmal auf einen PI-Regler. Der P-Anteil sorgt für eine hohe Regelgeschwindigkeit und kompensiert somit die Trägheit des I-Anteils. Gleichzeitig sorgt jedoch der I-Anteil dafür, dass die durch den P-Anteil entstehende bleibende Regelabweichung entfernt wird.

Um den Verstärkungsfaktor V und die Reglerzeitkonstante T optimal bestimmen zu können, wird als Entwurfsverfahren das Polkompensationsverfahren gewählt. Wie der Name schon aussagt, lassen sich bei diesem Verfahren Verzögerungsglieder aus der Strecke bzw. Messeinrichtung durch eventuelle Vorhaltglieder aus dem gewählten Regler kompensieren. Verzögerungsglieder sorgen meist für ein langsames Ausregeln von Störgrößen und sind daher unerwünscht. Die nachfolgenden Übertragungsfunktionen vom PI-Regler sowie von der Strecke zeigen das markierte Vorhaltglied des Reglers, welches das markierte Verzögerungsglied der Strecke kompensieren soll.

$$G_R(s) = \frac{V * (1 + Ts)}{s}$$

$$G_S(s) = \frac{1,03}{(1 + 0,003365s) * (1 + 0,1864s) * (1 + 2 * 0,98029s + (0,091032s)^2)}$$

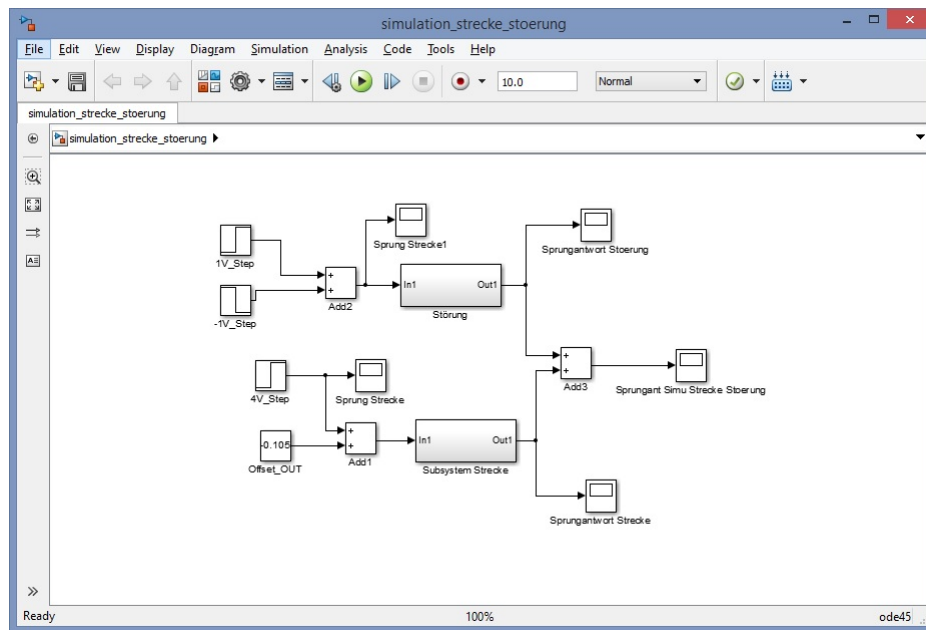


Abbildung 11: Simulink Simulationstrecke mit Störung

Die Zählerzeitkonstante des PI-Reglers beträgt also $T = 0,1864[sek]$. Um den Verstärkungsfaktor des Reglers zu bestimmen, muss nun das Bodediagramm des offenen Regelkreises gezeichnet werden. Da der Aufwand dafür recht hoch ist, nutzen wir für das Verfahren der Polkompensation das Matlab-Programm *polkomp*.

Dafür muss zunächst eine maximale Überschwingweite M_P gewählt werden. Da es dazu in der Aufgabenstellung keine konkrete Vorgabe gibt entscheiden wir uns für den gängigen Wert von 20 Prozent

$$M_p = 0,2$$

Bei einer gewählten Überschwingweite zwischen 0,05 und 0,25 lässt sich mit der Formel (2.3.10a) aus dem Script "Einführung in die Regelungstechnik" der Phasenrand Φ_r berechnen.

$$\Phi_r = 69^\circ - 106^\circ * M_p$$

$$\Phi_r = 69^\circ - 106^\circ * 0,2 = 47,8^\circ$$

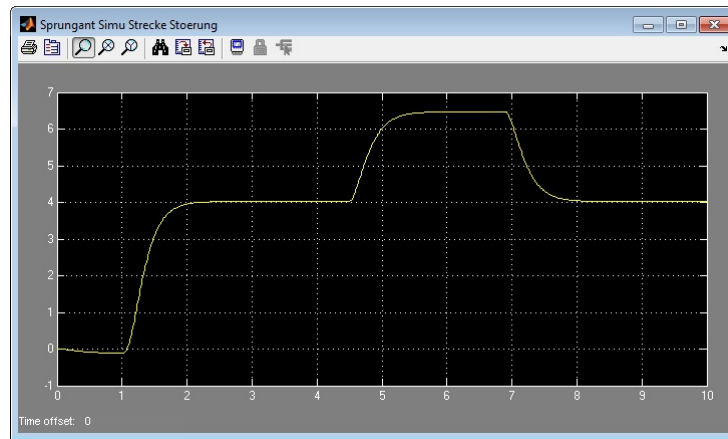


Abbildung 12: Systemantwort Simulationstrecke mit Störung

Das Matlab-Programm *polkomp* zeichnet uns nun das Bodediagramm des offenen Regelkreises mit einem Reglerverstärkungsfaktor von $V_R = 1$.

In Abbildung 6 ist in der Phasenkennlinie bereits der gewünschte Phasenrand von $\Phi_r = 47,8^\circ$ eingezeichnet. Um diesen Phasenrand entstehen zu lassen, muss an dieser Stelle die Betragskennlinie durch die $0dB$ Achse gehen. Das kann in diesem Fall mit einer Anhebung der Betragskennlinie um $13dB$ ermöglicht werden. Wählt man einen Reglerverstärkungsfaktor $V_R > 1$ kann ein Anheben der Betragskennlinie erreicht werden. Mit der Formel (2.3.55) aus dem Script "Einführung in die Regelungstechnik" kann der Reglerverstärkungsfaktor genau berechnet werden. Nachfolgend ist die Ermittlung von V_R per Hand dargestellt.

$$V_R = 10^{\frac{V_{dB}}{20dB}}$$

$$V_R = 10^{\frac{13dB}{20dB}}$$

$$V_R = 4,4668$$

In der folgenden Abbildung werden die Ergebnisse der Ermittlung der Reglerparameter mit dem Matlab-Programm *polkomp* abgebildet.

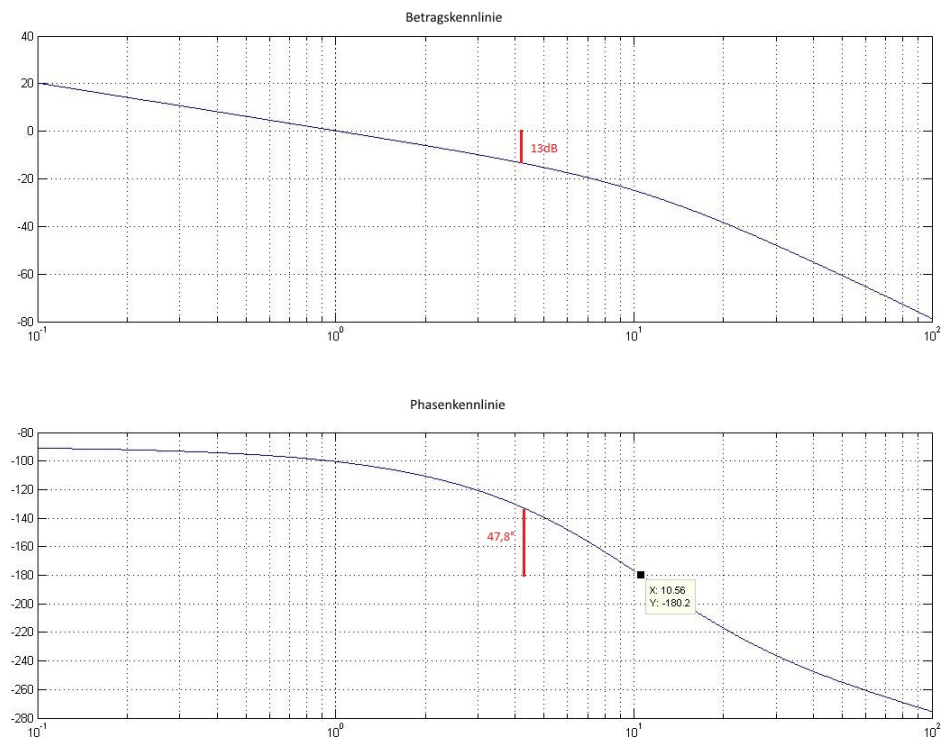


Abbildung 13: Bodediagramm des offenen Regelkreises mit $V_R = 1$

Zu beachten ist hier, dass der per *polkomp* ermittelte Reglerverstärkungsfaktor V_R der gleiche ist, wie der von uns per Hand berechnete Wert. In der nächsten Abbildung wird nun die Führungssprungantwort sowie die Stellgröße des ermittelten Reglers abgebildet.

```

Der optimierte Regler hat folgende Übertragungsfunktion

- Polynomform:

num/den =

0.83262 s + 4.4668
-----
s

- V-Normalform:

G(s) = V *  $\frac{1}{s^k}$  *  $\frac{(1 + T_{1n}s) \dots (1 + 2T_{2n}s + T_{2n}^2s^2) \dots}{(1 + 2T_{1n}s + T_{1n}^2s^2) \dots (1 + 2T_{2n}s + T_{2n}^2s^2) \dots}$ 

Verstärkungsfaktor: V = 4.4668

Globalverhalten: k = 1

Zählerdynamik: Z(s) =

(1 + 0.1864*s)

Nennerdynamik: N(s) =

```

Abbildung 14: Berechnete Reglerdaten mit Hilfe von *polkomp*

Anhand der Führungssprungantwort ist gut zu erkennen, dass die maximal zulässige Überschwingweite M_p von 20 Prozent nicht überschritten wird. Auch eine bleibende Regelabweichung ist nicht zu erkennen. Bei der Anstiegszeit t_r gab es laut Aufgabenstellung zwar keine Vorgaben, es soll aber erwähnt werden, dass diese bei ungefähr $0,35s$ liegt. In dem nächsten Kapitel soll der ermittelte Regler nun in eine Simulation der Strecke integriert und das Regelverhalten erstmals getestet werden.

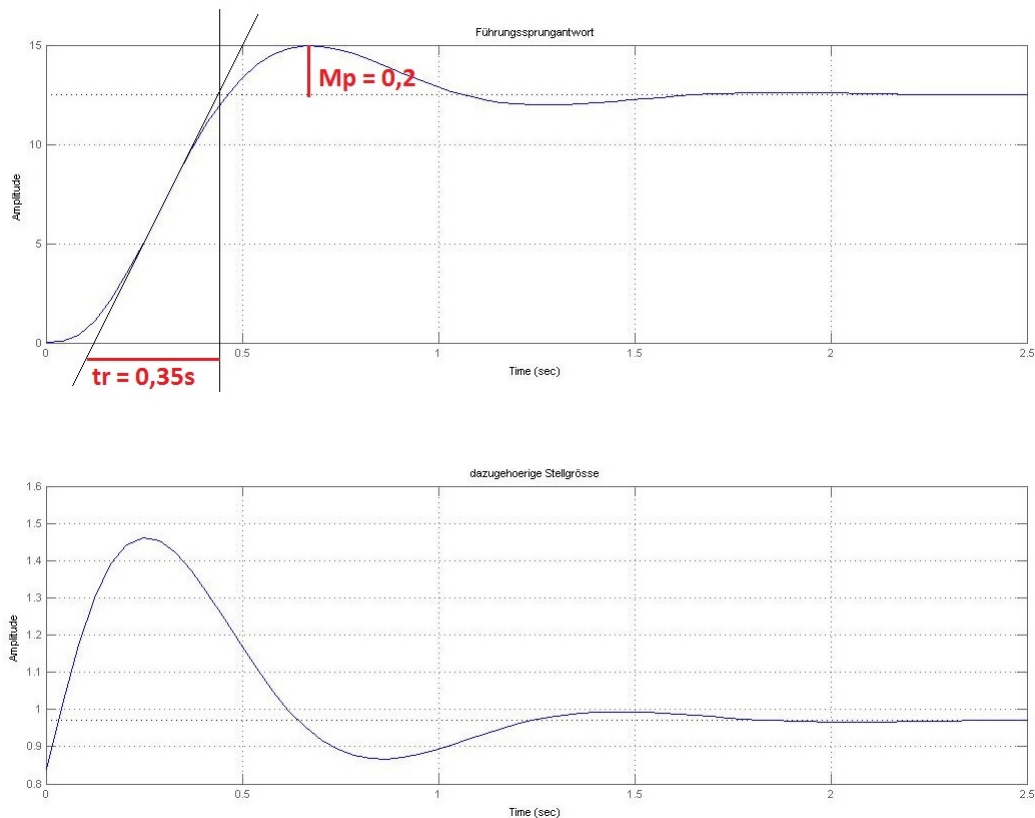


Abbildung 15: Führungssprungantwort und Stellgröße des ermittelten PI-Reglers

[Burde]

7 Simulation des Regelkreises mit dem entworfenen Regler

Der entworfene PI-Regler soll nun in einer Simulation des Regelkreises getestet werden. Dabei sollen folgende Punkte betrachtet werden:

- Aussteuerbereich der Stellgröße
- Führungsverhalten
- Störverhalten

Dazu wird nun ein Simulink Modell erstellt, in welchem die komplette Regelstrecke als Modell nachgebaut wird.

Die Strecke, der Regler sowie die Störung sind jeweils in Subsysteme untergebracht. Nachdem die Strecke mit einem 4V Sprung in den Arbeitsbereich gebracht wird, folgt nach der 4,5 Sekunde eine Störung, die nach der 9 Sekunde wieder ausgeschaltet wird. In Abbildung 10 ist nun die Störung, die Stellgröße sowie die Sprungantwort des Regelkreises dargestellt.

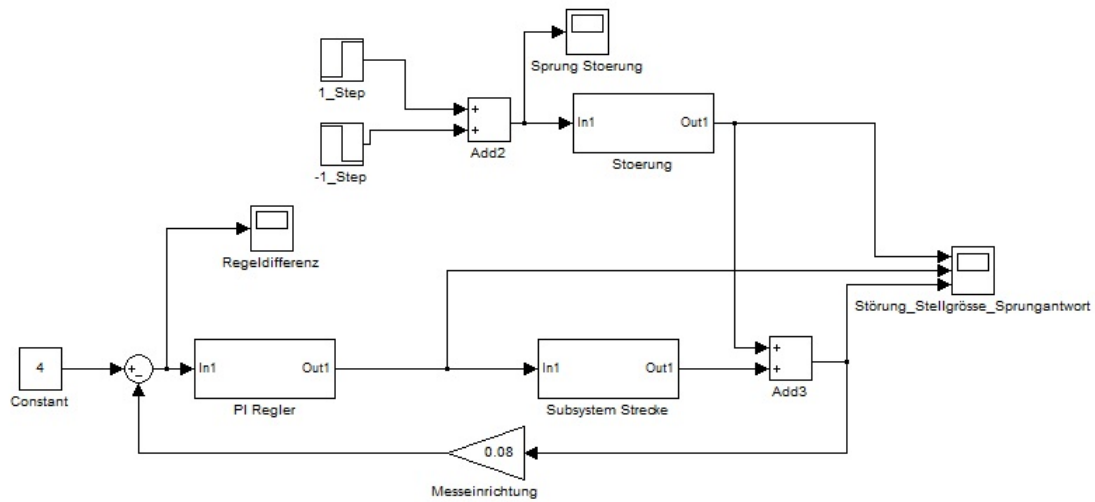


Abbildung 16: Simulink Modell des Regelkreises

Anhand der Abbildung lassen sich einige Schlussfolgerungen zum Regelkreis aufstellen. Die Stellgröße übersteuert nicht und bleibt im Bereich zwischen 0V und 10V. Anhand der Sprungantwort lässt sich feststellen, dass die maximal erlaubte Überschwingweite von 20 Prozent nicht überschritten wird. Diese liegt hier beim Einschaltvorgang bei 10 Bar. Erlaubt wären maximal 12 Bar. Auch eine bleibende Regelabweichung lässt sich in der Sprungantwort nicht ermitteln. Somit kann im nächsten Kapitel die Implementierung des Reglers in die reale Strecke vorgenommen werden.

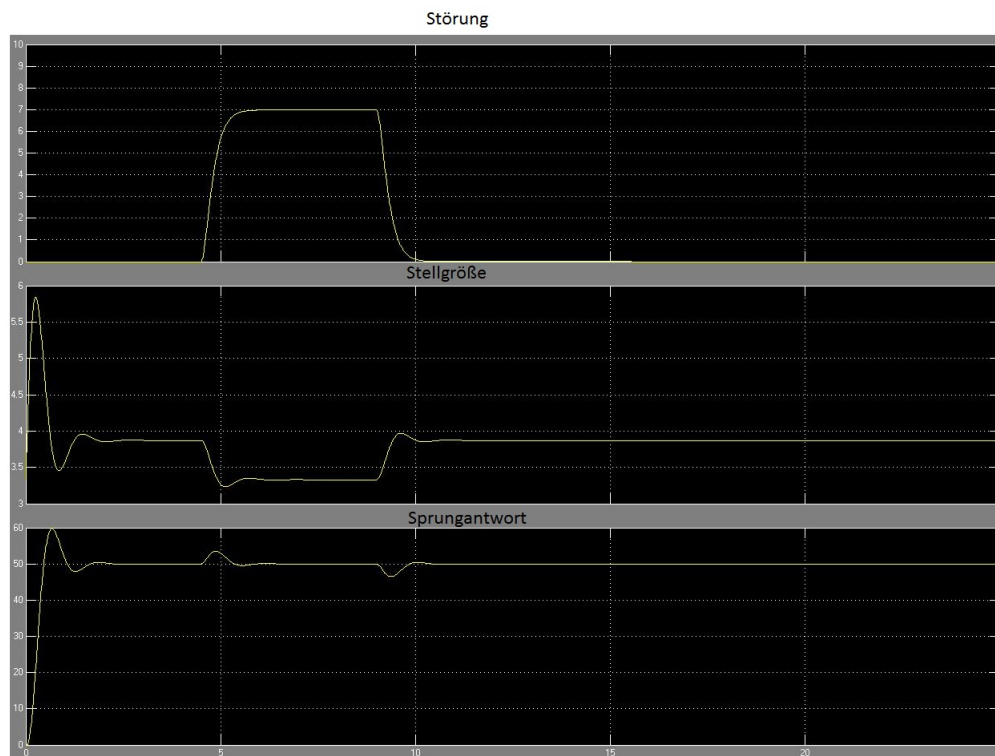


Abbildung 17: Störung, Stellgröße und Sprungantwort des Regelkreises mit Regler

[Burde]

8 Implementierung des Reglers in den realen Regelkreis

Der kontinuierliche Regler wird nun in den realen Regelkreis implementiert. Dies wird mit Hilfe einer im PC eingebauten A/D Wandlerkarte sowie dem Realtimeworkshop realisiert. Der Regler ist dabei noch immer in einem Modell in Simulink untergebracht. Das Simulink Modell wird in Abbildung 11 dargestellt.

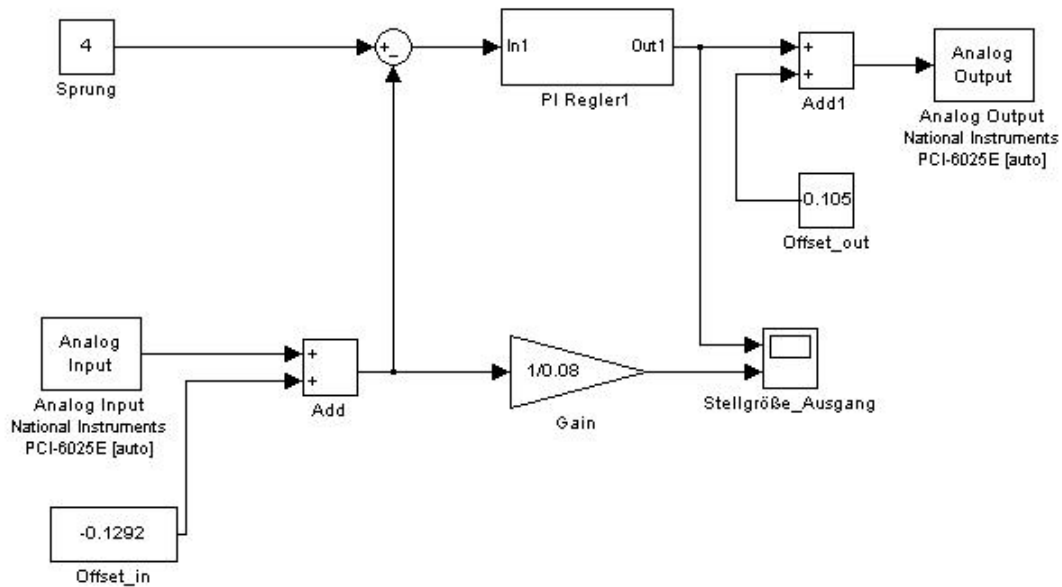


Abbildung 18: Der Regler im Simulink Modell mit Softwareschnittstellen zur A/D Wandlerkarte

In der Abbildung 12 ist nun die Stellgröße und die Regelgröße des realen Regelkreises dargestellt. Die Störung wird nach ca. 6,9 Sekunden eingeschaltet und nach ca. 13 Sekunden wieder ausgeschaltet.

Aus den Diagrammen aus Abbildung 12 lassen sich einige positive Schlussfolgerungen ziehen. Der Regler regelt die Störgrößen im realen Regelkreis schnell aus, ohne dabei die Stellgröße auf über 10V zu übersteuern und ohne die Überschwingweite M_p prägnant zu überschreiten. Zudem gibt es keine bleibende Regelabweichung.



Abbildung 19: Messungen der Regelung in der realen Strecke

Abbildungsverzeichnis

1	Elektrische simulierte Druckregelstrecke	ii
2	Elektrische simulierte Druckregelstrecke mit Standard-Regelkreis	2
3	Ausgangssignal, Erregung des Systems	4
4	Eingangssignal, Antwort des Systems	4
5	Statische Kennlinie, Ausgang $y(t)/V$, Eingang $u(t)/V$	5
6	Tool <i>sis_id</i> für Identifikation der Strecke	6
7	Strecke mit Störung	8
8	erster Ausschnitt Übertragungsfunktion mit Störung	8
9	zweiter Ausschnitt Übertragungsfunktion mit Störung	9
10	Simulink Simulationstrecke mit Störung	10
11	Systemantwort Simulationstrecke mit Störung	11
12	Bodediagramm des offenen Regelkreises mit $V_R = 1$	12
13	Berechnete Reglerdaten mit Hilfe von <i>polkomp</i>	13
14	Führungssprungantwort und Stellgröße des ermittelten PI-Reglers	14
15	Simulink Modell des Regelkreises	15
16	Störung, Stellgröße und Sprungantwort des Regelkreises mit Regler	16
17	Der Regler im Simulink Modell mit Softwareschnittstellen zur A/D Wandlerkarte	17
18	Messungen der Regelung in der realen Strecke	18

Literatur

- [1] R. S. Manfred Ottens, *Rapid Control Prototyping (Schneller Reglerprototypen-Entwurf)*, 2010.
 - [2] M. Ottens, *Grundlagen der Systemtheorie*, 2008.
-