



Fachgebiet
Simulation und Optimale Prozesse



TECHNISCHE UNIVERSITÄT
ILMENAU

Fakultät für Informatik und
Automatisierung
Institut für Automatisierungs-
und Systemtechnik

Praktikum

Versuch AS-G39

Analyse und Reglerentwurf an der Luftstrom- und Temperaturregelstrecke LTR701

Verantwortlicher Hochschullehrer: Prof. Dr.-Ing. habil. P. Li

Versuchsverantwortlicher: Dr.-Ing. S. Hopfgarten

Name, Vorname	Matrikel-Nr.
Mitarbeiter	
Datum, Note, Unterschrift	

1 Versuchsziel

Am Beispiel des Laboraufbaus „Luftstrom- und Temperaturregelstrecke LTR701“ sollen nach einer experimentellen Aufnahme von Daten das Streckenverhalten identifiziert, Approximationen des Streckenverhaltens vorgenommen sowie einschleifige Regelungen und eine Kaskadenregelung bemessen und hinsichtlich Führungs- und Störverhalten untersucht werden.

2 Hinweise zur Erarbeitung der theoretischen Grundlagen

Die Identifikation kontinuierlicher Prozesse kann durch Auswertung von Antwortfunktionen (Sprungantwort, Impulsantwort) als Reaktion auf die entsprechenden Streckeneingangssignale vorgenommen werden. Diese Antwortfunktionen werden durch die Datenaufzeichnung bei Experimenten gewonnen. Oft wird Streckenverhalten höherer Ordnung durch solches niedriger Ordnung, unter Umständen auch unter Einbeziehung von Totzeiten, approximiert. Die sich anschließende Reglerbemessung zum Betrieb der Regelstrecke in einem geschlossenen Regelkreis kann zum einen grob nach Einstellregeln (Ziegler und Nichols; Chien, Hrones und Reswick) vorgenommen werden. Andererseits sind auch Prinzipien der Pol-Nullstellen-Kompensation zwischen Streckenpolen und Reglernullstellen sowie andere Bemessungsverfahren (z. B. anhand von Integralkriterien (quadratische Regelfläche)) anwendbar. Die Beschreibung findet sich in der im Literaturverzeichnis angegebenen regelungstechnischen Literatur.

Regler		0 % Überschwingen		20 % Überschwingen	
		Führung	Störung	Führung	Störung
P	$\frac{K_R K_S}{T_a}$ T_t	0.3	0.3	0.7	0.7
PI	$\frac{K_R K_S}{T_a}$ T_N	0.35	0.6	0.6	0.7
		$1.2T_a$	$4T_t$	$1T_a$	$2.3T_t$
PID	$\frac{K_R K_S}{T_a}$ T_N	0.6	0.95	0.95	1.2
		$1T_a$	$2.4T_t$	$1.35T_a$	$2T_t$
	$\frac{T_V}{T_t}$	0.5	0.42	0.47	0.42

Tabelle 1: Einstellregeln nach Chien, Hrones und Reswick

Notation der PID-Regler-Übertragungsfunktion: $G(s) = K_R \left(1 + \frac{1}{sT_N} + sT_V \right)$ (K_R - Reglerverstärkung, T_N - Nachstellzeit, T_V - Vorhaltzeit, K_S - Streckenverstärkung, T_t - Streckentotzeit, T_a - Zeitkonstante, zur Wendetangente gehörig).

3 Versuchseinrichtung

Zum Versuchsaufbau gehören die folgenden Geräte: Luftstrom- und Temperaturregelstrecke LTR701 (siehe Abb. 1, PC mit Schnittstellenkarte, Drucker. Die Regelstrecke besteht aus einem horizontal angeordnetem zylindrischen Rohr, das von Luft von links nach rechts durchströmt wird. Der Luftstrom wird durch einen Ventilator über das vertikal angeordnete Rohrstück angesaugt und kann zusätzlich durch die Stellung einer Drosselklappe beeinflusst werden. Eine Heizung kann den Luftstrom erwärmen. Fünf analoge Größen sind messbar (zwei Temperaturen



Abbildung 1: Luftstrom- und Temperaturregelstrecke LTR701 (Bildquelle: www.amira.de)

(Messstellen 2 und 3), Druck, Drosselklappenstellung, Durchfluss (optional)). Die Strecke wird durch drei Eingangsgrößen (Spannung am Motor des Ventilators, Spannung an der Heizung, Winkelstellung der Drosselklappe) beeinflusst. Alle Mess- und Stellsignale werden als Einheitsspannungssignale im Bereich [0 V, 10 V] benutzt. Nach Einschalten des Gerätes (Einschalter seitlich rechts) ist die < Enter >-Taste rechts neben der LCD-Anzeige zu betätigen.

Sowohl ein manueller als auch ein automatischer Betrieb (mittels industrieller Regler oder angeschlossenem PC mit entsprechender Schnittstelle) sind möglich. Eine Anzeige am Gerät gestattet die Ablesung vom Messwerten.

Die mitgelieferte Software dient zur Kommunikation zwischen PC, Regelstrecke und Nutzer. Innerhalb der Software sind realisiert:

- Steuerung in offener Kette
- Einschleifiger Temperaturregelkreis mit Beeinflussung durch die Heizleistung
- Einschleifiger Temperaturregelkreis mit Beeinflussung durch die Ventilator Drehzahl
- Einschleifiger Druckregelkreis mit Beeinflussung durch die Ventilator Drehzahl
- Kaskadenregelung (Hauptregelgröße: Temperatur, Hilfsregelgröße: Druck)

Außerdem kann das System auch durch MATLAB[®]/Simulink[®]¹ unter Nutzung des Real-Time Windows TargetTM angesteuert werden. Zwischen LTR701-System und PC sind Daten übertragbar.

! Achtung ! – Sicherheitshinweise:

1. Die Heizung darf erst zugeschaltet werden, wenn mindestens 10 % der maximalen Ventilator Drehzahl eingestellt sind! Im Falle einer Überhitzung, die in der Anzeige ersichtlich ist, kann das System durch Betätigen der „Reset“-Taste neben der Anzeige am Gerät zurückgesetzt werden.
2. Bitte das zylindrische Rohr wegen evtl. höherer Temperaturen nicht berühren! (Siehe auch Warnschild am Versuchsaufbau.)

¹MATLAB[®] und Simulink[®] sind eingetragene Warenzeichen der The Mathworks Inc.

4 Vorbereitungsaufgaben

4.1 Identifikation von Regelstreckenverhalten

- Ermitteln Sie Struktur und Parameter der Übertragungsfunktion der Systeme, deren Sprungantworten als Reaktion jeweils auf einen Einheitsprung abgebildet sind (Abb. 2 - 4)! Nachdem Sie im dritten Fall c) eine Approximation Ihrer Wahl vorgenommen haben, nähern Sie das Übertragungsverhalten durch ein PT_1T_t -Verhalten an (Proportional-, Trägheits- (1. Ordnung) und Totzeitverhalten)!

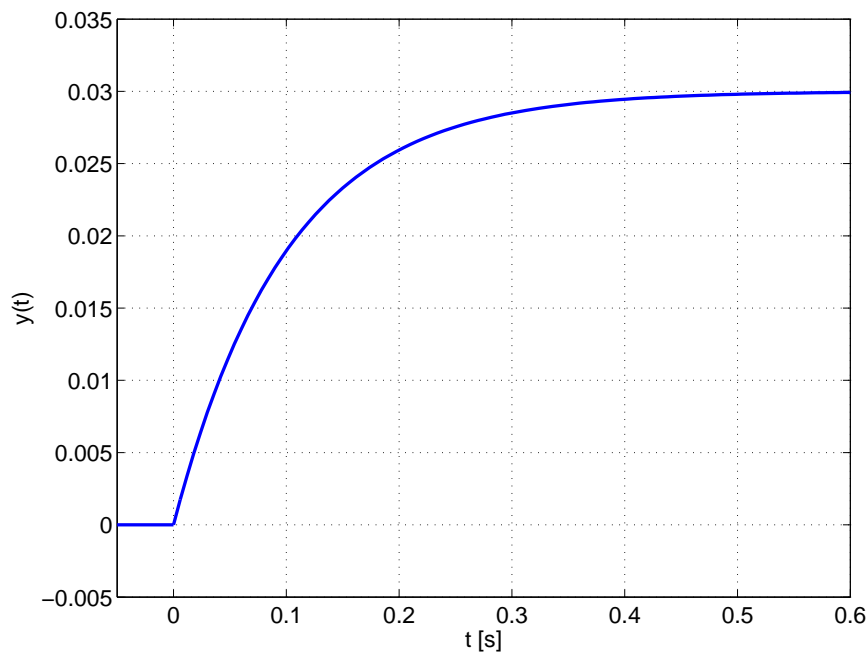


Abbildung 2: a) Sprungantwort, System 1

4.2 Blockschaltbildanalyse, Reglerbemessung

Das Blockschaltbild (siehe Abb. 5) zeigt das Ergebnis der Regelstreckenanalyse hinsichtlich des Zusammenwirkens der Übertragungsglieder. u_M und u_H sind die Steuergrößen (Stellgrößen) Spannung des Ventilatormotors und Spannung für die Heizung. Der Winkel φ gibt die Stellung der Drosselklappe an, ist manuell einstellbar und dient als Störgröße. Die Ausgangsgrößen, die durch entsprechende Sensoren erfasst werden, sind der Druck p und die Lufttemperatur im horizontalen Rohr ϑ . Der gemessene Druck wird zusätzlich durch ein Verzögerungsglied erster Ordnung (VZ1) gefiltert.

- Stellen Sie die Teilübertragungsfunktionen der Regelstrecke als Funktionen der jeweiligen Ein- und Ausgangssignale auf!
- Wie bestimmen Sie die Übertragungsfunktion $G_2(s)$, wenn u_M und/oder φ definiert einstellbar und ϑ messbar sind?

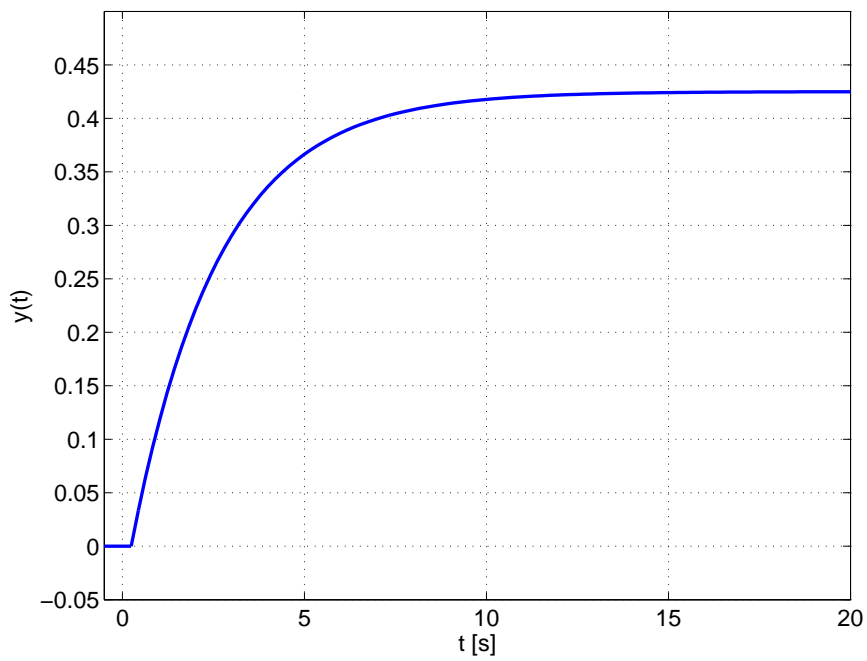


Abbildung 3: b) Sprungantwort, System 2

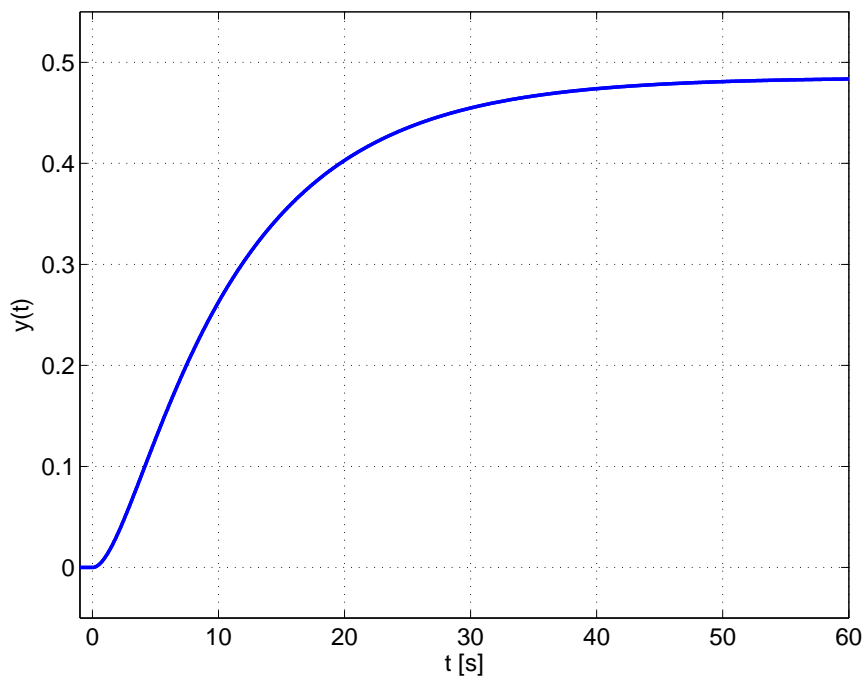


Abbildung 4: c) Sprungantwort, System 3

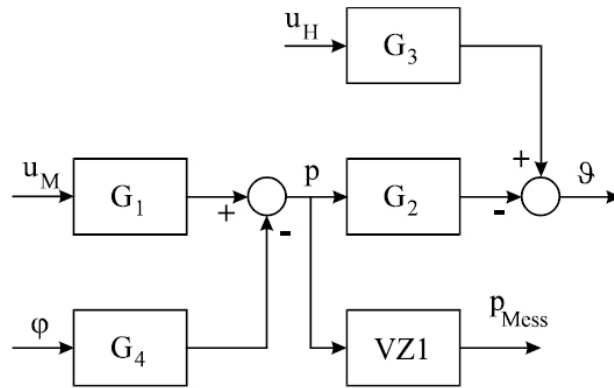


Abbildung 5: Blockschaltbild der Regelstrecke

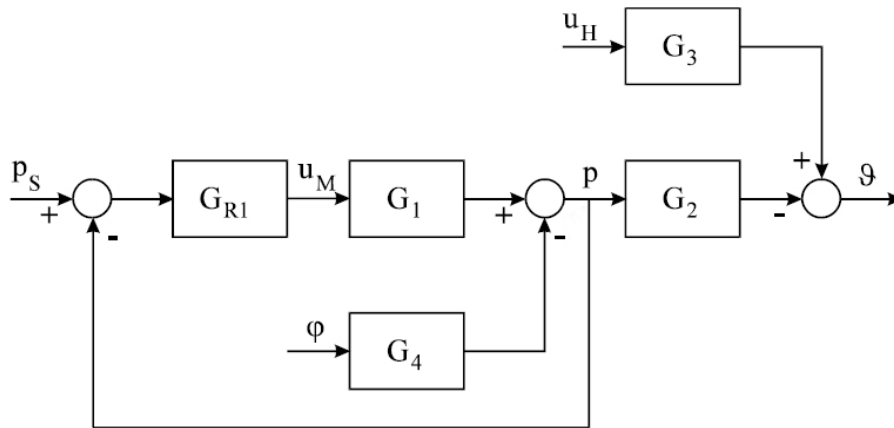


Abbildung 6: Blockschaltbild 2

- c) Diskutieren Sie die theoretischen Grundlagen und Eigenschaften des P-, PI- und PID-Reglers im Zusammenhang mit dem Regelentwurf im einschleifigen Regelkreis und in der Kaskadenregelung!

In welchen Fällen setzt man eine Kaskadenregelungsstruktur ein?

- d) Beschreiben Sie die Voraussetzungen und die Anwendungssituationen der Einstellregeln nach Ziegler und Nichols sowie nach Chien, Hrones und Reswick!
- e) Beschreiben Sie die Blockschaltbilder 2 - 4 (Abb. 6 - 8) und stellen Sie jeweils die Führungsübertragungsfunktion auf!

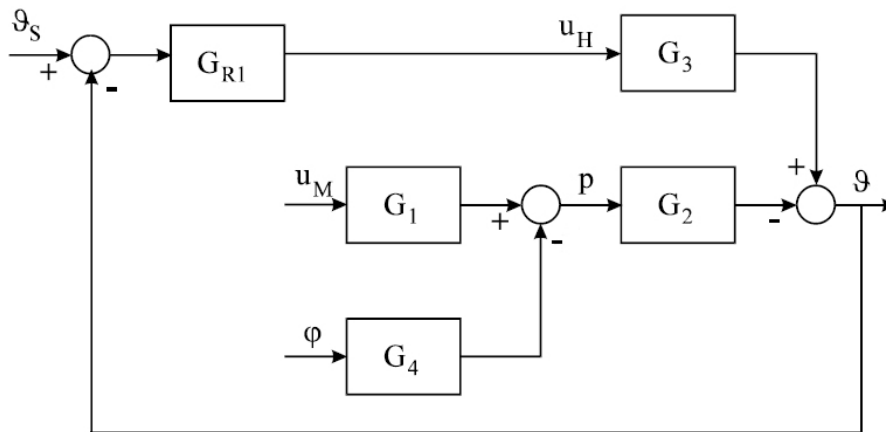


Abbildung 7: Blockschaltbild 3

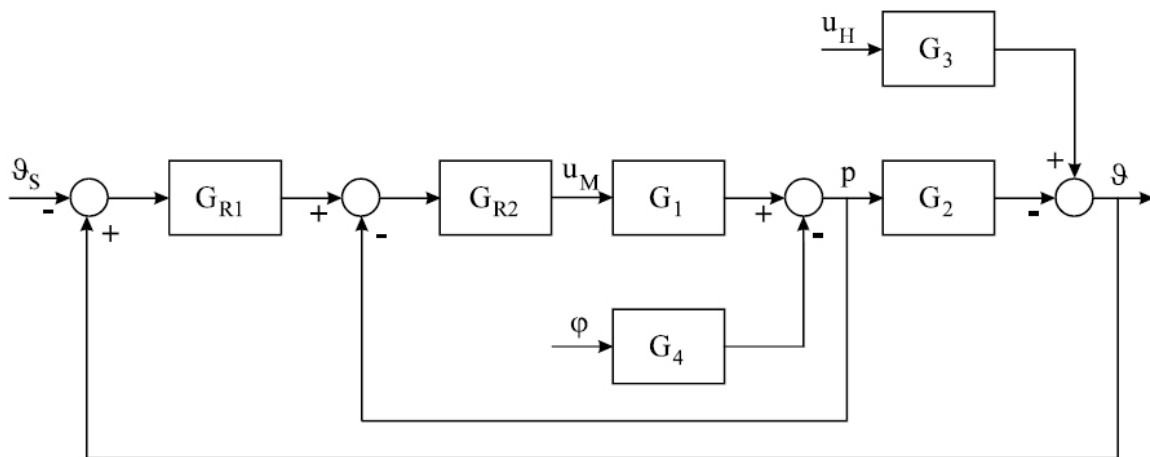


Abbildung 8: Blockschaltbild 4

5 Versuchsdurchführung

5.1 Experimentelle Arbeitspunktbestimmung und Sprungantwortaufnahme

5.1 Bestimmen Sie experimentell Arbeitspunkte und Sprungantworten, jeweils für die einschleifige Druck- und Temperaturregelung! Das System wird in den Arbeitspunkt gebracht und sofort im Anschluss eine Sprungantwort aufgenommen. Starten Sie MATLAB®! Benutzen Sie dazu das Simulink®-Modell `ltr_io_pressure.mdl` bzw. `ltr_io_temperature.mdl`! Nachdem Sie die Einstellungen unter a), b) und c) überprüft bzw. geändert haben (Doppelklick auf den Block `u_M` bzw. `u_H`), muss

- das jeweilige Simulink®-Modell in einen echtzeitfähigen Code umgewandelt werden, entweder durch die Tastenkombination `< Strg >+< B >` oder über das Menü „Tools/Real-Time Workshop/Build Model“ (die erfolgreiche Umwandlung erkennen Sie an der abschließenden Ausschrift im Kommando-Fenster „Successful completion ...“),
- eine Verbindung zum Code hergestellt werden, entweder durch die Tastenkombination `< Strg >+< T >` oder über das Menü „Simulation/Connect to Target“ (korrekt bei Ausschrift „Model ... loaded“),
- der Betrieb des LTR701-Systems gestartet werden im Menü „Simulation/Start Real-Time Code“.

Drucken Sie den Druck- bzw. Temperaturverlauf (Fenster „Pressure“ bzw. „Temperature“ aus und diskutieren Sie anschließend alle Ergebnisse!

- a) Druckregelung: Arbeitspunktwerte der Steuergrößen, Sprungamplitude, Zeit (in Sekunden) $t \in [0, 30]$
- * $u_{M,0} = 50$ (50 % der maximalen Ventilatorumdrehzahl)
 - * $u_{H,0} = 30$ (30 % der maximalen Heizleistung)
 - * $\Delta u_0 = +10$ (Erhöhung der Ventilatorumdrehzahl um 10 % der maximalen Ventilatorumdrehzahl nach 15 s; Versuchsdauer: 30 s,
 $u(t) = \Delta u_0 \cdot \sigma(t)$, $\sigma(t)$ - Einheitssprungfunktion)
 - * $\varphi = 0$ (Markierung horizontal)
- b) Wiederholen Sie das Experiment nach 5.1.a) mit folgenden Einstellungen und stellen Sie Gemeinsamkeiten und Unterschiede zum vorhergehenden Experiment heraus!
Druckregelung: Arbeitspunktwerte der Steuergrößen, Sprungamplitude, Zeit (in Sekunden) $t \in [0, 30]$
- * $u_{M,0} = 60$ (60 % der maximalen Ventilatorumdrehzahl)
 - * $u_{H,0} = 30$ (30 % der maximalen Heizleistung)
 - * $\Delta u_0 = +10$ (Erhöhung der Ventilatorumdrehzahl um 10 % der maximalen Ventilatorumdrehzahl nach 15 s; Versuchsdauer: 30 s,
 $u(t) = \Delta u_0 \cdot \sigma(t)$, $\sigma(t)$ - Einheitssprungfunktion)
 - * $\varphi = 0$ (Markierung horizontal)
- c) Temperaturregelung: Arbeitspunktwerte der Steuergrößen, Sprungamplitude, Zeit (in Sekunden) $t \in [0, 800]$
- * $u_{M,0} = 50$ (50 % der maximalen Ventilatorumdrehzahl)

- * $u_{H,0} = 30$ (30 % der maximalen Heizleistung)
- * $\Delta u_0 = +10$ (Erhöhung der Heizleistung um 5 % der maximalen Heizleistung nach 600 s; Versuchsdauer: 1.200 s
 $u(t) = \Delta u_0 \cdot \sigma(t)$, $\sigma(t)$ - Einheitssprungfunktion)
- * $\varphi = 0$ (Markierung horizontal)

5.2 Aufstellen von Übertragungsfunktionen

Identifizieren Sie die Übertragungsfunktion ...

- a) $G_1(s)$ anhand der Sprungantwort für die Druckregelstrecke (5.1. a)),
- b) $G_1(s)$ anhand der Sprungantwort für die Druckregelstrecke (5.1. b)),
- c) $G_3(s)$ anhand der Sprungantwort für die Temperaturregelstrecke (5.1. c))!
- d) Aus früheren Experimenten sei die Übertragungsfunktion $G(s)$ bekannt. Bestimmen Sie $G_2(s)$ ($\varphi = 0$)! $G(s) = \frac{\Theta(s)}{U_M(s)} = \frac{0.206}{5s^2+13s+1}e^{-1s}$.

5.3 Reglerentwurf, Führungs- und Störverhalten

Entwerfen Sie entsprechend den Einstellregeln von Chien, Hrones und Reswick für eine relative Überschwingweite des Führungsübergangsvorgangs von $\Delta h = 20$ %

- a) einen PI-Regler für die Druckregelung nach Abb. 6,
 - wenden Sie die Reglerparameter (Parameters/PI-Controller/Pressure Control; Achtung: Eingabe von Dezimalwerten mit Komma als Dezimaltrennzeichen!) in der LTR701-Software an und starten Sie die Regelung (Run/Pressure Control) (alle Einstellungen (Drucksollwert, Vorgabewert für Heizung und Drosselklappe) noch 0 %),
 - bereiten Sie die Aufzeichnung der Messwerte vor (Run/Measuring; Total time: 60 s, Trigger Value: 1.0, Prestore: 0.0, trigger slope: positive; Trigger channel: fan [%]),
 - geben Sie den Sollwert für die Druckregelung vor (Run/Adjust Set Point; Set point signal for pressure: Offset: 100.0, Amplitude: 10.0, Period: 30 s; Shape of signal: Square)! Die Regelung startet danach automatisch. Beenden Sie die Regelung nach Ablauf der vorgegebenen Zeit (Run/Stop controller)!
 - Bewerten Sie das Regelkreisverhalten anhand der üblichen Kennwerte des dynamischen Verhaltens (T_m , $T_{\varepsilon\%}$, e_B (bzw. e_∞))!
 - Wiederholen Sie den Regelungsvorgang mit veränderten Einstellungen! Realisieren Sie, nachdem die Regelgröße ihren Sollwert angenommen hat, eine Störung durch Verstellen des Drosselklappenwinkels auf 90 °!
- b) einen PID-Regler für die Temperaturregelung (Nutzung der Messstelle 3) nach Abb. 7,
 - wenden Sie die Reglerparameter (Parameters/PID-Controller/Temperature Control/...Sensor 3) in der LTR701-Software an (Run/Temperature Control/Temperature Control PID) (alle Einstellungen Temperatursollwert, Vorgabewert für Ventilator und Drosselklappe) noch 0 %),

bereiten Sie die Aufzeichnung der Messwerte vor (Run/Measuring; Total time: 60 s, Trigger Value: 1.0, Prestore: 0.0, trigger slope: positive; Trigger channel: heating [%]) und

geben Sie den Sollwert für die Temperaturregelung vor (Run/Adjust Set Point; Control signal for fan actuator: Offset: 0.0, Amplitude: 72.0, Period: 20 s; Shape of signal: Constant; Set point signal for temperature: Offset: 0.0, Amplitude: 50.0, Period: 20 s; Shape of signal: Constant)! Die Regelung startet danach automatisch. Beenden Sie die Regelung nach Ablauf der vorgegebenen Zeit (Run/Stop controller)!

Bewerten Sie das Regelkreisverhalten anhand der üblichen Kennwerte des dynamischen Verhaltens!

Wiederholen Sie den Regelungsvorgang! Realisieren Sie, nachdem die Regelgröße ihren Sollwert angenommen hat, eine Störung durch Verstellen des Drosselklappenwinkels auf 90° !

- c) geeignet Hilfs- G_{R_1} und Hauptregler G_{R_2} der Kaskadenregelung nach Abb. 8,

wenden Sie die Reglerparameter (Parameters/P-Controller/Cascaded Pressure Control, Constant Heating) bzw. (Parameters/PI-Controller/Cascaded Pressure Control, Constant Heating) in der LTR701-Software an (Run/Temperature Control/Cascaded Pressure Control, Constant Heating) (alle Einstellungen Temperatursollwert, Vorgabewert für Heizung und Drosselklappe) noch 0 %),

bereiten Sie die Aufzeichnung der Messwerte vor (Run/Measuring; Total time: 60 s, Trigger Value: 1.0, Prestore: 0.0, trigger slope: positive; Trigger channel: heating [%]) und

geben Sie den Sollwert für die Temperaturregelung vor (Run/Adjust Set Point; Set point signal for temperature: Offset: 50.0, Amplitude: 0.0, Period: 20 s; Shape of signal: Constant; Control signal for heating actuator: Offset: 20.0, Amplitude: 0.0, Period: 20 s; Shape of signal: Constant)! Die Regelung startet danach automatisch. Beenden Sie die Regelung nach Ablauf der vorgegebenen Zeit (Run/Stop controller)!

Bewerten Sie das Regelkreisverhalten anhand der üblichen Kennwerte des dynamischen Verhaltens!

Wiederholen Sie den Regelungsvorgang unter Störeinfluss und beurteilen Sie die Kaskadenregelung in diesem Fall!

Literatur

- [1] {J. Reger, C. Ament, P. Li}. *Vorlesung Regelungs- und Systemtechnik 1 + 2*. TU Ilmenau.
- [2] O. Föllinger. *Regelungstechnik*, Hüthig, 1994
- [3] J. Lunze. *Regelungstechnik 1*. 5. Auflage, Springer, 2006
- [4] K. Reinisch. *Analyse und Synthese kontinuierlicher Regelungs- und Steuerungssysteme*. 3. Auflage, Verlag Technik, 1996
- [5] H. Unbehauen. *Regelungstechnik I*. 15. Auflage, Vieweg+Teubner, 2008
- [6] *MATLAB – The Language of Technical Computing*, The MathWorks, Inc., Natick, Massachusetts, 2000
- [7] Fa. ELWE. *Bedienungsanleitung – LTR701 Luftmengen- und Temperaturregelstrecke mit Aktoren und Sensoren*. ELWE-Lehrsysteme GmbH. Cremlingen/Schandelah. 2002