

Versuch:

Behälterfüllstandsregelung

1. Versuchsziel

Dieser Versuch soll Ihnen Möglichkeiten und praktische Grenzen der Anwendung grundlegender Reglertypen (P-, PI-, PID-Regler) an einer einfachen Regelstrecke (Füllstand) aufzeigen.

2. Versuchsaufbau

Der Versuchsaufbau besteht aus dem elektronischen Simulationsmodell „Füllstandsstrecke“ (Siemens - sh. Abbildung 2-1) sowie einem PC, an dessen USB-Schnittstelle die Box „Profi-Cassy“ (Leybold Didactic) (als Interface zum Simulationsmodell) angeschlossen ist.

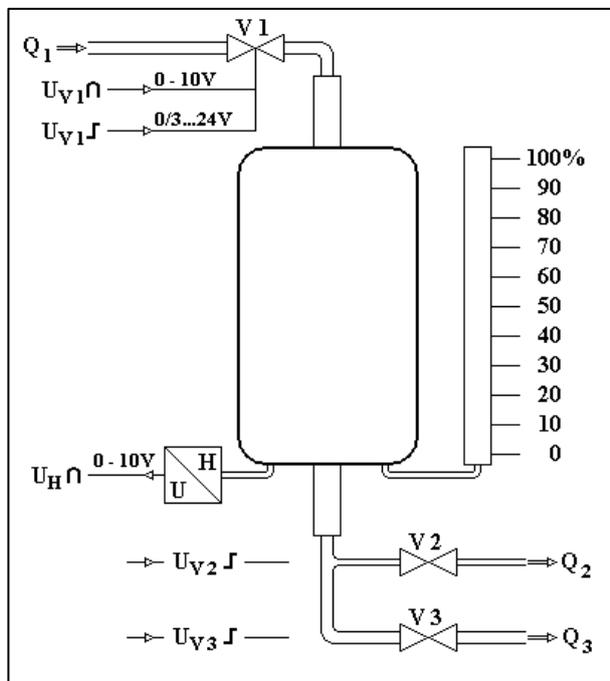


Abbildung 2-1: Regelstreckenmodell

Die Zulaufmenge in den Behälter kann über das Ventil V1 entweder stetig (Eingang U_{V1}) oder unstetig (Eingang U_{V2}) eingestellt werden. Bei stetiger Einstellung ist die Zulaufmenge in den Behälter proportional zur angelegten Spannung (0..10V). Bei unstetiger Einstellung wird das Ventil V1 nur „AUF“- oder „ZU“-gesteuert; eine festgelegte Zulaufmenge pro Zeiteinheit fließt bei „AUF“ in den Behälter.

Die Füllhöhe wird gemessen und von einem Messumformer in eine Spannung U_H (0...10V) linear gewandelt. Eine Ausgangsspannung von $U_H=5V$ entspricht einer Füllhöhe von 50%.

Über die beiden Ventile V2 und V3 kann der Behälter durch Rohre mit unterschiedlichen Querschnitten entleert werden. Die Auslaufgeschwindigkeit ist abhängig von der jeweiligen Füllhöhe; ein durch einen abnehmenden Füllstand geringer werdender statischer Druck bewirkt damit eine Verringerung der Auslaufgeschwindigkeit (*Torricelli'sche* Ausflussgleichung). Folglich zeigt diese Regelstrecke ein Übertragungsverhalten mit Ausgleich.

Der PC übernimmt im Versuch die Funktion eines Reglers mit Führungsgrößengeber, Störgrößengeber und Stellgrößengeber. Wahlweise kann ein P-, PI-, PD- oder ein PID-Regler eingestellt werden. Auf dem Bildschirm des PC können die zeitlichen Verläufe der Regelgröße $x(t)$ und der Führungsgröße $w(t)$ dargestellt und ausgedruckt werden.

Das Führungs- und Störverhalten des Regelkreises soll im Versuch bei Einsatz eines P-, PI- bzw. PID-Reglers untersucht werden.

Diese grundlegenden Reglerarten lassen sich durch Parallelschaltung zu zusammengesetzten Reglernstrukturen (z.B. PID-Regler) kombinieren.

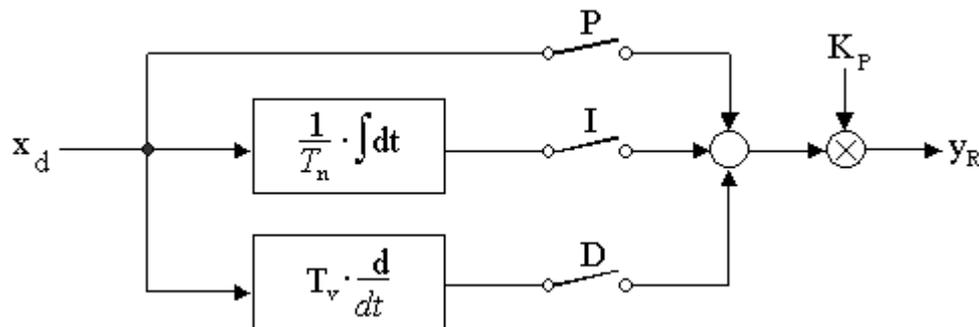


Abbildung 3-2: Struktur eines PID-Reglers

Das Übertragungsverhalten eines solchen zusammengesetzten Reglers ergibt sich durch additive Überlagerung der Übertragungsfunktionen der einzelnen Regler. Beispiel:

- PID-Regler:
$$G_{R_{PID}}(p) = K_P + \frac{K_I}{p} + K_D \cdot p = K_P \cdot \left(1 + \frac{1}{p \cdot T_n} + p \cdot T_v \right)$$

Wird eine Regelstrecke mit Ausgleich (P-T_n-Strecke) durch einen P-Regler geregelt, so stellt sich nach Ablauf der Ausregelzeit ein mehr oder weniger vom Sollwert abweichender stationärer Endwert der Regelgröße ein. Die bleibende Regeldifferenz $x_{d\infty}$ ist wie folgt definiert:

$$x_{d\infty}(t \rightarrow \infty) = w - x$$

Sie stellt sich also nach Ablauf einer „unendlich“ langen Zeit nach einem Eingangssprung als konstanter Wert (mit der Frequenz „0“) ein.

4. Versuchsvorbereitung

- Konkretisieren Sie den Wirkungsplan des geschlossenen Regelkreises (sh. Abbildung 3-1) für den Füllstand! Wodurch werden *Regelstrecke*, *Regelgröße*, *Führungsgröße*, *Stellgröße* und *Stellglied* am Füllstand verkörpert? Benennen Sie mögliche Ursachen für die *Störgröße*!
- Leiten Sie die Gleichungen für die bleibende Regeldifferenz eines Regelkreises mit P-Regler und P-T₁-Strecke für Führungs- **und** für Störverhalten her! Welchen Einfluss hat eine Änderung der Reglerverstärkung K_P auf die bleibende Regeldifferenz?
- Ermitteln Sie die Übertragungsfunktion für Führungsverhalten $G(p)$ für einen aus P-T₁-Strecke und PI-Regler bestehenden Regelkreis!
Tipp: Stellen Sie die Formel für $G(p)$ so um, dass im Zähler nur eine „1“ übrig bleibt!
 Welches Übertragungsverhalten ergibt sich bei diesem Regelkreis, wenn $T_n = T_l$ gewählt wird? In der Praxis kann es trotz dieser gewählten Einstellung bei Führungsgrößenänderung zum Überschwingen der Regelgröße kommen. Was könnte die Ursache dafür sein?
- Machen Sie sich mit den Einstellregeln nach Chien, Hrones und Reswick vertraut (siehe

Tabelle 4-1)!

Tabelle 4-1: Einstellregeln nach Chien, Hrones und Reswick (CHR)

$V_0=K_R \cdot K_S$	Regelvorgang von kürzester Dauer (max. 5% Überschwingen)		20% Überschwingen bei kleinster Schwingungsdauer ($D = 0,45$)	
	Führung	Störung	Führung	Störung
P-Regler	$V_0=0,3 \cdot T_a/T_u$	$V_0=0,3 \cdot T_a/T_u$	$V_0=0,7 \cdot T_a/T_u$	$V_0=0,7 \cdot T_a/T_u$
PI-Regler	$V_0=0,35 \cdot T_a/T_u$ $T_n=1,2 \cdot T_a$	$V_0=0,6 \cdot T_a/T_u$ $T_n=4 \cdot T_u$	$V_0=0,6 \cdot T_a/T_u$ $T_n=T_a$	$V_0=0,7 \cdot T_a/T_u$ $T_n=2,3 \cdot T_u$
PID-Regler	$V_0=0,6 \cdot T_a/T_u$ $T_n=T_a$ $T_v=0,5 \cdot T_u$	$V_0=0,95 \cdot T_a/T_u$ $T_n=2,4 \cdot T_u$ $T_v=0,42 \cdot T_u$	$V_0=0,95 \cdot T_a/T_u$ $T_n=1,35 \cdot T_a$ $T_v=0,47 \cdot T_u$	$V_0=1,2 \cdot T_a/T_u$ $T_n=2 \cdot T_u$ $T_v=0,42 \cdot T_u$

5. Hinweise zum Arbeiten mit der Anwendung BORIS

Die Software BORIS ist ein Werkzeug zur blockorientierten Simulation von Regelkreisen. Sie ist Bestandteil der Regelungstechnik-Software WinFACT 6 aus dem Ingenieurbüro Dr. Kahler (Hamm).

Nach dem Hochlaufen des Arbeitsplatzrechners und dem Einschalten der Stromversorgung für das Füllstandsmodell starten Sie die Anwendung *Füllstand!* Nachfolgendes Blockschaltbild erscheint:

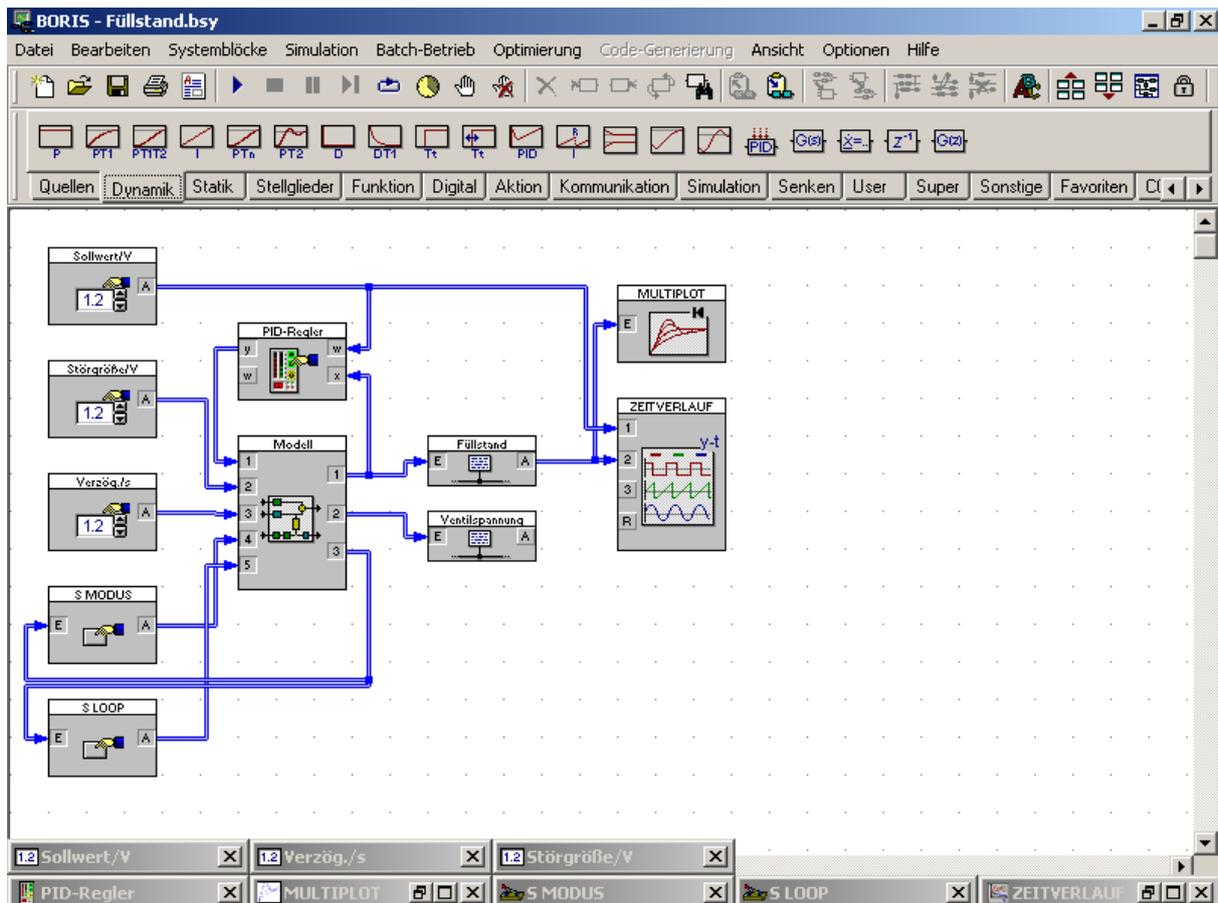


Abbildung 5-1: Blockschaltbild des Regelkreises

Der Block *Modell* beinhaltet das Prozessmodell. Die links oben platzierten Blöcke dienen der Eingabe von Werten für die Größen *Sollwert* (in V), *Störgröße* (in V) und *Verzögerung* der *Störgröße* (in s). Die beiden darunter platzierten Blöcke übernehmen die Funktion von Schaltern:

- *S MODUS* → Betriebsartenschalter. Man kann mit diesem Schalter umschalten zwischen dem normalen Betriebsmodus (*RUN*) und dem *STOP*-Modus, in dem die Spannung am Zulaufventil abgeschaltet wird. Dies ist vor allem dann wichtig, wenn der Simulationsvorgang abgebrochen werden muss. Wird vor Abbruch der Simulation nicht der *STOP*-Modus eingeschaltet, bleibt nach dem Abbruch der letzte Wert für die Ventilspannung erhalten, d.h. das Ventil würde ggf. offen bleiben.
- *S LOOP* → Schalter für die Art des Regelkreises. Wurde *OPEN* eingeschaltet, so ist der Regelkreis aufgeschnitten, d.h. der Reglerausgang hat keinerlei Einfluss auf die Stellgröße. In der Schalterstellung *CLOSE* ist der Regelkreis geschlossen.

Der Block *PID-Regler* realisiert einen komfortablen Regler mit verschiedenen Bedien- und Anzeigefunktionen. Die Blöcke *ZEITVERLAUF* und *MULTILOT* dienen zur Aufnahme, Auswertung sowie dem Ausdrucken der Messkurven.

Mittels der Menüfunktion *Ansicht..Anzeigemodus wechseln* gelangen Sie in eine alternative Ansicht, in der alle notwendigen Bedien- und Anzeigefunktionen dargestellt sind.

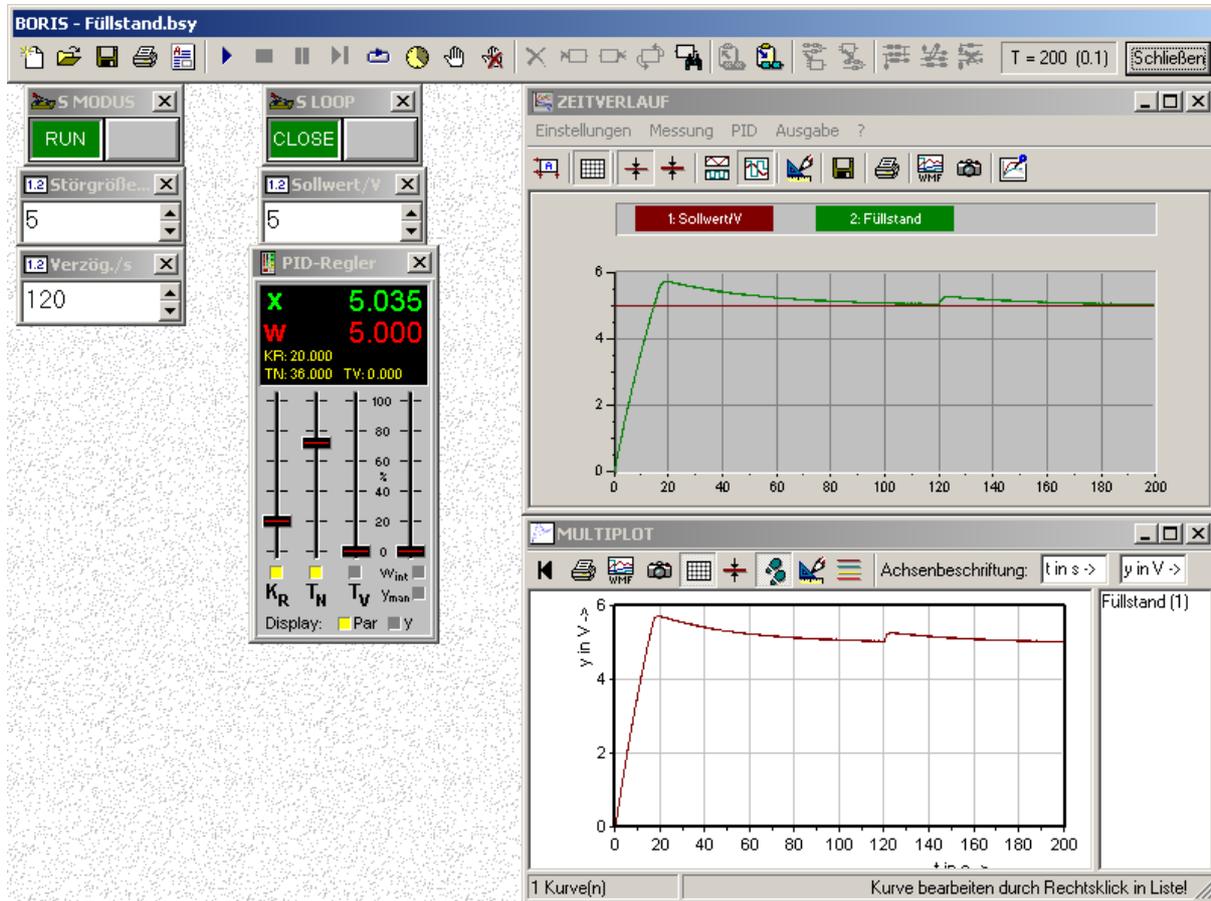


Abbildung 5-2: Anzeigemodus „Bedienen und Beobachten“

Die Werte in den Eingabefeldern (z.B. *Sollwert*) können entweder durch Direkteingabe oder durch Nutzen der beiden Scrollbuttons geändert werden. Das Umschalten in einen anderen Schaltzustand (z.B. am Schalter *S LOOP*) erfolgt durch Klick auf die graue Schaltfläche. Der jeweils aktuelle Schaltzustand wird angezeigt.

Im Fenster des *PID-Reglers* lassen sich die verschiedenen Regleranteile zu- oder abschalten. So lässt sich z.B. ein PI-Regler realisieren, indem die Felder über K_R und T_N durch Anklicken aktiviert wurden (farbiges Kästchen), während das Feld über T_V deaktiviert (d.h. grau) bleibt. Im Anzeigefeld im oberen Teil des Fensters werden neben dem Istwert (x) und dem Sollwert (w) außerdem entweder die Reglerparameter (bei aktivierter Anzeige *Par*) oder der Reglerausgang (falls y aktiviert) angezeigt. Die Reglerparameter lassen sich per Schiebeputton auf die gewünschten Werte einstellen. Die Vorgabe eines internen Sollwertes (w_{int}) oder eines manuellen Reglerausgang-Stellwertes (y_{man}) ist möglich, wird aber im Praktikum nicht realisiert.



Mit nebenstehende Funktionsbuttons lässt sich die Simulation starten bzw. stoppen.

Im Fenster **ZEITVERLAUF** werden die Messkurven während der Simulation aufgezeichnet und stehen zur weiteren Auswertung bereit.

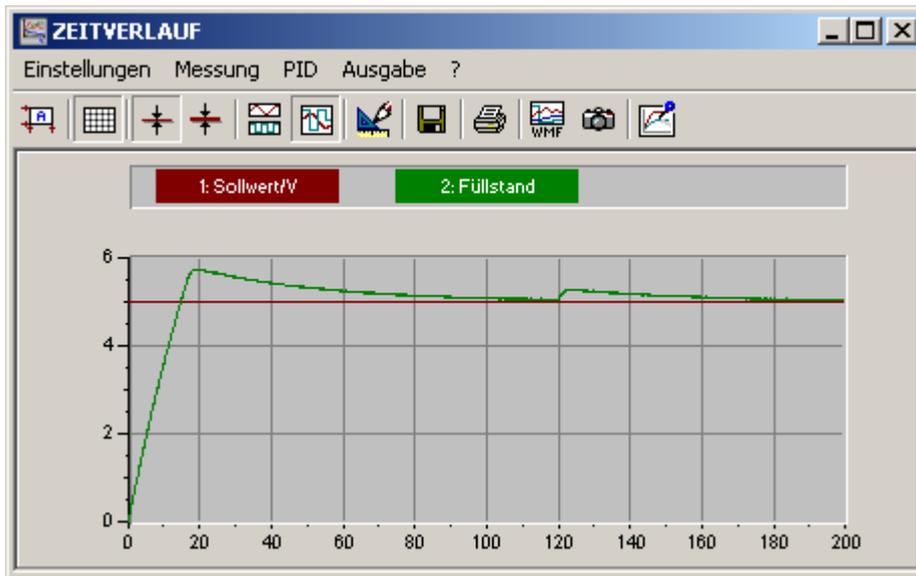


Abbildung 5-3: Fenster **ZEITVERLAUF**

Durch die Menüfunktion *Einstellungen* → *Einstellungen...* können die Achsskalierungen geändert werden. Hierfür ist es erforderlich die Option *automatische Skalierung* zu aktivieren. Vor einem erneuten Simulationsdurchlauf sollte jedoch die *automatische Skalierung* wieder eingeschaltet werden.

Mit Hilfe des Buttons  kann während der Simulation die Bildschirmskalierung aktualisiert (angepasst) werden.

Dieser Button  dient zum „Einfrieren“ eines Simulationsdurchlaufes. Damit bleiben beim nächsten Durchlauf die aktuellen Kurven erhalten und können mit den neuen optisch verglichen werden.

Durch Klick auf diesen Button  wird das Diagramm ausgedruckt.

Im Fenster des Blockes **MULTI PLOT** dient zur Aufnahme und zum Drucken mehrerer nacheinander aufgenommener Messkurven. Messkurven in diesem Fenster können einzeln (durch Rechtsklick auf den Kurvennamen im rechten Fensterteil → *Kurve löschen*) oder auch komplett () gelöscht werden.

6. Versuchsdurchführung

ACHTUNG: Betätigen Sie *vor jedem Simulationsdurchlauf* die RESET-Taste am Simulationsboard! Damit wird die Regelstrecke in den Ausgangszustand („Behälter leer“) gebracht.

6.1. Kennwertermittlung der Strecke

1. Wechseln Sie in den Anzeigemodus „Bedienen und Beobachten“ (Ansicht → Anzeigemodus wechseln).
2. Nehmen Sie, falls noch nicht geschehen, folgende Einstellungen vor:
 - *Störgröße*.....5V
 - *Verzögerung der Störgröße*....0s
 - Schalter *S MODUS*.....RUN
 - Schalter *S LOOP*.....OPEN

Alle anderen Einstellwerte haben zunächst keine Bedeutung und können beibehalten werden.

2. Nehmen Sie die Sprungantwort der Regelstrecke auf ()! Die Simulationsdauer für diesen wie auch für alle weiteren Messdurchläufe beträgt 200s.
3. Drucken Sie die aufgenommene Messkurve aus dem Fenster *ZEITVERLAUF* heraus aus!
4. Ermitteln Sie die Kennwerte der Regelstrecke und die sich damit ergebende Gleichung für das Übertragungsverhalten der Regelstrecke $G_S(p)$!
5. Löschen Sie die im Fenster *MULTILOT* aufgenommene Kurve!

6.2. Führungs- und Störverhalten des Regelkreises

Ändern Sie die *Einstellungen* wie folgt:

- *Verzögerung der Störgröße*....120s
- *Sollwert*.....5V
- Schalter *S LOOP*.....CLOSE

Bemerkung: Durch Aktivieren/Deaktivieren der Optionen K_P , T_N und T_V im Fenster *PID-Regler* lassen sich die erforderlichen Reglertypen einstellen:

- *P-Regler* K_P aktiviert; T_N und T_V deaktiviert.
- *PI-Regler*..... K_P und T_N aktiviert; T_V deaktiviert.
- *PD-Regler* K_P und T_V aktiviert; T_N deaktiviert.
- *PID-Regler*..... K_P , T_N und T_V aktiviert.

6.2.1. Anwendung des P-Reglers

Nehmen Sie nacheinander die Messkurven für nachfolgende Reglereinstellungen vor!

- a) $K_P=1$; b) $K_P=5$; c) $K_P=20$ zusammen!

Berechnen Sie für jede Einstellung des P-Reglers die theoretisch zu erwartende bleibende Regeldifferenz für Führungs- **und** Störverhalten!

Messen Sie nach jedem Simulationsdurchlauf die bleibende Regeldifferenz für Führungs- und Störverhalten! Stellen Sie die errechneten und gemessenen Werte in einer Tabelle gegenüber:

Nachdem alle drei Messkurven aufgenommen wurden, maximieren Sie das Fenster *MULTI-PLOT* und betätigen die *Druck*-Taste auf der Tastatur (Das Fenster wird als Bild zwischengespeichert). Öffnen Sie das Programm *Microsoft Word* aus dem Startmenü (Windows-Taste) und fügen Sie das zwischengespeicherte Bild ein. Speichern Sie die Datei im Laufwerk *E*:!

Wechseln Sie zurück ins Programm *BORIS*! Löschen Sie alle im Fenster *MULTI-PLOT* aufgenommenen Kurven!

6.2.2. Anwendung des PI-Reglers

- a) $K_P=3$; für T_N wählen Sie den Wert, bei dem sich als Führungsverhalten im Regelkreis $P-T_1$ -Verhalten ergeben sollte!

- b) $K_P=25$; T_N bleibt unverändert!

- c) $T_N=0,5s$; K_P bleibt unverändert! Aktivieren Sie **nur für diese Messung** die Anzeige der *Stellgröße*: Schließen Sie hierfür die Ansicht „Bedienen und Beobachten“ (Button *Schließen*) und verbinden Sie im Blockschaltbild per Darg & Drop den Ausgang *A* des Blockes *Ventilspannung* mit dem Eingang 3 des Blockes *ZEITVERLAUF*! Wechseln Sie wieder in die Ansicht „Bedienen und Beobachten“ (*Ansicht* → *Anzeigemodus wechseln*)!

- d) Maximieren Sie das Fenster *MULTI-PLOT* und kopieren Sie dieses Bild in Ihre *Word*-Datei! Drucken Sie das *Word*-Dokument mit beiden darin enthaltenen Diagrammen aus und beschriften Sie die einzelnen Kurven! Löschen Sie anschließend im Fenster *MULTI-PLOT* **nur** die unter 5.2.2.b) und 5.2.2.c) aufgenommenen Kurven! Löschen Sie im Blockschaltbild die Verbindung zwischen den Blöcken *Ventilspannung* und *ZEITVERLAUF* (Rechtsklick auf den Eingang 3 des Blocks *ZEITVERLAUF*)!

6.2.3. Anwenden des PID-Reglers

Die im Fenster *MULTI-PLOT* verbliebene Kurve dient im Folgenden als Referenzkurve. Stellen Sie die der Kurve zugrunde liegenden Reglerparameter wieder ein! Stellen Sie zusätzlich einen D-Anteil des Reglers mit einer Vorhaltzeit $T_v=8s$ ein und starten Sie eine neue Simulation!

Kopieren Sie das Diagramm in Ihr *Word*-Dokument und drucken Sie die betreffende Seite aus. Beschriften Sie die einzelnen Kurven! Löschen Sie anschließend im Fenster *MULTI-PLOT* alle aufgenommenen Kurven!

6.2.4. Reglerparametrierung mit Einstellregeln

- e) In der Praxis sind P-T₁-Systeme sehr selten. Betrachten Sie die Regelstrecke als P-T₂-System mit der Ausgleichszeit $T_a=T_1$ und der Verzugszeit $T_u=2s$. Stellen Sie unter Verwendung der Einstellregeln nach Chien, Hrones und Reswick (CHR) die Reglerkennwerte für gutes Führungsverhalten (mit max. 5% Überschwingen) ein.
- f) Stellen Sie analog zu d) die Kennwerte für gutes Störverhalten ein!

Kopieren Sie das Diagramm mit den beiden Messkurven in Ihr Word-Dokument, beschriften Sie die einzelnen Kurven! Löschen Sie anschließend im alle Fenster *MULTILOT* aufgenommenen Kurven!

7. Versuchsauswertung

- Vergleichen Sie die theoretisch zu erwartenden mit den gemessenen Regeldifferenzen im Regelkreis mit P-Regler! Begründen Sie mögliche Abweichungen!
- Warum kommt es trotz „richtig“ eingestelltem T_N des PI-Reglers nach 5.2.2 b) bei großen Reglerverstärkungen zum Überschwingen der Regelgröße?
- Welches Reglerverhalten trat bei der Einstellung $K_P=25/ T_n=0,5s$ auf? Wie ist es zu erklären? Hat sich diese Reglereinstellung als günstig erwiesen? Beurteilen Sie zur Beantwortung dieser Frage sowohl Führungs- als auch Störverhalten!
- Entsprach das Regelverhalten des PID-Reglers Ihren Vorstellungen? Begründen Sie Ihre Antwort! Unter welcher Voraussetzung wäre der Einsatz des PID-Reglers empfehlenswert?
- Welcher der betrachteten Reglertypen ist für die Regelstrecke am besten geeignet? Wählen Sie eine günstige Reglereinstellung für diesen Reglertyp und starten Sie einen letzten Testdurchlauf! Begründen Sie die von Ihnen gewählte Reglerparametrierung!