

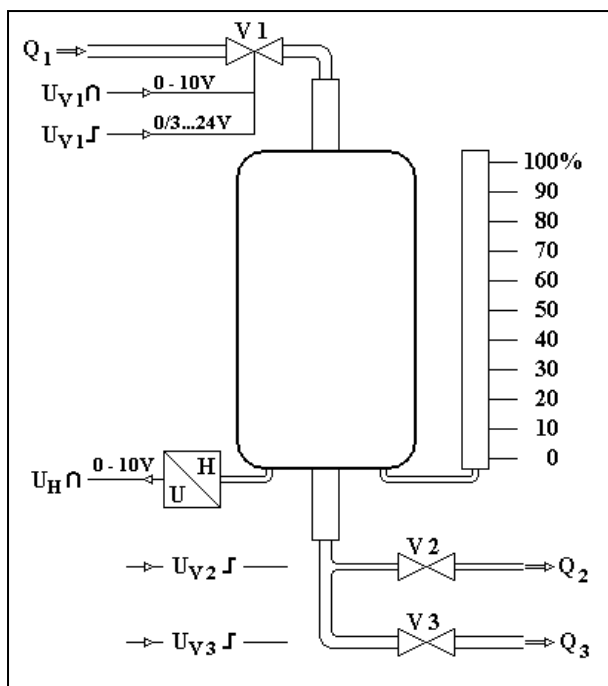
## Versuch 4

### Behälterfüllstandsregelung

Das Arbeitsziel ist das Kennenlernen der Möglichkeiten und praktischen Grenzen der Anwendung linearer Regler an einer Füllstandsregelung.

#### 1. Versuchsaufbau

Der Versuchsaufbau besteht aus dem elektronischen Simulationsmodell „Füllstandsstrecke“ und einem PC mit dem Regelalgorithmus, an dessen USB-Schnittstelle die Box „Profi-Cassy“ der Firma Leybold Didactic als Interface zum Simulationsmodell angeschlossen ist.



Die Zulaufmenge in den Behälter kann über das Ventil V1 entweder stetig am Eingang  $U_{V1\Delta}$  oder unstetig am Eingang  $U_{V1\Sigma}$  eingestellt werden. Bei stetiger Einstellung ist der Volumenstrom in den Behälter proportional zur angelegten Spannung zwischen 0 und 10 Volt. Bei unstetiger Einstellung wird das Ventil V1 nur „Auf“- oder „Zu“-gesteuert.

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

Über die beiden Ventile V2 und V3 kann der Behälter über Rohre mit unterschiedlichen Querschnitten entleert werden. Die Ablaufgeschwindigkeit ist dabei abhängig von der

jeweiligen Füllhöhe; durch einen abnehmenden Füllstand sinkt der statische Druck und bewirkt damit gemäß dem Ausflussgesetz von *Evangelista Torricelli* (1608-1647) eine Verringerung der Ablaufgeschwindigkeit. Das Gesetz besagt, dass bei einem Gefäß die Ausflussgeschwindigkeit proportional zur Quadratwurzel der Füllhöhe ist. Demzufolge handelt es sich um eine Regelstrecke mit Ausgleich.

Der PC übernimmt im Versuch die Funktion eines Reglers mit FührungsgröÙengeber, StörgröÙengeber und StellgröÙengeber. Wahlweise kann ein P-, PI-, PD- oder PID-Regler eingestellt werden. Auf dem Bildschirm des PC zeigen Diagramme die zeitlichen Verläufe der RegelgröÙe  $x(t)$  und der FührungsgröÙe  $w(t)$ .

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

## 2. Versuchsvorbereitung

☞ Das Kolloquium zur Versuchsvorbereitung erfolgt mündlich in der Gruppe, **ohne** Unterlagen. Die Rechnungen werden hierbei nicht abgefragt.

Gegeben sei das Blockschaltbild des im Versuch verwendeten Regelkreises.

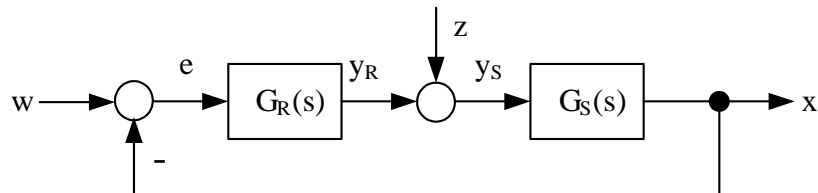


Abbildung 2-1: Blockschaltbild des Regelkreises

1. Ordnen Sie die einzelnen Komponenten des Versuchsaufbaus den entsprechenden Blöcken zu! Was bedeuten die Symbole  $w$ ,  $e$ ,  $z$ ,  $x$ ,  $y_R$  und  $y_S$ ? Welche physikalischen Größen stehen im Versuchsaufbau ganz konkret hinter diesen Symbolen? Das Wissen darüber ist essentiell für das Verständnis des Versuches.
2. Benennen Sie Ursachen für mögliche Störgrößen.
3. Entsprechend obiger Abbildung, besteht der Regelkreis aus einer  $PT_1$ -Strecke

$$G_S(s) = \frac{k}{1 + sT_1}$$

und einem P-Regler

$$G_R(s) = V.$$

Die Führungsgröße und die Störgröße seien Sprungsignale

$$W(s) = \frac{w_0}{s} \quad \text{und} \quad Z(s) = \frac{z_0}{s}.$$

Bitte beachten Sie, dass die Störgröße  $z$  hier am Eingang der Regelstrecke angreift. Damit ergibt sich als bleibende Regeldifferenz im Führungsverhalten:

$$e_w = \frac{w_0}{1 + k \cdot V}$$

bzw. im Störverhalten

$$e_z = \frac{-z_0 \cdot k}{1 + k \cdot V}.$$

☞ Diese Gleichungen können sie zur Übung mit dem in der Vorlesung erworbenen Wissen selbst herleiten.

Die Anteile  $e_W$  und  $e_Z$  überlagern sich, somit ergibt sich die bleibende Regeldifferenz  $e$  insgesamt aus der Summe der beiden Anteile  $e_W$  und  $e_Z$ :

$$e = \frac{w_0}{1 + k \cdot V} - \frac{z_0 \cdot k}{1 + k \cdot V}$$

Welchen Einfluss hat die Reglerverstärkung  $V$  auf die bleibende Regeldifferenz  $e$ ?

4. Mithilfe eines geeigneten Reglers  $G_R$  soll die  $PT_1$ -Strecke

$$G_S(s) = \frac{k}{1 + sT_1}$$

so geregelt werden, dass sich im Führungsverhalten des gesamten Regelkreises ein  $PT_1$ -Verhalten mit

$$G_{WX}(s) = \frac{1}{1 + sT_2}$$

ergibt. Dabei sei  $T_2$  eine beliebige Verzögerungszeitkonstante.

Die Führungsübertragungsfunktion des geschlossenen Regelkreises

$$G_{WX}(s) = \frac{G_R(s) \cdot G_S(s)}{1 + G_R(s) \cdot G_S(s)}$$

wird zu diesem Zweck nach  $G_R(s)$  umgestellt:

$$G_R(s) = \frac{G_{WX}(s)}{G_S(s) \cdot (1 - G_{WX}(s))}$$

Setzt man nun die obigen Funktionen von  $G_S(s)$  und  $G_{WX}(s)$  in  $G_R(s)$  ein und bringt die Formel in die für einen PID-Regler übliche Form:

$$G_R(s) = \frac{T_1}{k \cdot T_2} \cdot \left(1 + \frac{1}{sT_1}\right) \triangleq V \cdot \left(1 + \frac{1}{sT_n} + sT_v\right),$$

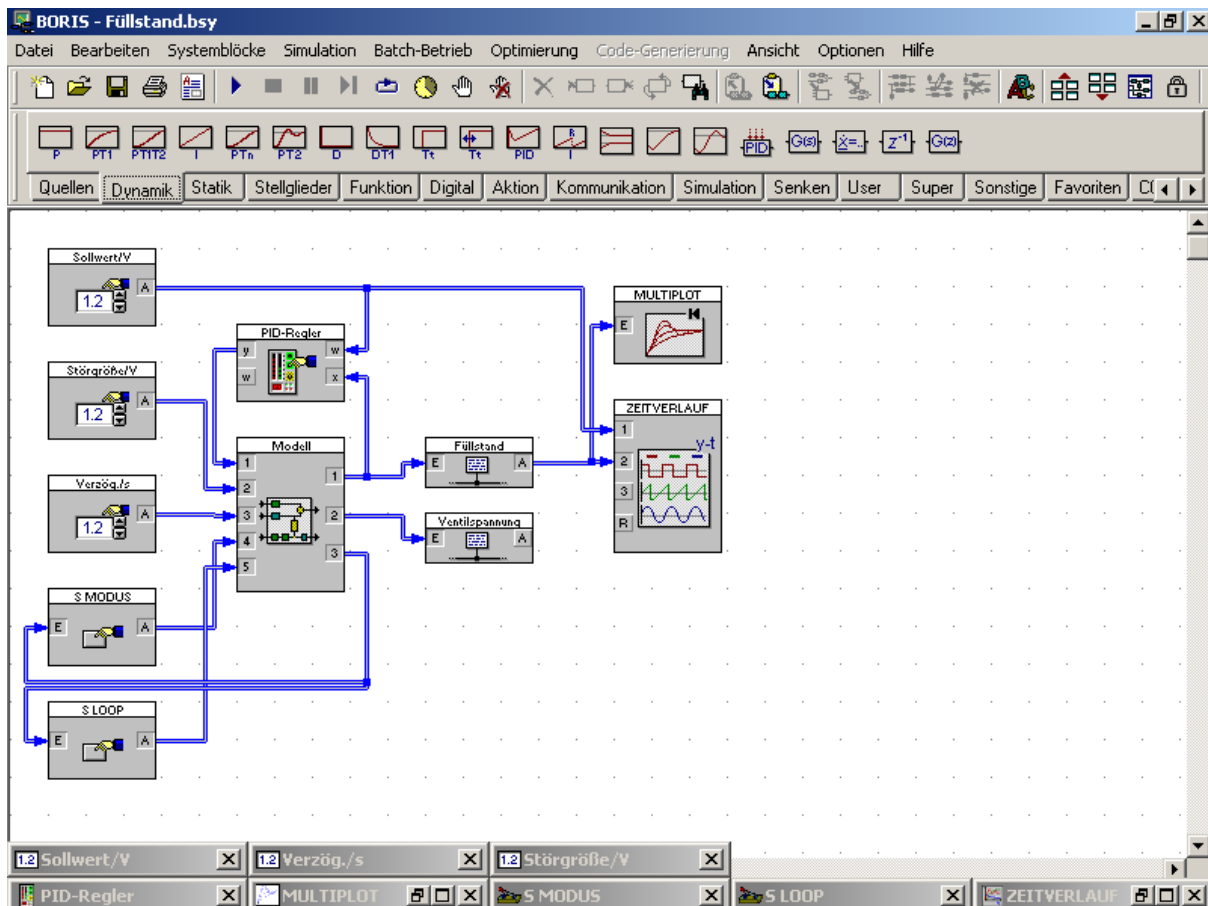
so erhält man die Gleichung eines **PI-Reglers** mit der Reglerverstärkung  $V = \frac{T_1}{k \cdot T_2}$  und der Nachstellzeit  $T_n = T_1$ .

☞ Diese Rechnung sollten sie zum Zwecke der Übung nachvollziehen.

Welche Auswirkungen hat eine Vergrößerung der Reglerverstärkung  $V$  auf die Verzögerungszeitkonstante  $T_2$  der Führungsübertragungsfunktion  $G_{WX}(s)$ ?

5. Studieren Sie die folgenden Hinweise zur Bedienung des Programms BORIS. Die Software BORIS (**B**lock**o**rientierte **S**imulation von Regelkreisen) ist Bestandteil des Softwarepakets WinFACT, das vom Ingenieurbüro Dr. Kahlert entwickelt wurde.

Nach dem Einschalten des Arbeitsplatzrechners sowie der Stromversorgung für das Füllstandsmodell und das Profi-Cassy-Interface starten Sie die Anwendung *Füllstand Desktop-Verknüpfung*. Folgendes Blockschaltbild erscheint:



Der Block *Modell* enthält das Prozessmodell. Die drei links oben platzierten Blöcke dienen der Eingabe von Werten: *Sollwert* in Volt, *Störgröße* in Volt und *Verzögerung* der Störgröße in Sekunden.

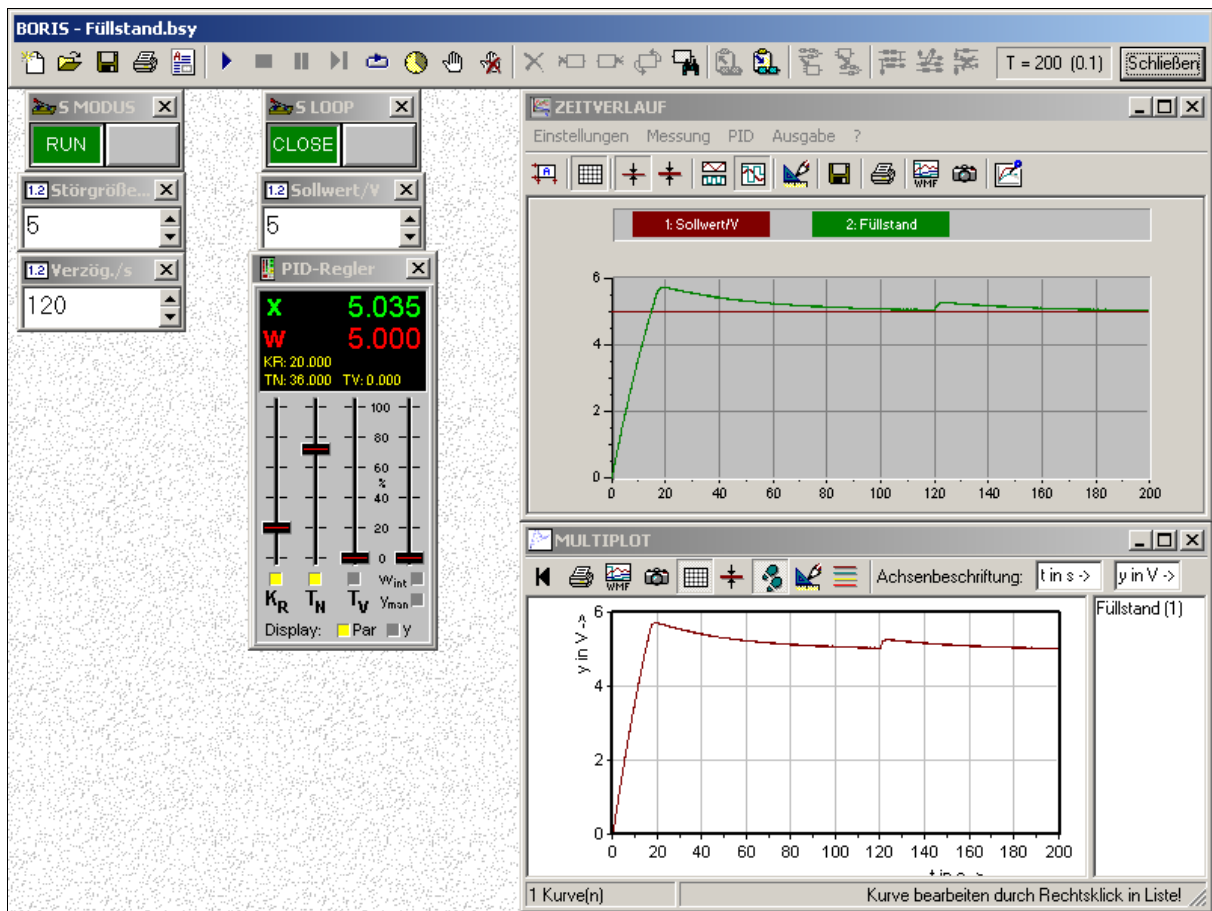
Die beiden darunter platzierten Blöcke übernehmen die Funktion von Schaltern:

**S MODUS** ist ein Betriebsartenschalter. Man kann mit diesem Schalter zwischen dem normalen *RUN*-Betriebsmodus und dem *STOP*-Modus, in dem die Spannung am Zulaufventil abgeschaltet wird, umschalten. Dies ist immer dann wichtig, wenn der Simulationsvorgang abgebrochen werden muss. In diesem Fall bleibt der letzte vor Abbruch ausgegebene Wert der Ventilspannung bestehen. Wird also vor Abbruch der Simulation nicht der *STOP*-Modus eingeschaltet, bleibt das Ventil weiterhin geöffnet.

**S LOOP** bestimmt die Art des Regelkreises. *OPEN* steht für den offenen Regelkreis, und *CLOSE* für den geschlossenen Regelkreis,

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

Mit dem Menübefehl **Ansicht → Anzeigemodus wechseln** gelangen Sie zu einer alternativen Ansicht, dem Anzeigemodus „Bedienen und Beobachten“ in dem alle notwendigen Bedien- und Anzeigefunktionen dargestellt sind.



Die Werte in den Eingabefeldern, z.B. *Sollwert*, können entweder durch Direkteingabe oder durch Betätigen 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.

### Fenster *PID-Regler*

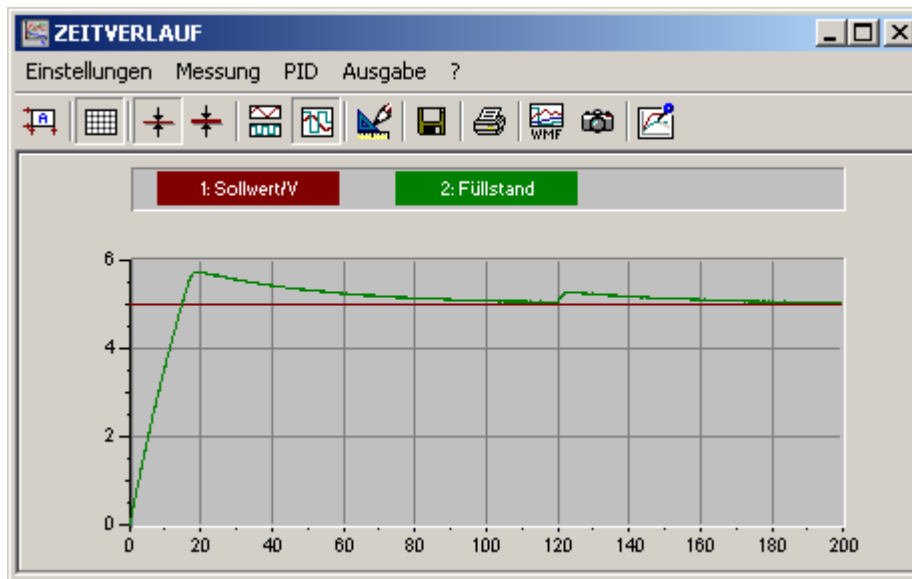
Durch Aktivieren bzw. Deaktivieren der Felder  $K_R$ ,  $T_N$  und  $T_V$  lassen sich die verschiedenen Regler realisieren. Im Anzeigefeld (oberer Teil des Fensters) werden außer dem Istwert ( $x$ ) und dem Sollwert ( $w$ ) entweder die Reglerparameter (bei aktivierter Anzeige *Par*) oder der Reglerausgang (falls  $y$  aktiviert) angezeigt. Die Reglerparameter lassen sich per Schieberegler auf die gewünschten Werte einstellen. Die Vorgabe eines internen Sollwertes ( $w_{int}$ ) oder eines manuellen Reglerausgang-Stellwertes ( $y_{man}$ ) ist möglich, wird jedoch im Praktikum nicht genutzt.




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


### Fenster *ZEITVERLAUF*

dient zur Aufzeichnung einer Messkurve während einer Simulation und zur anschließenden Auswertung (Messung) der Kurve.




Durch die Menüfunktion *Einstellungen* → *Einstellungen...* können die Achsskalierungen geändert werden. Zu diesem Zweck muss die Option *automatische Skalierung* deaktiviert werden. Vor einem erneuten Simulationsdurchlauf sollte jedoch die *automatische Skalierung* wieder eingeschaltet werden.

Mit Hilfe des Buttons  kann während der Simulation die Bildschirmskalierung aktualisiert (d.h. dem bisherigen Kurvenverlauf entsprechend angepasst) werden.

Der Button  (Freeze-Modus) dient zum „Einfrieren“ der Kurven eines Simulationsdurchlaufes. Damit bleibt die aktuelle Kurve bei einer weiteren Simulation erhalten und dient dann als Vergleichskurve.


Durch Klick auf den Button  wird das Diagramm ausgedruckt.

### Fenster **MULTILOT**

dient zur Aufzeichnung und zum Drucken mehrerer nacheinander aufgenommener Messkurven. Kurven in diesem Fenster können, solange keine Simulation läuft, einzeln (durch Rechtsklick auf den Kurvennamen im rechten Fensterteil → *Kurve löschen*) oder auch komplett () gelöscht werden.

### 3. Versuchsdurchführung

#### Wichtige Hinweise:


- Betätigen Sie *vor jedem Simulationsdurchlauf* die RESET-Taste am Simulationsboard, um die Regelstrecke in den Ausgangszustand „Behälter leer“ zu versetzen.
- Muss eine Simulation abgebrochen werden, so schalten Sie immer zuerst den Schalter *S\_MODUS* auf **STOP**, bevor Sie die Simulation mit dem entsprechenden Button  abbrechen. Nach dem Abbruch schalten Sie *S\_MODUS* bitte wieder auf **RUN** (siehe auch Beschreibung des Schalters *S\_MODUS* in Kapitel 5).

#### 3.1. Ermittlung der Kennwerte der Regelstrecke

Zur Anregung der Regelstrecke wird im Folgenden am Störgrößeneingang der Regelstrecke (Ventilsteuereingang) die Spannung sprungartig erhöht.

1. Wechseln Sie in den Anzeigemodus *Bedienen und Beobachten* (Ansicht → Anzeigemodus wechseln).
2. Kontrollieren und ändern Sie, falls erforderlich, folgende Einstellungen:
  - *Störgröße* .....5V
  - *Verzögerung der Störgröße* ....0 s
  - Schalter *S\_MODUS* .....RUN
  - Schalter *S\_LOOP* .....OPEN

Alle anderen Einstellwerte haben zunächst keine Bedeutung und werden beibehalten.

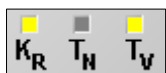
Nehmen Sie die Sprungantwort der Regelstrecke auf ()! Die Simulationsdauer für diesen wie auch für alle weiteren Messdurchläufe beträgt 200s.

2. Drucken Sie die aufgenommene Messkurve aus dem Fenster *ZEITVERLAUF* aus!
3. Ermitteln Sie grafisch das Verhalten der Regelstrecke, deren Kennwerte und die sich daraus ergebende Übertragungsfunktion der Regelstrecke  $G_S(p)$ !
4. Löschen Sie die im Fenster *MULTILOT* aufgenommene Kurve!

#### 3.2. Führungs- und Störverhalten des Regelkreises

Zur Simulation des geschlossenen Regelkreises nehmen Sie zunächst folgende Änderungen der Einstellungen vor:

- Schalter *S\_LOOP* .....CLOSE (d.h.: der Regelkreis wird geschlossen)
- *Verzögerung der Störgröße* ....100s
- *Sollwert* .....5V



**Hinweis:** Die Einstellung des gewünschten Reglertyps ist im Fenster *PID-Regler* durch Aktivierung bzw. Deaktivierung (Mausklick) der Kontrollfelder  $K_R$  (Verstärkung),  $T_N$  (I-Anteil) bzw.  $T_V$  (D-Anteil) vorzunehmen.



### 3.2.1. Anwendung des P-Reglers

Messen Sie während bzw. nach jedem der drei folgenden Simulationsläufe die stationären Endwerte der Regelgröße ohne Störung (nach 90..95s) **und** mit Störung (nach 200s)!

Stellen Sie im Fenster PID-Regler einen P-Regler mit der Verstärkung  $K_R=1$  ein! Starten Sie die Simulation!

Nach Ende der Simulation (200s) darf die im Fenster *MULTIPLY* aufgezeichnete Kurve nicht gelöscht werden; vor dem Ausdruck sollen auch die beiden folgenden Kurven in diesem Fenster aufgezeichnet werden!

Wiederholen Sie die Simulation jeweils für  $K_R=5$  und  $K_R=20$ !

Nach Aufzeichnung aller drei Messkurven drucken Sie das Fenster *MULTIPLY* aus!

Nachdem Sie sich versichert haben, dass das *MULTIPLY*-Fenster fehlerfrei ausgedruckt wurde, löschen Sie bitte alle in diesem Fenster aufgezeichneten Kurven!

### 3.2.2. Anwendung des PI-Reglers

Stellen Sie den in der Versuchsvorbereitung in Aufgabe 6 ermittelten Reglertyp mit einer Nachstellzeit  $T_N$ , die den dort getroffenen Annahmen entspricht, ein. Als Reglerverstärkung wählen Sie  $K_R=3$ . Führen Sie einen Simulationslauf durch!

Welcher Verlauf des Führungsverhaltens sollte bei  $K_R=25$  (bei unveränderter Einstellung der anderen Reglerparameter) zu erwarten sein? Begründen Sie Ihre Antwort! Führen Sie einen Simulationslauf mit dieser Reglereinstellung durch! Vergleichen Sie die aufgenommene Kurve mit Ihren Erwartungen! Was stellen Sie fest?

Drucken Sie das Fenster *MULTIPLY* aus und beschriften Sie die einzelnen Kurven! Löschen Sie anschließend im Fenster *MULTIPLY* **nur** die letzte, soeben aufgenommene Kurve!

### 3.2.3. Anwendung des PID-Reglers

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

Vergleichen Sie die beiden Kurven miteinander! Drucken Sie das Fenster *MULTIPLY* aus und beschriften Sie die einzelnen Kurven! Löschen Sie anschließend im Fenster *MULTIPLY* alle aufgenommenen Kurven!

### 3.2.4. Vergleich der Regler

Wählen Sie aus den bisher betrachteten drei Reglertypen denjenigen aus, der Ihrer Meinung nach am besten zur Regelung des Behälterfüllstandes geeignet ist! Stellen Sie die Reglerparameter so ein, dass sich sowohl gutes Führungs- als auch gutes Störgrößenverhalten ergibt! Nehmen Sie einen Testlauf auf und begründen Sie die von Ihnen gewählte Reglereinstellung!



### 3.2.5. Windup-Effekt

Stellen Sie einen PI-Regler mit  $K_R=25$  und  $T_N = 0,5s$  ein! Aktivieren Sie die Anzeige der *Stellgröße* wie folgt: Schließen Sie die Ansicht „Bedienen und Beobachten“ (Button *Schließen*) und verbinden Sie im Blockschaltbild per Drag & Drop den Ausgang A des Blockes **Ventilspannung** mit dem Eingang 3 des Blockes **ZEITVERLAUF**! Wechseln Sie zurück in die Ansicht *Bedienen und Beobachten* (Ansicht  $\rightarrow$  Anzeigemodus wechseln)!

Welchen Kurvenverlauf erwarten Sie bei dieser Reglereinstellung?

Starten Sie die Simulation! Diskutieren Sie den Kurvenverlauf! Welchem Reglertyp entspricht der Kurvenverlauf? Begründen Sie den Kurvenverlauf und diskutieren Sie Möglichkeiten zu dessen Verbesserung!

Aktivieren Sie den *Freeze*-Modus im Fenster *Zeitverlauf*!

Wechseln Sie zum Blockschaltbild und öffnen Sie den Parameterdialog des PID-Reglers! Aktivieren Sie im Register *Grenzwerte* die Option *Begrenzung aktiv*! Stellen Sie als Grenzwerte -10 (Minimum) und 10 (Maximum) ein! Aktivieren Sie den *Anti-Windup-Halt*!

Wechseln Sie den Anzeigemodus und starten Sie einen neuen Durchlauf! Vergleichen Sie den Kurvenverlauf mit dem Verlauf der ohne Anti-Windup-Maßnahme aufgenommenen Kurve! Begründen Sie die Wirkung des *Anti-Windup-Halt*!

Drucken Sie die Kurven aus!

## 4. Versuchsauswertung

- Ermitteln Sie aus den aufgenommenen Kurven der Regelung mit P-Regler für alle drei verwendeten Reglerverstärkungen die bleibende Regelabweichung für Führungs- und für Störverhalten!
- Berechnen Sie für die vorliegende Regelstrecke und jeden im Versuch verwendeten P-Regler mit den in der Vorbereitung hergeleiteten Formeln die theoretisch zu erwartende bleibende Regeldifferenz für Führungs- und Störverhalten! Stellen Sie praktisch ermittelte und berechnete Werte übersichtlich in einer Tabelle gegenüber! Begründen Sie mögliche Abweichungen!
- Warum kommt es trotz „richtig“ eingestelltem  $T_N$  des PI-Reglers bei großer Reglerverstärkung zum Überschwingen der Regelgröße?
- Ist der Einsatz eines PID-Reglers für die vorliegende Regelstrecke zu empfehlen? Begründen Sie Ihre Antwort!
- Welchem Reglertyp ähnelt der bei Verwendung des PI-Reglers mit  $K_R=25$  und  $T_N = 0,5s$  (ohne Anti-Windup-Maßnahme) aufgezeichnete Kurvenverlauf?
- Welchem Reglertyp sollte bei der vorliegenden Regelstrecke der Vorzug gegeben werden
  - a) bei Regelung ohne Anti-Windup-Halt?
  - b) bei Regelung mit Anti-Windup-Halt?

Begründen Sie Ihre Antworten!