

## Praktikum Grundlagen der Regelungstechnik (RTP / ATP2)

### Allgemeines

#### Ziele

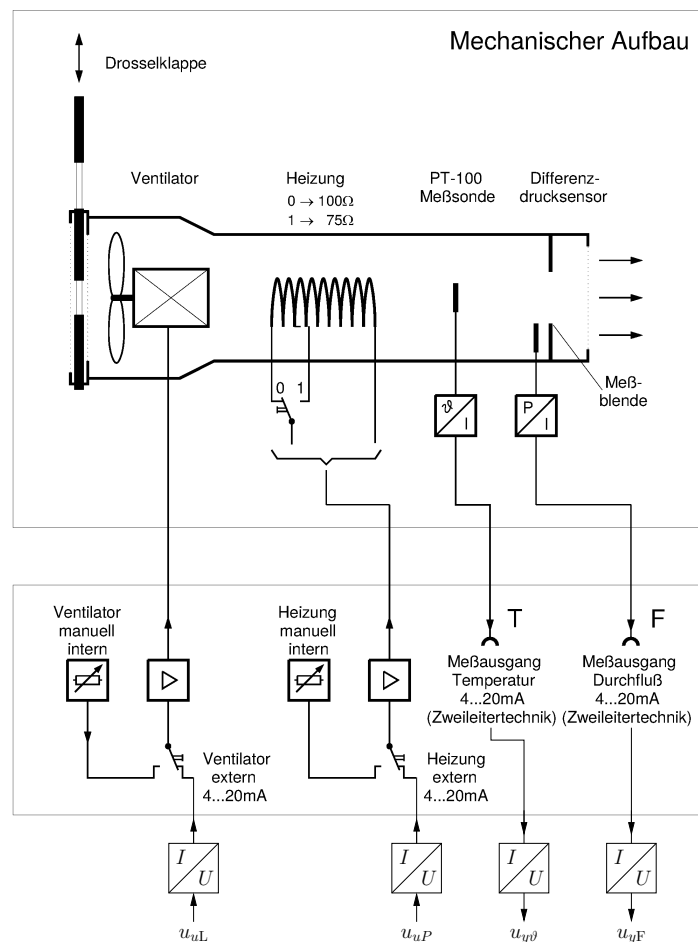
Die Studierenden sollen an Hand eines praxisnahen Beispiels die typischen Elemente eines Regelkreises kennen lernen. Es werden unterschiedliche Dimensionierungsverfahren für Regler erprobt. Besonders sollen das Führungs- und Störverhalten sowie statische und dynamische Kenngrößen untersucht werden.

#### Durchführung des Praktikums

Das Praktikum hat den Charakter eines Projekts. In vier Terminen soll das Ziel — Aufbau und Erprobung eines Regelkreises — schrittweise erreicht werden. Dabei soll an den einzelnen Übungstagen in der Regel eins der folgenden Kapitel bearbeitet werden. Zu jedem Termin wird von allen Studierenden eine Vorbereitung verlangt, über die in einem Gespräch Auskunft gegeben werden kann. Diese Vorbereitung ist notwendig, um die Arbeitsschritte am Versuchstag sinnvoll durchführen zu können. Über jeden Arbeitstag ist ein Protokoll anzufertigen.

#### Versuchsaufbau

Im Labor für Automatisierungstechnik steht für jede Praktikumsgruppe ein Modell zur Temperaturregelung zur Verfügung (siehe nebenstehendes Bild). In einem Rohr strömt Luft an einem Heizelement entlang und wird dabei erwärmt. Über einen elektrischen Lüfter kann die Strömungsgeschwindigkeit beeinflusst werden. Ziel kann es z. B. sein, einen bestimmten Volumenstrom erwärmter Luft oder Luft mit konstanter Temperatur unabhängig von der Strömungsgeschwindigkeit und der Umgebungstemperatur zu erzeugen. Zur Regelung wird ein Industrieregler eingesetzt. Für die komfortable Bedienung des Reglers und für begleitende Simulationen wird ein PC benutzt. Zur Messung von Temperatur und Volumenstrom sind am Modell Messwertgeber mit Wandlern vorhanden, die den Messgrößen proportionale elektrische Signale erzeugen.



## Aufgabe 1: Die Temperatur-Regelstrecke

### Allgemeines

Zur gezielten Auswahl eines geeigneten Reglertyps und zur Parametrierung des Reglers ist es notwendig, die Daten der Regelstrecke zu kennen, um daraus ein ausreichend genaues mathematisches Modell der Strecke zu bilden. Informationen über die Strecke liefern im Allgemeinen physikalische Überlegungen, Gerätebeschreibungen und Messungen an der Anlage.

In diesem Praktikum soll die Strecke zur Erzeugung eines Luftstroms mit vorwählbarer Temperatur benutzt werden. Zur Erwärmung wird das im Rohr eingebaute Heizelement benutzt, das über einen Verstärker im Stellgliedmodul angesteuert wird. In der Schalterstellung "INT" wird die Heizleistung über ein Potentiometer zwischen 0 und 100% von Hand vorgegeben, während in der Stellung "EXT" ein Wert über Buchsen von außen eingespeist wird. Wie in der Verfahrenstechnik üblich, wird mit Strom-Normsignalen mit aktivem Nullpunkt gearbeitet. Ein Wert von 4 mA entspricht 0% und 20 mA 100%.

Vor der Austrittsöffnung wird die Temperatur mit einem Widerstandsthermometer Pt100 gemessen, das die Änderung des elektrischen Widerstands von Platin mit der Temperatur zur Messung ausnutzt. In der industriellen Messtechnik sind Widerstandsthermometer weit verbreitet. In der Versuchseinrichtung ist ein Pt100 in Industrieausführung mit Linearisierung eingebaut. Über Buchsen an der Frontplatte des Stellgliedmoduls kann der Messwert als Strom-Normsignal abgenommen werden.

### Physikalische Grundlagen

#### Stationäres Verhalten

Im stationären Zustand wird die elektrische Leistung  $P_{\text{el}}$ , die dem System über die Heizung zugeführt wird, vollständig in thermische Leistung  $P_{\text{th}}$  umgesetzt. Wird ein Luftvolumen  $V$  um die Temperatur  $\vartheta$  erwärmt, so ist dem Volumen die Energie  $W_{\text{th}}$  zugeführt worden, mit

$$W_{\text{th}} = c_L \varrho_L V \vartheta. \quad (1)$$

$P_{\text{th}}$  erhält man durch Differenziation nach der Zeit:

$$P_{\text{th}} = \frac{dW_{\text{th}}}{dt} = c_L \varrho_L \frac{dV}{dt} \vartheta = c_L \varrho_L \dot{V} \vartheta = P_{\text{el}}, \quad (2)$$

mit

$$\begin{aligned} c_L &= 1,01 \frac{\text{W sec}}{\text{g K}} \quad \dots \text{spezifische Wärmekapazität von Luft} \\ \varrho_L &= 1,293 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad \dots \text{Dichte von Luft.} \end{aligned}$$

Strömt die Luft mit der Geschwindigkeit  $v = \frac{dx}{dt}$  durch das Rohr mit dem Querschnitt  $A$ , so gilt für den Volumenstrom  $\dot{V} = v A$ . Die Strömungsgeschwindigkeit  $v$  wird vom Ventilator geliefert. Für die Austrittstemperatur gilt also:

$$\vartheta = \frac{1}{c_L \varrho_L A} \frac{1}{v} P_{\text{th}}, \quad (3)$$

$\vartheta$  ist hierbei die Temperaturerhöhung gegenüber der Raumtemperatur.

### Dynamisches Verhalten

Bevor die zugeführte elektrische Leistung vollständig als thermische Leistung abgegeben wird, muss sich zunächst das Heizelement mit seiner Ummantelung erwärmen. Außerdem muss die erwärmte Luft den Weg vom Heizelement zur Temperatur-Messstelle zurücklegen. Für das Heizelement kann man sich vereinfacht vorstellen, dass es aus einem homogenen Körper mit der Wärmekapazität  $C_H$  und der Temperatur  $\vartheta_H$  an seiner Oberfläche besteht. Die im Heizelement gespeicherte Energie ist:

$$-W_H = C_H \vartheta_H = \int (P_{el} - P_{th}) dt. \quad (4)$$

Differenziation nach der Zeit ergibt:

$$C_H \frac{d\vartheta_H}{dt} = P_{el} - P_{th}. \quad (5)$$

Mit (3) kann  $P_{th}$  eliminiert werden:

$$c_L \varrho_L A v \vartheta_H + C_H \frac{d\vartheta_H}{dt} = P_{el}. \quad (6)$$

Wird die elektrische Leistung  $P_{el}$  als Eingangsgröße und die Temperatur  $\vartheta_H$  als Ausgangsgröße betrachtet und die Strömungsgeschwindigkeit als konstant angenommen, erhält man die folgende lineare Differenzialgleichung 1. Ordnung:

$$\vartheta_H(t) + \frac{C_H}{c_L \varrho_L A v} \frac{d\vartheta_H(t)}{dt} = \frac{1}{c_L \varrho_L A v} P_{el}(t) \quad (7)$$

mit der zugehörigen Transformation in den Bildbereich der Laplace-Transformation:

$$\vartheta_H(s) + \frac{C_H}{c_L \varrho_L A v} s \vartheta_H(s) = \frac{1}{c_L \varrho_L A v} P_{el}(s). \quad (8)$$

Führt man die Zeitkonstante

$$T_S = \frac{C_H}{c_L \varrho_L A v} \quad (9)$$

und den Proportionalbeiwert

$$K_S = \frac{1}{c_L \varrho_L A v} \quad (10)$$

ein, kann man die Übertragungsfunktion  $G_H(s)$  des Heizelements schreiben als:

$$G_H(s) = \frac{\vartheta_H(s)}{P_{el}(s)} = K_S \frac{1}{1 + T_S s}. \quad (11)$$

Vernachlässigt man die Abkühlung des Luftstroms während des Transports vom Heizelement zur Messstelle im Abstand  $l$ , werden Temperaturänderungen an der Oberfläche des Heizelements am Messort um die Transportzeit  $T_t$  verspätet wirksam. Dieses Verhalten kann als Totzeitglied im Laplace-Bereich berücksichtigt werden:

$$G_t(s) = \frac{\vartheta(s)}{\vartheta_H(s)} = e^{-T_t s} \quad (12)$$

mit

$$T_t = \frac{l}{v}. \quad (13)$$

Die Übertragungsfunktion  $G_S(s)$  der Regelstrecke für konstanten Volumenstrom lautet mit dieser Modellvorstellung also:

$$G_S(s) = \frac{\vartheta(s)}{P_{el}(s)} = K_S \frac{e^{-T_t s}}{1 + T_S s}. \quad (14)$$

## Vorbereitung

In vielen Prozessen ist es möglich, einen so genannten Arbeitspunkt anzugeben. Der Arbeitspunkt stellt den Satz von physikalischen Größen dar, der den typischen Betrieb der Anlage kennzeichnet. Besonders sinnvoll ist die Arbeitspunktdefinition dann, wenn eine Regelung dafür sorgt, dass keine großen Abweichungen von diesem Betriebspunkt auftreten. Für kleine Schwankungen um den Arbeitspunkt kann eine lineare Übertragungsfunktion in solchen Fällen das Verhalten der Anlage oft ausreichend genau beschreiben, auch wenn im Großen nichtlineare Verhältnisse vorliegen.

Bei der Berechnung von Beispielkurven treffen Sie folgende Annahmen für ein mögliches Modell der Regelstrecke am Arbeitspunkt (Strömungsgeschwindigkeit  $v = v_L$ ):

$$K_S = 0,3 \frac{\text{K}}{\text{W}} \quad , \quad T_S = 5 \text{ sec} \quad , \quad T_t = 1 \text{ sec}.$$

Die tatsächlichen Anlagenparameter werden am Versuchstag durch Messungen ermittelt. Sie weichen deutlich von den obigen Modellwerten ab.

Als Vorbereitung sind folgende Aufgaben *vor* dem Praktikumstermin zu bearbeiten. Lesen Sie zunächst auch die Teile 'Messungen' und 'Auswertung', um sich einen Überblick über die Versuchsinhalte zu verschaffen.

**V1.1** Rekapitulieren Sie die Begriffe Kennlinienfeld, Arbeitspunkt und stationäres Verhalten. Welche Gleichung im Grundlagenteil beschreibt die zu messenden Kennlinienfelder und welche (mathematischen) Abhängigkeiten erwarten Sie für  $u_{y\vartheta} = f(u_{uP})$  bzw.  $u_{y\vartheta} = f(u_{uL})$ ?

**V1.2** Berechnen Sie mit Hilfe der Übertragungsfunktion einen analytischen Ausdruck für die Sprungantwort des Temperaturverlaufs bei einem Heizleistungssprung  $P_{\text{el}}(t) = \hat{P}_{\text{el}}\sigma(t)$ .

**V1.3** Simulieren und plotten Sie den Zeitverlauf der Sprungantwort mit Matlab/Simulink für  $P_{\text{el}}(t) = 10 \text{ W} \cdot \sigma(t)$ .

**V1.4** Rekapitulieren Sie aus dem Grundlagenteil den Einfluss (mathematische Abhängigkeit) der Heizleistung auf die Streckenparameter. Plotten oder skizzieren Sie hierzu die Sprungantworten für

- a)  $P_{\text{el}}(t) = 10 \text{ W} \cdot \sigma(t)$ ,
- b)  $P_{\text{el}}(t) = 20 \text{ W} \cdot \sigma(t)$ ,
- c)  $P_{\text{el}}(t) = 30 \text{ W} \cdot \sigma(t)$ .

und überlegen Sie sich eine physikalische Interpretation.

**V1.5** Wiederholen Sie V1.4 mit dem Einfluss der Lüftergeschwindigkeit und überlegen Sie sich, was passiert, wenn man die Lüftergeschwindigkeit halbiert bzw. verdoppelt. Plotten oder skizzieren Sie hierzu die Temperaturverläufe für  $P_{\text{el}}(t) = 10 \text{ W} \cdot \sigma(t)$  unter der Annahme der folgenden Strömungsgeschwindigkeiten:

- a)  $v = v_L$ ,
- b)  $v = \frac{v_L}{2}$ ,
- c)  $v = 2 \cdot v_L$ .

## Messungen

Im Arbeitspunkt gilt für die Heizungsansteuerung  $u_{uP} = u_{uP0} = 5 \text{ V}$ . Das entspricht einer Heizleistung  $P_0$  von ca. 30 W. Die Lüfteransteuerung  $u_{uL} = u_{uL0} = 5 \text{ V}$  entspricht einer Luftgeschwindigkeit  $v_0$  von ca. 0,56 m/sec. (Die im Labor vorhandenen Regelstrecken sind in ihren Werten  $P_0$  und  $v_0$  leicht unterschiedlich). Die Zuluftklappe soll geöffnet sein und die Heizwicklung in Stellung 1 bzw. P2 (je nach Anlagentyp) betrieben werden. Wenn im Folgenden nicht anders angegeben ist, sollen immer die Werte am Arbeitspunkt (Index 0) eingestellt bleiben.

**M1.1** Messen Sie mit einem elektronischen Temperaturfühler die Temperatur des Luftstroms am Arbeitspunkt in °C und notieren Sie die zugehörigen Werte der Messwertgeber ( $u_{y\vartheta 0}$ ,  $u_{yF0}$ ), nachdem sich der stationäre Zustand eingestellt hat.

**M1.2** Wiederholen Sie die Messungen für 40%, 50% und 60% Heizleistung indem Sie für jede Heizleistung die Lüfterspannung auf 60%, 50% und 40% variieren.

**Bei den nachfolgenden Oszillogrammen ist auf eine hohe Auflösung zu achten (größtmögliche Darstellung der Kurven). Um den kleinstmöglichen Messbereich am Oszilloskop wählen zu können, ist der Offset des aufzuzeichnenden Signales mit einer in Serie geschalteten externen Spannungsquelle zu kompensieren.**

**M1.3** Zeichnen Sie die Sprungantworten der Temperatur für Eingangssprünge der Heizleistung von 40% auf 60% und von 60% auf 40% auf.

**M1.4** Zeichnen Sie die Sprungantworten der Temperatur für Eingangssprünge der Lüfterspannung von 40% auf 60% und von 60% auf 40% auf.

## Auswertung

### Stationäres Verhalten

Beziehen Sie sich für die folgenden Aufgaben auf Gl. (3). Gehen Sie davon aus, dass die Heizleistung  $P_{el}$  proportional zur Heizungsansteuerung  $u_{uP}$  und die Strömungsgeschwindigkeit der Luft  $v$  proportional zur Lüfteransteuerung  $u_{uL}$  ist.

Unter Verwendung der gemessenen Werte:

**A1.1** Zeichnen Sie das Kennlinienfeld  $u_{y\vartheta} = f(u_{uP})$  mit  $u_{uL} = 4 \text{ V}$ ,  $5 \text{ V}$ ,  $6 \text{ V}$  als Parameter.

**A1.2** Zeichnen Sie das Kennlinienfeld  $u_{y\vartheta} = f(u_{uL})$  mit  $u_{uP} = 4 \text{ V}$ ,  $5 \text{ V}$ ,  $6 \text{ V}$  als Parameter.

**A1.3** Markieren Sie jeweils den Arbeitspunkt.

**A1.4** Berechnen Sie durch lineare Interpolation die Werte  $u_{y\vartheta}$  und  $u_{uP}$ , die anliegen, wenn die Strecke bei einer Temperatur von  $\vartheta = 46^\circ\text{C}$  betrieben wird (Lüfteransteuerung 50%).

Bei den Messungen wird mit Spannungswerten gearbeitet, sodass für eine Auswertung der Messungen die Heizleistung am Streckeneingang und die Temperatur am Streckenausgang jeweils mit entsprechenden Ansteuer- bzw. Messverstärkungen multipliziert werden müssen. Konkret heißt das, dass Sie bei der Messung der Streckenverstärkung dann mit

$$K_{\text{ges}} = \frac{\Delta u_{y\vartheta}}{\Delta u_{uP}} = K_u \cdot K_S \cdot K_M$$

an Stelle der Streckenverstärkung  $K_S = \frac{\Delta y}{\Delta P_{el}}$  arbeiten. Für eine Umrechnung in physikalische Größen sind dann Ansteuerverstärkung  $K_u = \frac{\Delta P_{el}}{\Delta u_{uP}}$  und die Messverstärkung  $K_M = \frac{\Delta u_{y\vartheta}}{\Delta y}$  wichtig. Wenn Sie die Regelstrecke inklusive Stellgrößen- und Messwertwandlern als eine Einheit betrachten, können Sie  $K_{ges}$  direkt aus den Spannungswerten bestimmen.

**A1.5** Bestimmen Sie aus den Messungen bzw. aus den gegebenen Daten die oben genannte Verstärkung  $K_{ges}$  um den Arbeitspunkt.

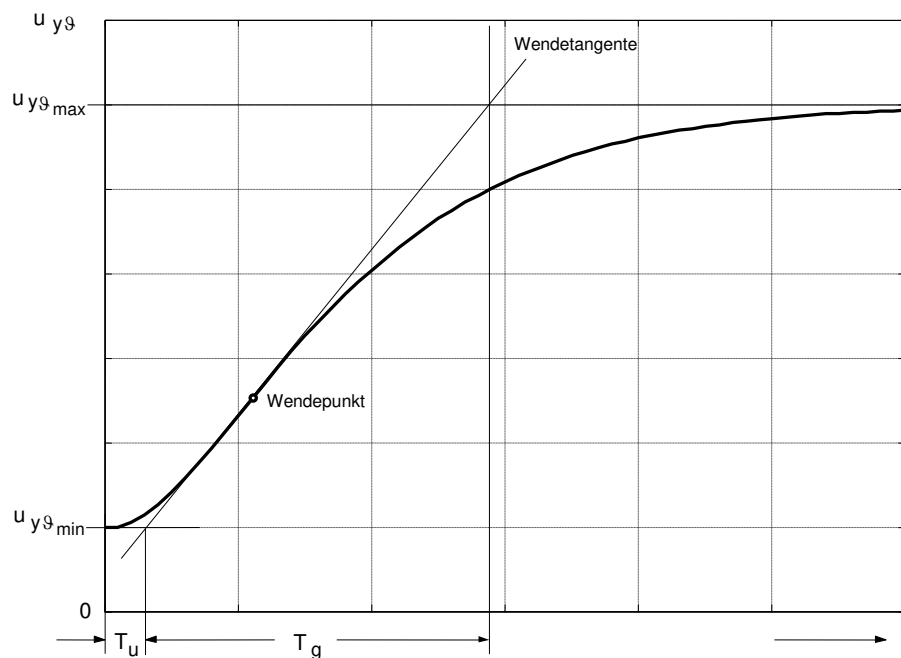
### Dynamisches Verhalten

Für die Regelstrecke soll auf Grund der vorherigen Betrachtungen mit Gl. (14) ein Modell aus P- $T_1$ -Glied mit Totzeit benutzt werden. Dazu werden aus der Sprungantwort  $u_{y\vartheta}(t)$  für einen Sprung der Heizleistung  $u_{uP}(t) = u_{uP0} + \hat{u}_{uP}\sigma(t)$  die Zeitkonstante  $T_S$  und die Totzeit  $T_t$  ermittelt. Hierzu verwenden Sie entweder das unten skizzierte grafische Näherungsverfahren oder einen numerischen Fit der entsprechenden Funktion an die Messdaten.

**A1.6** Bestimmen Sie aus den Sprungantworten  $u_{y\vartheta} = f(t)$  (steigender und fallender Sprung der Heizleistung) die Streckenparameter  $K_{ges}$ ,  $T_S$  und  $T_t$  gemäß Gl. (14).

### Grafisches Näherungsverfahren mit Wendetangente

An die Messdaten kann eine Wendetangente wie folgt skizziert angelegt werden:

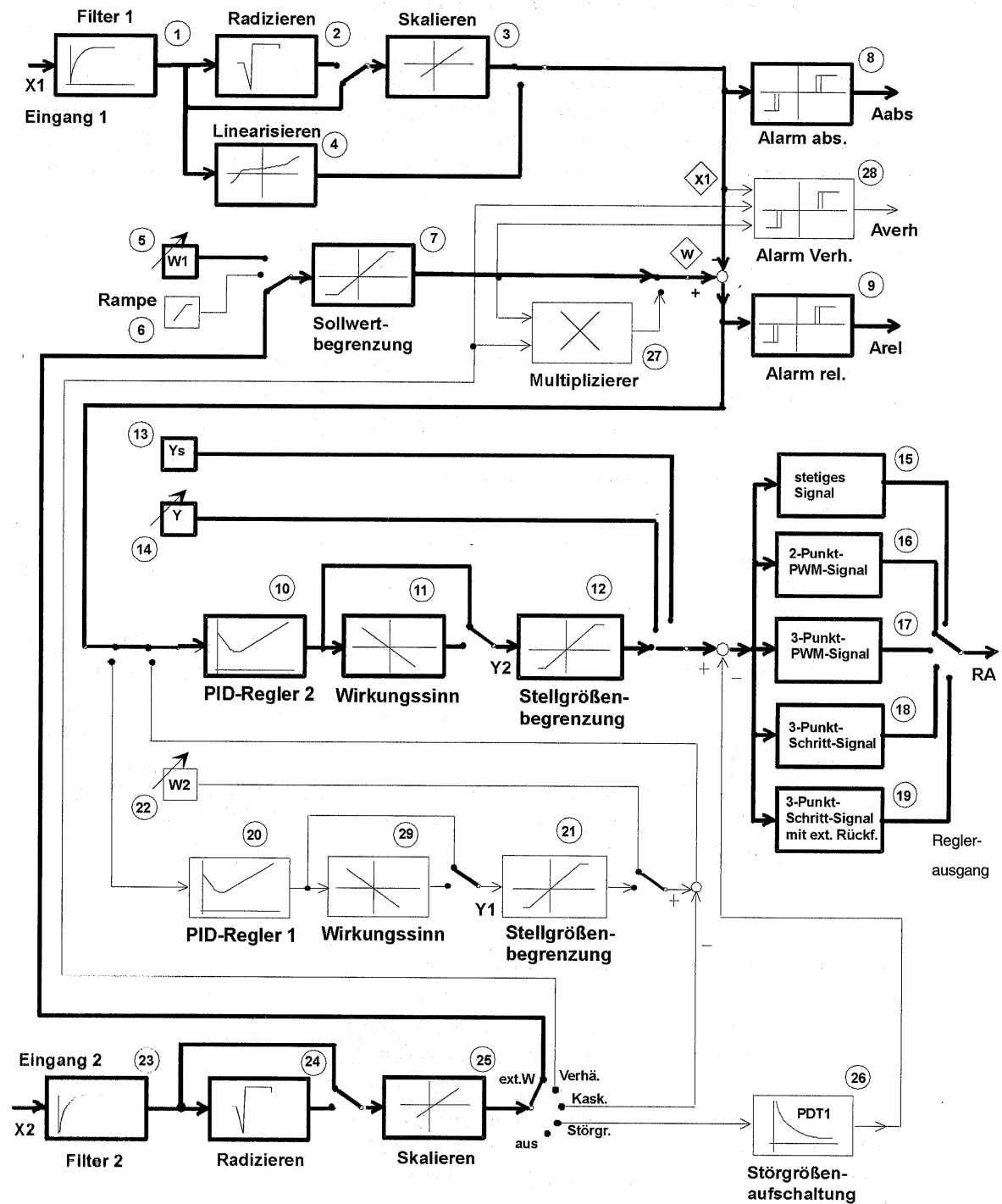


Es ist dann  $T_S = T_g = \text{Ausgleichszeit}$  und  $T_t = T_u = \text{Verzugszeit}$  zu setzen.

## Aufgabe 2: Der Industrieregler

### Allgemeines

Zur Regelung von Prozessen der Verfahrenstechnik werden Industrieregler eingesetzt. Der Aufbau des im Praktikum verwendete Reglers ist in folgenden Blockdiagramm dargestellt.



Typische Regelgrößen sind hier Drücke, Temperaturen, pH-Werte, Volumen- oder Massenströme, Füllstände, Ventilstellungen. Der Regler wird mit dem Prozess über standardisierte analoge Signale (0/4...20 mA, 0...10 V) oder digitale Schnittstellen (z. B. Profibus) verbunden. Intern verfügt ein Industrieregler über einen Mikroprozessor mit D/A- und A/D-Umsetzer. Außer dem digitalen Regelalgorithmus bearbeitet der Prozessor noch die Bedien- und Anzeigeelemente auf der Frontplatte sowie ggf. Schnittstellen zu Leitsystemen. Komplexere Regler besitzen zusätzliche Funktionen wie Mehrreglerstrukturen und Selbstoptimierung.

Der Regler arbeitet quasistetig. Das heißt, obwohl der Regler intern digital (zeit- und wertdiskret) arbeitet, kann man ihn wie einen analogen (zeitkontinuierlichen und stetigen) Regler behandeln. Das wird durch die automatische Wahl einer ausreichend kurzen Abtastzeit und die hohe Auflösung der D/A- und A/D-Umsetzer sichergestellt.

Bei der Reglerauslegung wird das Übertragungsverhalten eines PID-Reglers gerne mit folgender (PID)- $T_1$ -Übertragungsfunktion beschrieben:

$$G_R(s) = \frac{Y(s)}{E(s)} = K_p \frac{1 + \frac{1}{T_n s} + T_v s}{1 + T_s s} \quad (15)$$

Für den hier verwendeten Industrieregler wird die Parametrierung jedoch abweichend anhand folgender PI( $DT_1$ )-Übertragungsfunktion vorgenommen:

$$G'_R(s) = \frac{Y(s)}{E(s)} = K'_p \left( 1 + \frac{1}{T'_n s} + \frac{T'_v s}{1 + T'_v s} \right) \quad (16)$$

Einstellbar sind der Proportionalbeiwert  $K'_p$ , die Nachstellzeit  $T'_n$  und die Vorhaltezeit  $T'_v$ . Die Verzögerung  $T'$  stellt sich intern auf  $T' = T'_v/3$  ein. Durch die Einstellungen auf  $T'_n = 9999$  bzw.  $T'_v = 0$  können wahlweise der I-Anteil oder der D-Anteil außer Funktion gesetzt werden, so dass auch P-, PI- oder P(D- $T_1$ )-Verhalten möglich ist.



## Vorbereitung

**V2.1** Überlegen Sie sich den internen Aufbau der PID-Regler, d. h. skizzieren Sie Blockdiagramme für (15) und (16) unter Verwendung von elementaren Übertragungsgliedern (I, P, D,  $PT_1$ ).

**V2.2** Skizzieren Sie die Sprungantworten von P-, PI- und PID-Regler. Rekapitulieren Sie hierzu die Sprungantworten der verwendeten Übertragungsglieder und setzen Sie die Signale entsprechend zusammen.

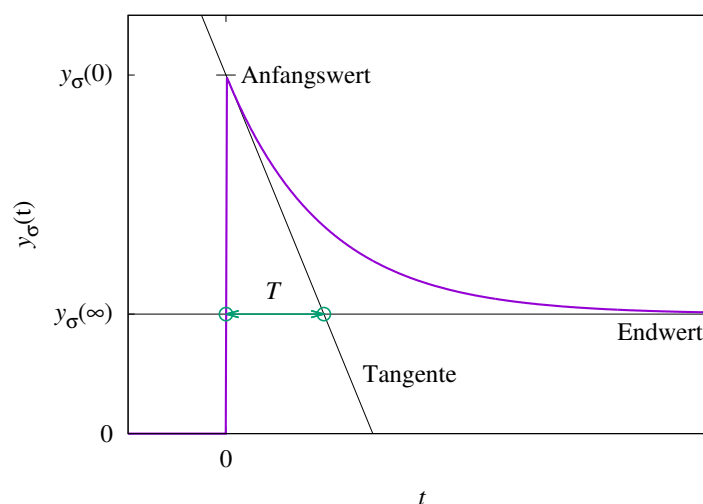
**V2.3** Berechnen Sie einen analytischen Ausdruck für die Sprungantwort des P-( $DT_1$ )-Reglers, dessen Übertragungsfunktion durch

$$G'_R(s) = \frac{Y(s)}{E(s)} = K'_p \left( 1 + \frac{T'_v s}{1 + T'_v s} \right) \quad (17)$$

gegeben ist.

**V2.4** Plotten Sie die Sprungantwort für die Parameter  $K'_p = 2$ ,  $T'_v = 9 \text{ sec}$ ,  $T' = 3 \text{ sec}$ .

**V2.5** Die Sprungantwort sieht wie folgt aus



Überlegen Sie sich, wie Sie die Parameter  $K'_p$ ,  $T'_v$  und  $T'$  des P-( $DT_1$ )-Reglers grafisch bestimmen können unter Verwendung des Tangentenparameters  $T$  sowie Anfangswert  $y_\sigma(0^+)$  und Endwert  $y_\sigma(\infty)$ .

**V2.6** (optional) Berechnen Sie allgemein  $K'_p$ ,  $T'_n$ ,  $T'_v$ ,  $T'$  als Funktionen von  $K_p$ ,  $T_n$ ,  $T_v$ ,  $T$  durch Koeffizientenvergleich der Übertragungsfunktionen (15) und (16), d. h. zeigen Sie, dass (18) gilt.

## Messungen

Lassen Sie sich zunächst in die Bedienung des Industrieregler einweisen.

**M2.1** Parametrieren Sie folgende Regler und nehmen Sie jeweils die Sprungantworten auf:

- P-Regler :  $K'_p = 2$   
 PI-Regler :  $K'_{p'} = 2, T'_n = 9 \text{ sec}$   
 P(DT<sub>1</sub>)-Regler :  $K'_p = 2, T'_v = 9 \text{ sec}, T' = \dots \text{ sec}$   
 PI(DT<sub>1</sub>)-Regler :  $K'_p = 2, T'_n = 9 \text{ sec}, T'_v = 1,5 \text{ sec}$

**M2.2** Parametrieren Sie den Regler als P-Regler mit  $K'_p = 2$ . Speisen Sie den Eingang mit einem Sinusgenerator. Erhöhen Sie die Frequenz am Generator von 0 Hz ausgehend so weit, bis Sie deutlich die Abtastschritte im Ausgangssignal erkennen können. Zeichnen Sie das Ausgangssignal auf und ermitteln Sie, mit welcher Abtastzeit  $T_a$  der Regler intern arbeitet.

Im Folgenden sollen die beiden Regler-Übertragungsfunktionen (15) und (16) in einer Simulation verglichen werden. Die Umrechnung der Parameter kann über folgende Relationen vorgenommen werden:

$$K'_p = K_p \left(1 - \frac{T}{T_n}\right) \quad , \quad T'_n = T_n - T \quad , \quad T'_v = \frac{T_n T_v}{T_n - T} - T \quad , \quad T' = T. \quad (18)$$

Diese Beziehungen können über Koeffizientenvergleich von (15) und (16) hergeleitet werden.

**M2.3** Untersuchen Sie mit Matlab/Simulink<sup>1</sup> die Unterschiede zwischen den Übertragungsfunktionen:

1. Theoretische Übertragungsfunktion (PID)-T<sub>1</sub> (15) mit den Parametern:  $K_p = 2, T_n = 9 \text{ sec}, T_v = 1,5 \text{ sec}, T = T_v/3$ .
2. Reale (Bürkert) Übertragungsfunktion PI(DT<sub>1</sub>) (16) mit den Parametern:  $K'_p = K_p, T'_n = T_n, T'_v = T_v, T' = T$ .
3. Reale (Bürkert) Übertragungsfunktion PI(DT<sub>1</sub>) (16) mit den aus Koeffizientenvergleich ermittelten Parametern, siehe (18).

Simulieren Sie hierzu die Sprungantworten und zeichnen Sie sie in einen gemeinsamen Graphen.

#### <sup>1</sup> Hinweise zu Matlab/Simulink

Die Simulationsparameter von Matlab/Simulink sind wie folgt einzustellen:

Klicken Sie auf → 'Simulation' → 'Model Configuration Parameters', es erscheint das Fenster:

*Configuration Parameters.*

Machen Sie bei den folgenden Unterpunkten die Einträge:

*Solver* → *Solver options*

*Type:* Fixed-step, *Solver:* ode2 (Heun)

*Additional options:* → *Fixed-step size (fundamental sample time):* 0.001 ( $\hat{=}$  Rechenschritte von 1 ms!)

### Auswertung

**A2.1** Entnehmen Sie aus dem Zeitverlauf der Ausgangsgröße des PI-Reglers die Reglerparameter  $K'_p$  und  $T'_n$ .

**A2.2** Entnehmen Sie aus dem Zeitverlauf der Ausgangsgröße des P(DT<sub>1</sub>)-Reglers die Reglerparameter  $K'_p, T'_v$  und  $T'$ , vgl. V2.5. Hinweis: bestimmen Sie die Parameter ohne Verwendung der Annahme  $T' = \frac{1}{3}T'_v$ !

## Aufgabe 3: Die Temperaturregelung

### Allgemeines

Die Austrittstemperatur der Luft soll geregelt werden. Der Industrieregler wird als Temperaturregler eingesetzt, wobei die Heizleistung die Stellgröße ist. Um den Regler einstellen zu können, müssen die Parameter der Strecke bekannt sein. Meistens wird mit einem linearen Modell der Strecke gearbeitet, das zumindest um einen Arbeitspunkt herum näherungsweise gültig ist. Dazu sind unter Aufgabe 1 Messungen an der Regelstrecke gemacht worden.

### Vorbereitung

Gemäß (14) wird erwartet, dass die Regelstrecke das Verhalten eines  $P$ - $T_1$ -Gliedes mit Totzeit hat. Die Sprungantworten aus Aufgabe 1 bestätigen das angenähert. Mit einem grafischen Verfahren wurden aus der realen Sprungantwort die Parameter eines  $P$ - $T_1$ - $T_t$ -Modells ermittelt. Um den Regler mit einem einfachen Verfahren auszulegen, kann durch eine weitere Näherung das Totzeitglied durch ein  $P$ - $T_1$ -Glied ersetzt werden, wenn gilt  $T_t \ll T_S$ : Für die Übertragungsfunktion der Strecke gilt somit

$$e^{-T_t s} \approx \frac{1}{1 + T_t s} \quad \Rightarrow \quad G_S(s) = \frac{U_{y\vartheta}(s)}{U_{uP}(s)} \approx K_{\text{ges}} \frac{1}{(1 + T_S s)} \frac{1}{(1 + T_t s)} \quad (19)$$

**V3.1** Rekapitulieren Sie die Begriffe Arbeitspunkt und Regelkreis. Skizzieren Sie sich den Regelkreis und machen Sie sich die einzelnen Größen wie Führungsgröße, Stellgröße, Regelgröße etc. nochmal klar.

**V3.2** Berechnen Sie den einzustellenden Arbeitspunkt  $u_{y\vartheta}$  und  $u_{uP}$  für  $\vartheta_{\text{soll}} = 46^\circ\text{C}$  bei  $u_{uL} = 5\text{ V}$  (50%) aus Ihren Messdaten von Teil 1, vgl. A1.4.

**V3.3** Leiten Sie (19, linker Teil) her, indem Sie die Exponentialfunktion in eine Potenzreihe entwickeln, die Sie nach dem linearen Glied abbrechen.

**V3.4** Zur Regelung soll ein PI-Regler eingesetzt werden,

$$G_R(s) = K_p \frac{1 + T_n s}{T_n s} \quad (20)$$

Stellen Sie die Führungsübertragungsfunktion  $G_W(s)$  des Temperatur-Regelkreises auf.

**V3.5** Vereinfachen Sie  $G_W(s)$ , indem Sie  $T_n = T_S$  setzen und damit den dominierenden Pol kompensieren.

**V3.6** Bestimmen Sie einen analytischen Ausdruck für die Reglerverstärkung  $K_p$  so, dass der Dämpfungsgrad  $\vartheta = \frac{1}{\sqrt{2}}$  wird. Berechnen Sie  $K_p$  für Ihre im ersten Labortermi bestimmten Streckenparameter (vgl. A1.6), Sie benötigen diesen Wert dann für die Messung im Labor!

**V3.7** Simulieren Sie mit Matlab/Simulink eine Führungssprungantwort des Kreises mit der durchgeführten Dimensionierung. Benutzen Sie für die Strecke das  $P$ - $T_2$ -Modell (19).

**V3.8** Simulieren Sie mit Matlab/Simulink eine Führungssprungantwort des Kreises mit derselben Dimensionierung. Benutzen Sie für die Strecke das  $P$ - $T_1$ - $T_t$ -Modell.

- V3.9** Simulieren Sie eine Störsprungantwort des Regelkreises. Überlegen Sie sich auch, wo die Störung (Änderung Heizleistung) in Ihrem Simulationsmodell sinnvollerweise anzubringen ist.
- V3.10** Bestimmen Sie in den simulierten Sprungantworten jeweils die Amplitude des ersten Überschingers in Prozent.

## Messungen

**Bei den nachfolgenden Oszillogrammen ist auf eine hohe Auflösung zu achten (größtmögliche Darstellung der Kurven). Um den kleinstmöglichen Messbereich am Oszilloskop wählen zu können, ist der Offset des aufzuzeichnenden Signales mit einer in Serie geschalteten externen Spannungsquelle zu kompensieren.**

- M3.1** Berechnen Sie  $u_{y\vartheta}$  und  $u_{uP}$  für  $\vartheta_{\text{soll}} = 46^\circ\text{C}$  und nehmen Sie die Regelstrecke (offener Regelkreis) mit diesen Werten in Betrieb. Lüfteransteuerung  $u_{uL} = 5\text{ V}$  einstellen. Schalten Sie eine Störung zu, indem Sie über den Schalter an der Strecke die Heizwicklung umschalten (Schalterstellung  $1 \rightarrow 0$  bzw.  $P2 \rightarrow P1$ ). Zeichnen Sie die Störsprungantwort auf.
- M3.2** Verbinden Sie den Regler mit der Strecke (geschlossener Regelkreis) und konfigurieren Sie den Regler als *Regler mit externem Sollwert*. Stellen Sie die von Ihnen berechneten Reglerparameter ein. Stellen Sie als Führungsgröße einen Temperatursollwert von  $\vartheta_{\text{soll}} = 46^\circ\text{C}$  ein. Bringen Sie den Regler in die Betriebsart “PROZEß” und “AUTOMATIKBETRIEB”. Beobachten Sie, ob sich die Temperatur auf den Sollwert einstellt.
- M3.3** Schalten Sie eine Störung zu, indem Sie über den Schalter an der Strecke die Heizwicklung umschalten (Schalterstellung  $1 \rightarrow 0$  bzw.  $P2 \rightarrow P1$ ). Nehmen Sie die Störsprungantwort auf. Zeichnen Sie dabei die Regelgröße  $u_{y\vartheta}$  (Temperatur-Istwert) und die Stellgröße  $u_{uP}$  (Reglerausgang) in einem Diagramm auf.
- M3.4** Nehmen Sie eine Führungssprungantwort auf. Der Führungssprung ist dabei vom Arbeitspunkt ausgehend in der Höhe zu setzen, bei dem der Reglerausgang nicht in die Begrenzung geht. Zeichnen Sie dabei die Regelgröße  $u_{y\vartheta}$  (Temperatur-Istwert) und die Stellgröße  $u_{uP}$  (Reglerausgang) in einem Diagramm auf.
- M3.5** Lassen Sie sich eine Bedienungsanleitung für die Funktion “TUNE” des Reglers geben. Wenden Sie gemäß der Bedienungsanleitung die Funktion “TUNE” an, um die Reglerparameter vom Regler selbst ermitteln zu lassen. Nach den getätigten Voreinstellungen am Regler wird die “TUNE-Funktion” mit einem Führungssprung von  $\Delta W = +10\%$  gestartet. Notieren Sie anschließend die neuen Reglerparameter und nehmen Sie wie bei den beiden vorigen Punkten eine Führungs- und Störsprungantwort mit dieser Reglereinstellung auf.

## Auswertung

- A3.1** Überprüfen Sie theoretisch die stationäre Genauigkeit des Regelkreises bei Führungs- und Störانregung mit Hilfe des Endwertsatzes der Laplace-Transformation. Kommt es zu einer bleibenden Regeldifferenz und lässt sich diese Vorhersage durch die Messungen belegen?
- A3.2** Messen Sie in den Führungssprungantworten die Amplitude des ersten Überschingers in Prozent.
- A3.3** Vergleichen Sie die Werte für die ersten Überschinger und kommentieren Sie die Ergebnisse.

## Aufgabe 4: Die Volumenstromregelung

### Allgemeines

- Die Messung des Volumenstroms geschieht über die Erfassung der Druckdifferenz, die die strömende Luft an einer im Rohr befindlichen Messblende hervorruft. Als Stellgröße wird die Lüfterspannung verwendet, die über die Veränderung der Lüfterdrehfrequenz den Volumenstrom beeinflusst.
- Zur Bestimmung der Reglerparameter könnte man sich wie bei der Regelgröße Temperatur auch hier bemühen, die Streckenübertragungsfunktion (näherungsweise) zu bestimmen. Als Variante soll hier jedoch die Reglereinstellung nach den Einstellregeln von Ziegler/Nichols vorgenommen werden. Dabei wird der Regelkreis an seine Stabilitätsgrenze gebracht, um aus den dort gewonnenen Daten die optimale Betriebseinstellung zu finden. Nach einem abgewandelten Verfahren kann der Regler über die Funktion “TUNE” auch selbsttätig seine Betriebseinstellung finden. Diese Funktion soll ebenfalls beobachtet werden.

### Vorbereitung

**V4.1** Informieren Sie sich über die Einstellregeln nach Ziegler/Nichols. Zur Anwendung kommt die Methode für geschlossene Regelkreise.

**V4.2** Nehmen Sie an, eine Regelstrecke habe folgende Übertragungsfunktion:

$$G_S(s) = K_{SF} \left( \frac{1}{1 + Ts} \right)^3.$$

Zur Regelung werde ein P-Regler mit  $G_R(s) = K_p$  eingesetzt. Berechnen Sie die Führungsübertragungsfunktion  $G_W(s)$ .

**V4.3** Simulieren Sie den angegebenen Regelkreis in Matlab/Simulink mit  $T = 1$  sec,  $K_{SF} = 1$  und  $K_p = 2$ . Zeichnen Sie eine Führungs- und eine Störsprungantwort auf. Die Störung soll am Streckeneingang angenommen werden.

**V4.4** Ermitteln Sie experimentell in der Simulation die Stabilitätsgrenze, indem Sie die Reglerverstärkung verändern. Notieren Sie die Reglereinstellung  $K_{p,krit}$  und die Periodendauer  $T_{krit}$  der Schwingungen an der Stabilitätsgrenze.

**V4.5** (optional) Zeichnen Sie eine Wurzelortskurve für die Polstellen der Übertragungsfunktion des geschlossenen Kreises und bestimmen Sie wiederum  $K_{p,krit}$ , vergleichen das Ergebnis mit V4.4.

Hinweis: Bei den hier für die Simulation angegebenen Streckenparametern handelt es sich um **fiktive Beispielwerte**, die von den tatsächlichen Anlagenparametern im Labor abweichen!

**V4.6** Stellen Sie die Störübertragungsfunktion  $G_Z(s)$  für das geregelte System mit P-Regler auf. Skizzieren Sie sich den Regelkreis mit Störung am Streckeneingang (Annahme) und berechnen Sie den Endwert für eine Einheitsstörung mit Hilfe des Endwertsatzes der Laplace-Transformation.

**V4.7** Berechnen Sie den Endwert für das unregelte System (Einheitsstörung nur an Regelstrecke !) mit Hilfe des Endwertsatzes der Laplace-Transformation und bestimmen Sie das Verhältnis bei Störanregung von geregeltem zu unregelm System (als Funktion der Verstärkungen).

## Messungen

- M4.1** Stellen Sie an der Strecke den Arbeitspunkt  $u_{uL} = 5 \text{ V}$  ein. Bestimmen Sie  $u_{yF0}$ .
- M4.2** Verändern Sie die Lüfterspannung auf  $u_{uL} = 4 \text{ V}$  und  $u_{uL} = 6 \text{ V}$  und messen Sie die zugehörigen Volumenströme. Bestimmen Sie aus den gemessenen Werten die Verstärkung  $K_{SF}$  der Volumenstrom-Strecke am Arbeitspunkt.

**Bei den folgenden Messungen sind die Kurvenverläufe mit den jeweils signifikanten Größen (Regel- und Stellgröße) in einem Oszillogramm darzustellen! Auf eine hohe Auflösung der Oszillogramme ist zu achten (größtmögliche Darstellung der Kurven). Um den kleinstmöglichen Messbereich am Oszilloskop wählen zu können, ist der Offset des aufzuzeichnenden Signales, mit einer in Serie geschalteten externen Spannungsquelle zu kompensieren.**

- M4.3** Stellen Sie wieder  $u_{uL} = 5 \text{ V}$  ein. Legen Sie den Hebel an der Zuluftöffnung um und oszillografieren Sie den verminderten Volumenstrom  $u_{yFz}$ .
- M4.4** Verbinden Sie den Industrieregler mit der Strecke zu einer Volumenstromregelung. Konfigurieren Sie den Regler als P-Regler. Stellen Sie den Arbeitspunkt  $y_0 = 50\%$  (am Reglerausgang) ein.
- M4.5** Stellen Sie die Reglerverstärkung so ein, dass Dauerschwingungen entstehen. Oszillografieren Sie die Dauerschwingungen und notieren Sie die Reglereinstellung  $K_{p,krit}$  sowie die Periodendauer  $T_{krit}$  der Schwingungen an der Stabilitätsgrenze.
- M4.6** Stellen Sie den Regler gemäß den Einstellregeln nach Ziegler-Nichols als P-Regler ein. Schließen Sie den Hebel an der Zuluftöffnung und oszillografieren Sie den Einfluss dieser Störung.
- M4.7** Stellen Sie den Regler nun als PI-Regler nach Ziegler-Nichols ein und wiederholen Sie die Aufzeichnung.
- M4.8** Nehmen Sie mit Hilfe der TUNE-Funktion die Einstellung des Reglers vor und vergleichen Sie das jetzige Verhalten mit der Einstellung nach Ziegler-Nichols anhand der zuvor gemachten Oszillogrammen.

## Auswertung

- A4.1** Erstellen Sie während des Versuches ein Dokument mit den Messwerten, Messkurven und Berechnungen, das Sie sich dann als PDF exportieren (Sofortprotokoll). Achten Sie auf lesbare Achsenbeschriftungen und fügen Sie jeweils eine aussagekräftige(!) Bildunterschrift hinzu.
- A4.2** Bestimmen Sie aus den erstellten Oszillogrammen das Verhältnis bei Störanregung von geregeltem zu ungeregeltem System und vergleichen Sie das Ergebnis mit der theoretischen Vorhersage für die passenden Parameter, d. h. Sie setzen in die Gleichungen aus Ihrer Vorbereitung (V4.7) die an der Anlage entsprechend bestimmten Parameter  $K_{SF}$  und  $K_P$  ein!