

15.5 Regelungstechnik

15.5.1 Regelkreis

Im Bild 15.1 ist der geschlossene Wirkungsablauf einer Regelung dargestellt. Die Gesamtheit der Elemente, die an diesem Wirkungsablauf beteiligt sind, bezeichnet man als **Regelkreis**.

Diejenige Größe in einem Regelkreis, die auf einen bestimmten Wert gebracht oder konstant gehalten werden soll, heißt **Regelgröße** x . Der Soll-Wert, den die Regelgröße annehmen soll, wird auch als **Führungsgröße** w bezeichnet. Der Vergleich zwischen dem Soll-Wert und dem Ist-Wert x_i der Regelgröße ergibt die **Regeldifferenz** x_d :

$$x_d = w - x_i \tag{15.1}$$

Das System, auf welches die Störgrößen $z_1 \dots z_n$ einwirken, wird auch als **Regelstrecke** bezeichnet; an ihrem Ausgang steht die Regelgröße x . Die Eingangsgröße y der Regelstrecke wird auch **Stellgröße** genannt; sie bewirkt die beabsichtigte Veränderung der Regelgröße x .

Das Bild 15.13 zeigt den prinzipiellen Aufbau eines Regelkreises. Der Sensor erfasst den Ist-Zustand und gibt den Ist-Wert x_i aus. Der **Regler** formt die Regeldifferenz x_d in die Stellgröße y um.

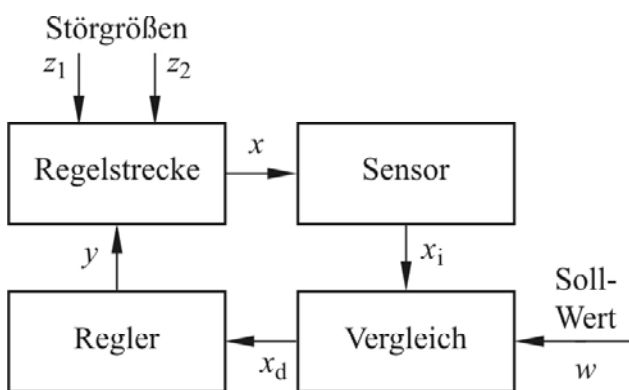


Bild 15.13 Prinzipieller Aufbau eines Regelkreises

Die Elemente des Regelkreises außerhalb der Regelstrecke bilden die **Regeleinrichtung**; im Bild 15.13 gehören hierzu der Sensor, die Vergleichseinrichtung und der Regler. Die Regeleinrichtung ist der informationsverarbeitende Teil der Anlage.

Wir befassen uns im Folgenden ausschließlich mit linearen Systemen, deren Koeffizienten konstant und nicht von der Zeit abhängig sind; derartige Systeme bezeichnet man auch als **zeitinvariant**.

Ein geregeltes System ist durch zwei Eigenschaften gekennzeichnet:

- Das System enthält eine Leistungsverstärkung;
- das System besitzt eine Rückkopplung, weil der Ausgang der Regelstrecke über den Regler mit dem Eingang der Regelstrecke verbunden ist.

Die Leistungsverstärkung ist erforderlich, damit die Regeleinrichtung auf die Regelstrecke einwirken kann.

Bei einer **Festwertregelung** ist der Sollwert konstant oder wird nur in größeren Zeitabständen verändert; man untersucht ein derartiges System dadurch, dass man eine sprunghafte Änderung der Störgröße z annimmt.

Wird dagegen der Sollwert w laufend verändert, so bezeichnet man ihn als **Führungsgröße** und spricht von einer **Folgeregelung**; man untersucht ein derartiges System dadurch, dass man eine sprunghafte Änderung der Führungsgröße w annimmt.

15.5.2 Eigenschaften von Regelstrecken

Die Eingangsgröße jeder Regelstrecke ist die Stellgröße y und die Ausgangsgröße ist die Regelgröße x . Außerdem wirkt die Störgröße z auf die Regelstrecke ein; wir gehen im Folgenden vereinfachend davon aus, dass nur eine einzige Störgröße vorliegt.

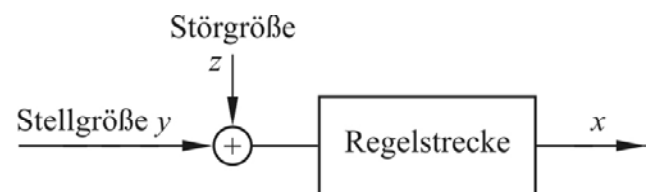


Bild 15.14 Regelstrecke

Die Funktion $x = f(y + z)$ wird als **Übertragungsfunktion** der Regelstrecke bezeichnet.

Bei der Darstellung der unterschiedlichen Arten des Übertragungsverhaltens von Regelstrecken geht man davon aus, dass die Stellgröße y zum Zeitpunkt t_0 vom Wert y_N auf den Wert y_1 springt und bezeichnet die Reaktion der Regelgröße als **Sprungantwort**. Die Störgröße bleibt bei dieser Beschreibung unberücksichtigt, man setzt $z = 0$.

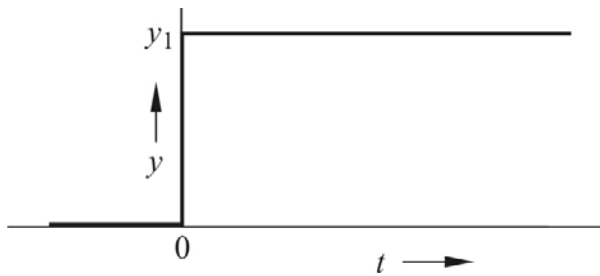


Bild 15.15 Sprung der Stellgröße zum Zeitpunkt $t = 0$ vom Wert $y_N = 0$ auf den Wert y_1

Bei der Sprungantwort gibt es folgende Arten:

- Beim proportionalen Verhalten $x = K_P \cdot y$ springt die Ausgangsgröße auf den Wert $x_1 = K_P \cdot y_1$; man nennt diese Regelstrecke **Proportionalstrecke** oder kurz **P-Strecke**.
- Beim integralen Verhalten $x = K_I \int y dt$ steigt die Ausgangsgröße linear an; man nennt diese Strecke kurz **I-Strecke**.
- Hat die Regelstrecke differenzierendes Verhalten, so steigt die Regelgröße $x = K_D \cdot dy/dt$ kurz an und fällt sofort wieder auf den alten Wert zurück; man nennt diese Strecke auch **D-Strecke**.
- Beim Totzeitverhalten springt die Ausgangsgröße erst nach der **Totzeit** T_t auf den Wert $x = K_P \cdot y$;
- Beim Verzögerungsverhalten ist die Sprungantwort die Lösung einer Differentialgleichung n . Ordnung; man spricht dabei auch von einer **Verzögerungsstrecke** n . Ordnung.

Bei einer Verzögerungsstrecke 1. Ordnung verläuft die Sprungantwort nach einer e-Funktion, deren Tangente im Anfangspunkt auf dem oberen Beharrungswert die Zeitkonstante T_1 abschneidet. Durch sie wird das Zeitverhalten dieser Strecke, die man auch **P-T₁-Strecke** nennt, beschrieben.

Bei einer Verzögerungsstrecke 2. oder höherer Ordnung kann die Sprungantwort auch Schwingungen aufweisen.

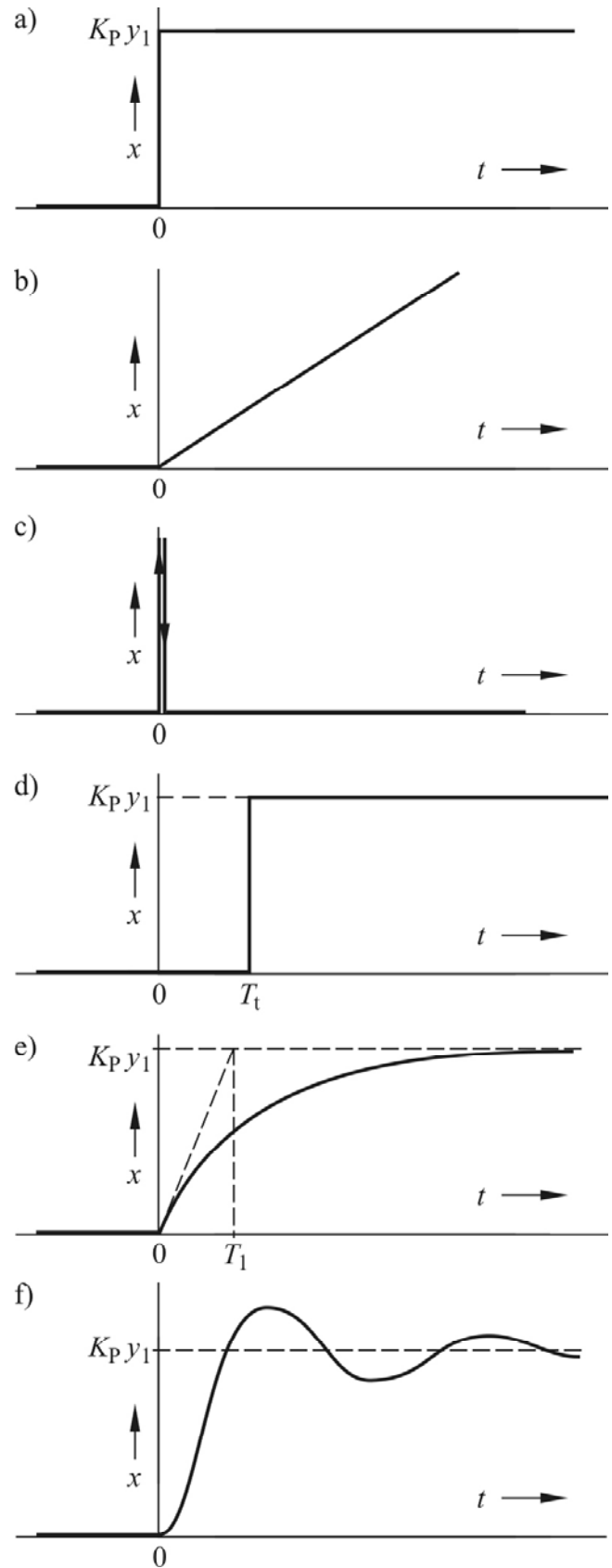


Bild 15.16 Sprungantwort von Regelstrecken: a) proportionales Verhalten; b) integrales Verhalten; c) differenzierendes Verhalten; d) Totzeitverhalten; e) PT₁-Verhalten; f) PT₂-Verhalten mit Schwingung

Die Differenzialgleichung der P-T₁-Strecke lautet:

$$T_1 \frac{dx}{dt} + x = K_P y \tag{15.2}$$

Mit einer derartigen Differenzialgleichung 1. Ordnung haben wir uns bereits im Abschn. 4.7 befasst. Für die Lösung benötigen wir zwei Größen, nämlich den Anfangswert $x = x_A$ für $t = 0$ und den Endwert $x = x_E$ für $t \rightarrow \infty$. Mit der Zeitkonstanten $\tau = T_1$ lautet die Lösung der Gl. (15.2):

$$x = x_E + (x_A - x_E) \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \tag{15.3}$$

Im Bild 15.16e ist $x_A = 0$ und $x_E = K_P y_1$. Eine Verzögerungsstrecke 2. Ordnung, die man auch **P-T₂-Strecke** nennt, wird durch eine Differenzialgleichung 2. Ordnung beschrieben:

$$T_2^2 \frac{d^2x}{dt^2} + T_1 \frac{dx}{dt} + x = K_P y \tag{15.4}$$

Die Lösung dieser Differenzialgleichung kann um den stationären Endwert schwingen oder sich dem stationären Endwert ohne Schwingung annähern; entscheidend hierfür ist der **Dämpfungsgrad** ϑ (griech. Buchstabe theta):

$$\vartheta = \frac{T_1}{2T_2} \tag{15.5}$$

Die Lösung der Gl. (15.4) nehmen wir für y nach Bild 15.15 vor; für $t \rightarrow \infty$ ist $x = x_E = K_P y_1$. Dabei sind die drei Fälle $\vartheta < 1$, $\vartheta = 1$ und $\vartheta > 1$ zu unterscheiden:

- Für $\vartheta < 1$ liegt der **periodische Fall** vor und es ergibt sich eine Schwingung mit der **Eigenfrequenz** (*natural frequency*) f_d , deren Amplitude exponentiell abnimmt; die Lösung lautet:

$$\frac{x}{x_E} = 1 - \left(\cos \omega_d t + \frac{a}{\omega_d} \sin \omega_d t \right) \cdot e^{-at} \tag{15.6}$$

- Für $\vartheta > 1$ liegt der **aperiodische Fall** vor, bei dem *keine* Schwingung entsteht; die Lösung lautet:

$$\frac{x}{x_E} = 1 + \frac{\lambda_2}{2W} \cdot e^{\lambda_1 t} + \frac{\lambda_1}{2W} \cdot e^{\lambda_2 t} \tag{15.7}$$

- Für $\vartheta = 1$ liegt der **aperiodische Grenzfall** vor, bei dem sich die Größe x dem stationären Endwert x_E schneller als bei jedem aperiodischen Verlauf nähert, wobei aber keine Schwingung entsteht; die Lösung lautet:

$$\frac{x}{x_E} = 1 - (1 + at) \cdot e^{-at} \tag{15.8}$$

Das Bild 15.17 zeigt die unterschiedlichen Lösungen; die in den Gln. (15.6 ... 15.8) verwendeten Abkürzungen bedeuten:

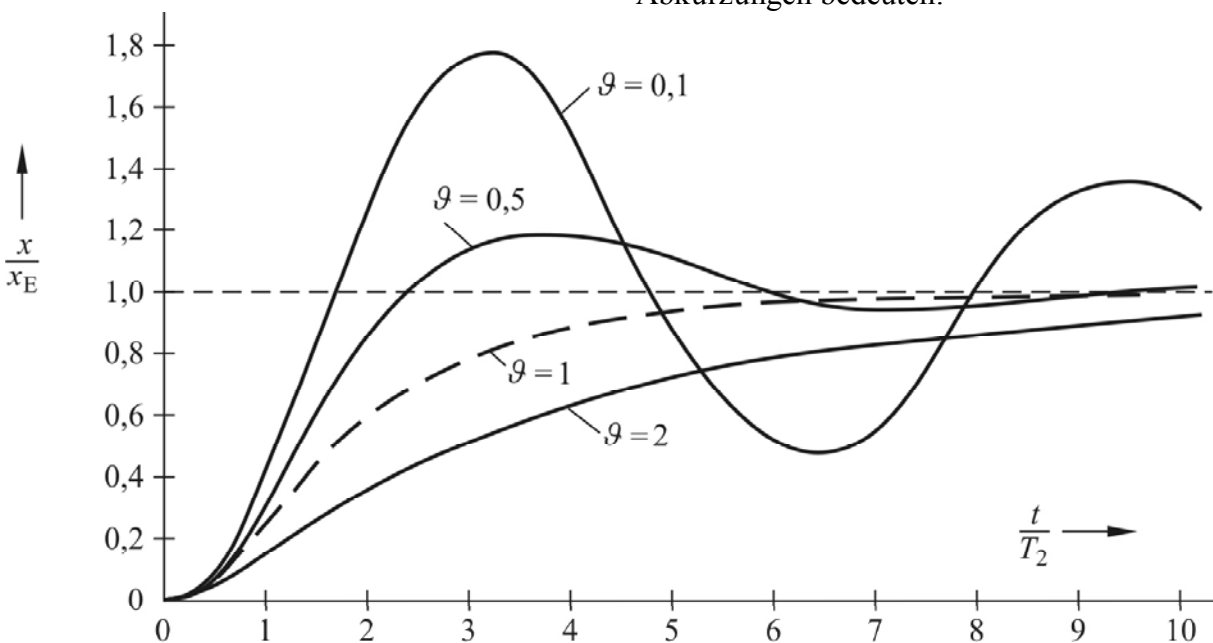


Bild 15.17 Lösungen der Gl. (15.4) für y nach Bild 15.15 und unterschiedliche Dämpfungsgrade

$$a = \frac{T_1}{2T_2^2}; \quad b = \frac{1}{T_2}$$

$$\omega_d = 2\pi f_d = \sqrt{b^2 - a^2} \quad (15.9)$$

$$W = \sqrt{a^2 - b^2}; \quad \lambda_{1,2} = -a \pm W$$

Beim periodischen Fall wird die Differenz zwischen dem Maximum und dem stationären Endwert als **Überschwingweite** \ddot{u} bezeichnet:

$$\ddot{u} = e^{-\pi\vartheta/\sqrt{1-\vartheta^2}} \quad (15.10)$$

Je niedriger der Dämpfungsgrad, desto höher ist die Überschwingweite; so ist z. B. für $\vartheta = 0,5$ die Überschwingweite $\ddot{u} = 0,163$ und für $\vartheta = 0,1$ ist $\ddot{u} = 0,729$ (Bild 15.17).

Strebt die Regelgröße x bei einer sprunghörmigen Änderung der Stellgröße y einem Beharrungswert zu, so spricht man von einer Strecke mit **Ausgleich**; so ist z. B. die P-Strecke eine Strecke mit Ausgleich.

Bei einer Strecke ohne Ausgleich strebt die Regelgröße x keinem Beharrungswert zu, wenn sich die Stellgröße y sprunghörmig ändert; dies ist z. B. bei der Strecke mit integralem Verhalten der Fall.

15.5.3 Regler

Ein **stetiger Regler** erfasst dauernd die Regelgröße x und ermittelt zu jedem Zeitpunkt eine geeignete Stellgröße y ; ein derartiger Regler arbeitet *analog*. Ein *digitaler* Regler tastet dagegen die Regelgröße x zu diskreten Zeitpunkten ab, wonach mit einem Digitalrechner die Stellgröße y berechnet wird.

Nach der Art der vom Regler ausgeführten Operation unterscheidet man drei Grundtypen:

- Beim proportional wirkenden Regler, der auch kurz **P-Regler** genannt wird, ist die Stellgröße y proportional der Regeldifferenz x_d und es gilt:

$$y = K_R \cdot x_d \quad (15.11)$$

- Beim integrierenden Regler, der auch kurz als **I-Regler** bezeichnet wird, ist die zeitliche Ableitung der Stellgröße y proportional der Regeldifferenz x_d und es gilt:

$$\frac{dy}{dt} = \frac{1}{T_I} \cdot x_d \quad (15.12)$$

Wir lösen diese Gleichung nach der Stellgröße y auf:

$$y = \frac{1}{T_I} \int_0^t x_d \cdot dt \quad (15.13)$$

- Beim differenzierenden Regler, der auch kurz **D-Regler** genannt wird, ist die Stellgröße y proportional der zeitlichen Ableitung der Regeldifferenz x_d und es gilt:

$$y = T_D \cdot \frac{dx_d}{dt} \quad (15.14)$$

Die Grundtypen der Regler werden auch zum PI-, PD- oder PID-Regler kombiniert. So gilt z. B. für die Stellgröße des PID-Reglers:

$$y = K_R \cdot x_d + \frac{1}{T_I} \int_0^t x_d \cdot dt + T_D \cdot \frac{dx_d}{dt} \quad (15.15)$$

15.5.4 Simulation des Regelkreises

Beim Regelkreis nach Bild 15.13 nehmen wir einen Aufbau der Regelstrecke nach Bild 15.14 an, bei der nur eine einzige Störgröße auf die Regelstrecke einwirkt. Wir nehmen im Folgenden an, dass die Größen x , y und z sowie x_d , x_i und w bezogene und damit einheitenlose Größen sind. Außerdem nehmen wir den Sensor als ideal an und setzen $x_i = x$.

Außer der Gl. (15.1) wird der Regelkreis durch die Gleichung der Regelstrecke und die Gleichung des Reglers beschrieben.

Ist eine dieser drei Gleichungen eine Differenzialgleichung höherer Ordnung oder eine Integro-Differenzialgleichung wie die Gl. (15.15), so ist die Lösung des Gleichungssystems mit hohem Aufwand verbunden.

Wir ersetzen daher zweckmäßig den Regler, die Regelstrecke und die Vergleichsstelle durch ein elektrisches Modell und analysieren dieses Netz mit Micro-Cap (s. Kap. 8).

Bei der Simulation des Regelkreises stellen wir die Variablen x , y und z sowie x_d , x_i und w als Spannungen dar.

In der Schaltung 15.18 wird die Spannung x_i von der Spannung w subtrahiert; das Ergebnis ist die Spannung x_d . Damit eignet sich die Schaltung 15.18 als Modell für die Vergleichsstelle.

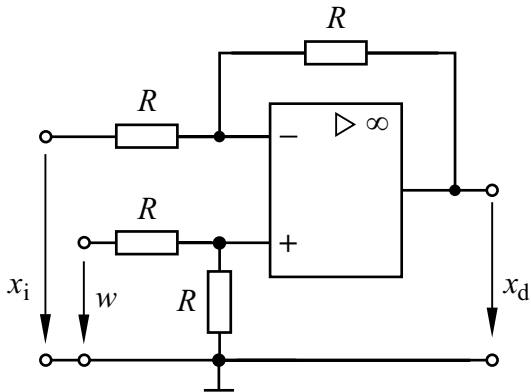


Bild 15.18 Subtrahierer als Modell für die Vergleichsstelle

Ist die Regelstrecke eine P-Strecke ohne Verzögerung, so ist ein leerlaufender Spannungsteiler das geeignete Modell für $K_P < 1$; für $K_P > 1$ verwenden wir zweckmäßig den nicht invertierenden Verstärker (Bild 9.14).

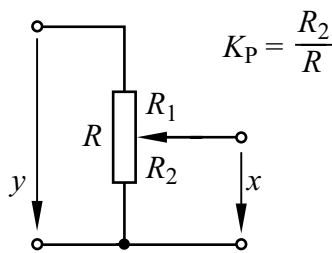


Bild 15.19 Spannungsteiler als Modell für eine P-Strecke ohne Verzögerung

Wird der Spannungsteiler durch eine nachfolgende Schaltung belastet, so sorgen wir durch einen Spannungsfolger dafür, dass die Bedingung für Leerlauf erfüllt ist.

Ist die Regelstrecke eine I-Strecke, so eignet sich der Integrierer nach Bild 9.16 als Modell, dem wir einen invertierenden Verstärker nachschalten. Für die Integrationskonstante gilt:

$$K_I = (RC)^{-1} \tag{15.16}$$

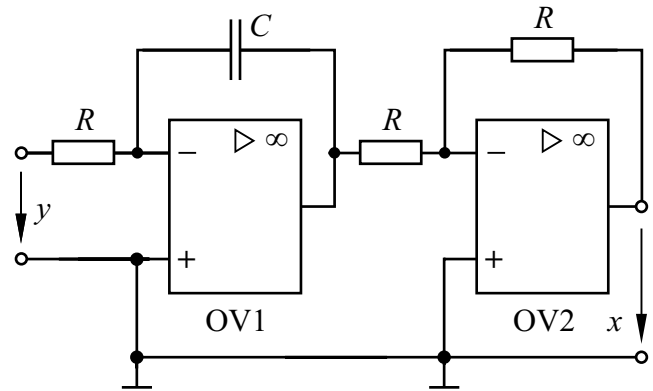


Bild 15.20 Modell für eine I-Strecke

Bei der Simulation einer Schaltung mit einer I-Strecke nach Bild 15.20 ist darauf zu achten, dass die Anfangsbedingung des Kondensators auf den Wert Null eingestellt wird; entsprechendes gilt für die D-Strecke mit der Konstanten:

$$K_D = RC \tag{15.17}$$

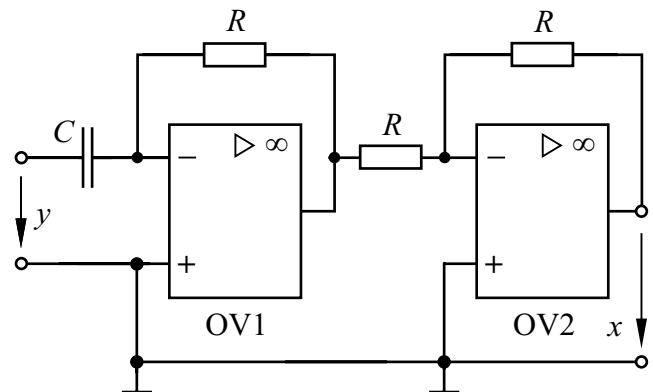


Bild 15.21 Modell für eine D-Strecke

Die Totzeitstrecke modellieren wir mit zwei gesteuerten Schaltern, die nach der Totzeit T_t öffnen

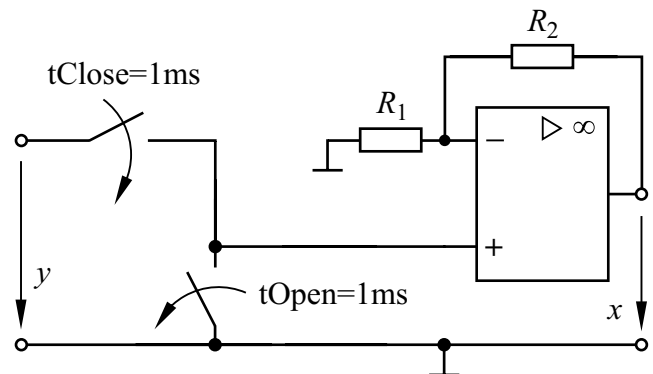


Bild 15.22 Modell für eine Totzeit-Strecke

bzw. schließen. Das P-Verhalten wird im Bild 15.22 für $K_p > 1$ mit einem nicht invertierenden Verstärker erreicht. Bei der P-Strecke haben wir bereits beschrieben, dass sich ein Faktor $K_p < 1$ mit einem Spannungsteiler und einem nachfolgenden Spannungsfölger modellieren lässt.

Die in der Gl. (15.2) beschriebene P-T₁-Strecke wird mit der Schaltung nach Bild 15.23 modelliert. Für die Faktoren der Gl. (15.2) gilt:

$$T_1 = R_2 C_2; K_p = R_2 / R_1 \quad (15.18)$$

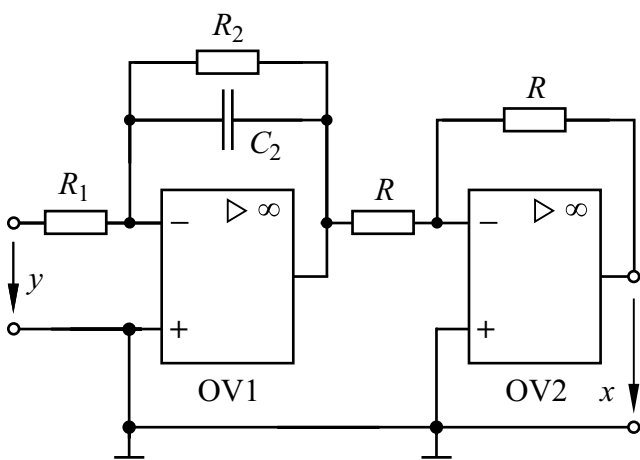


Bild 15.23 Modell der P-T₁-Strecke

Die in der Gl. (15.4) beschriebene P-T₂-Strecke wird mit der Schaltung nach Bild 15.24 modelliert. Für die Faktoren der Gl. (15.4) gilt:

$$T_2 = RC; T_1 = \frac{R^2 C}{R_2}; K_p = \frac{R_1}{R} \quad (15.19)$$

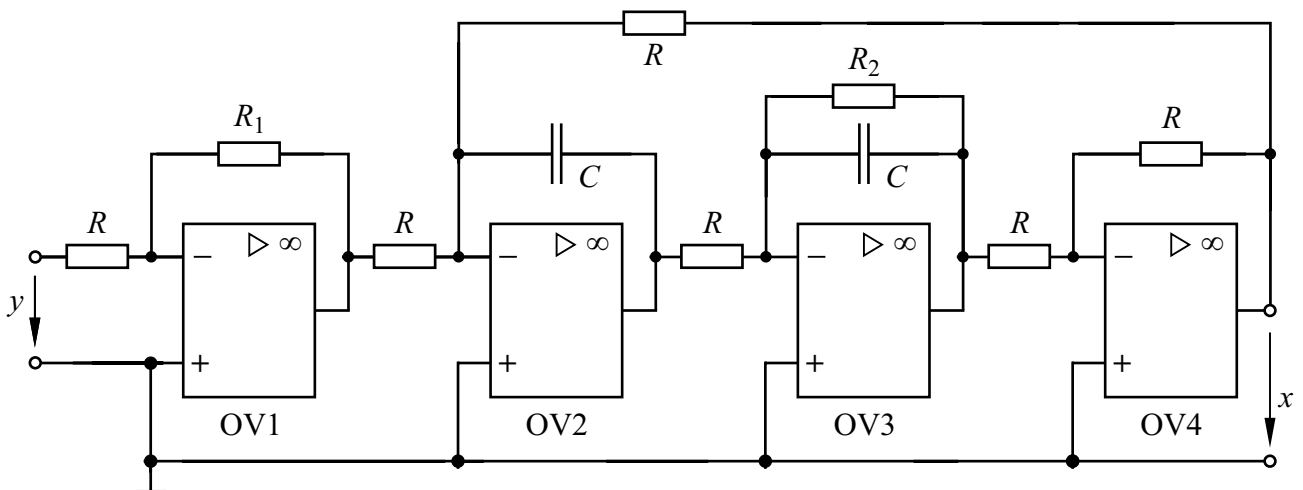


Bild 15.24 Modell der P-T₂-Strecke

Beim Modell des PID-Reglers können die Parameter unabhängig voneinander eingestellt werden.

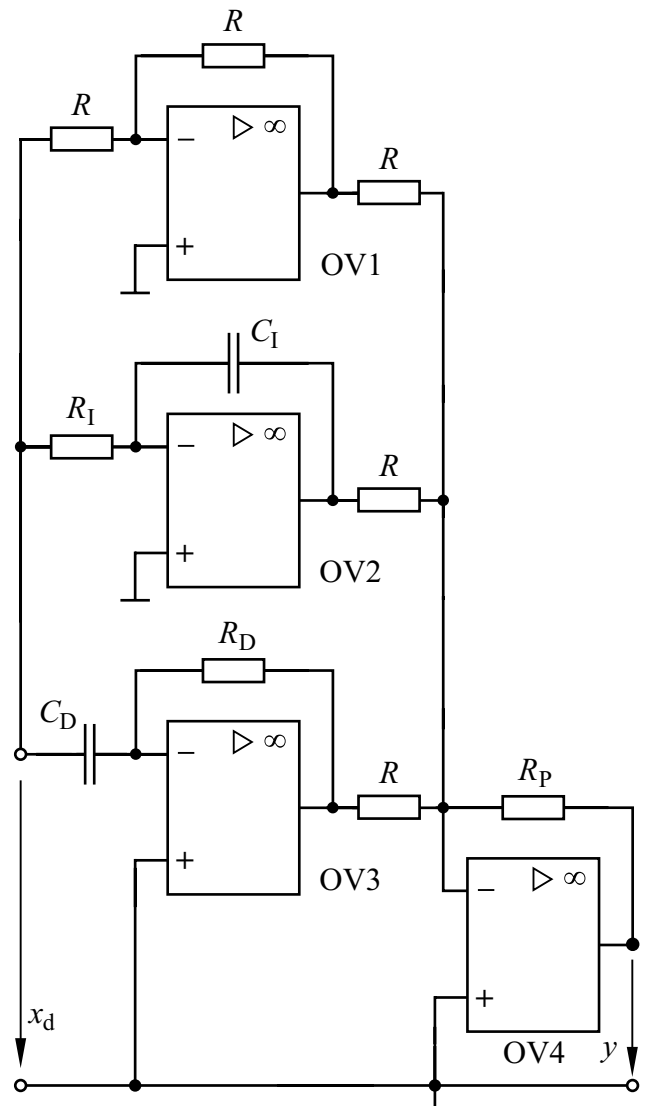


Bild 15.25 Modell des PID-Reglers

Für die Parameter der Gl. (15.15) gilt:

$$K_R = \frac{R_P}{R}; T_I = C_I R_I; T_D = C_D R_D \quad (15.20)$$

Schließt man in der Schaltung 15.25 den Kondensator C_I kurz, so liefert der Integrator keinen Beitrag und der Regler arbeitet als PD-Regler. Schließt man außerdem noch den Widerstand R_D kurz, so liefert auch der Differenziator keinen Beitrag und der Regler arbeitet als P-Regler.

Der Vorteil einer Analyse mit Micro-Cap liegt darin, dass man das Ergebnis für den Zeitbereich erhält und keine mathematischen Operationen erforderlich sind. Von Nachteil ist dagegen, dass man keine allgemein gültigen Aussagen für Regelkreise erhält.

Sind die Daten der Regelstrecke bekannt, so kann man mit einer Micro-Cap-Simulation die geeigneten Daten des Reglers ermitteln. In der folgenden Tabelle sind einige Hinweise zusammengestellt, welche Regler für welche Regelstrecken geeignet sind.

Tabelle 15.1 Auswahl von Reglern (+ geeignet; – ungeeignet)

| Strecke | Regler | | | | |
|---------------------------|--------|---|----|----|-----|
| | P | I | PI | PD | PID |
| P-Strecke | – | + | + | – | – |
| P-T ₁ -Strecke | + | + | + | + | + |
| P-T ₂ -Strecke | + | + | + | + | + |
| P-T ₁ -Strecke | – | + | – | – | – |
| I-Strecke | + | – | + | + | + |

15.5.5 Simulation mit Micro-Cap

Die Leistungsfähigkeit der kostenlosen Demo-Version von Micro-Cap ist nicht nur bezüglich der Art der Bauelemente beschränkt. Auch darf die Anzahl der Bauelemente in der zu simulierenden Schaltung nicht zu hoch sein.

Da jeder Operationsverstärker für seinen Betrieb zwei Quellen benötigt, wollen wir den Aufwand

bei der Simulation dadurch verringern, dass wir für die Modelle der P-T₂-Strecke und des PID-Reglers keine Operationsverstärker, sondern spannungsgesteuerte Spannungsquellen verwenden.

Eine gesteuerte Quelle ist ein Zweitor. Liegt bei der **spannungsgesteuerten Spannungsquelle** (*voltage controlled source*) am Tor 1 eine Spannung U_1 , so entsteht am Tor 2 die Spannung $U_2 = k U_1$.

Bei Micro-Cap findet man die spannungsgesteuerte Spannungsquelle bei Dependent Sources als VofV, sie erhält den Kennbuchstaben E. Wird das Bauelement E an der gewünschten Stelle platziert, so öffnet sich ein Fenster, in dem bei VALUE die gewünschte Verstärkung, also der Faktor k eingestellt werden kann. Klickt man vor der Bestätigung mit OK das Kästchen *Show* an, so wird im Schaltplan der Faktor k unter dem Symbol E angezeigt.

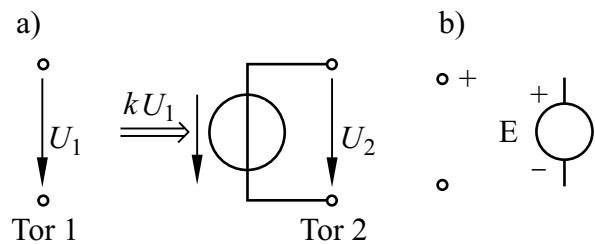


Bild 15.26 Spannungsgesteuerte Spannungsquelle, Schaltzeichen (a) und Symbol in Micro-Cap (b)

Beispiel 15.1

Wir wollen einen Regelkreis untersuchen, der aus einer PT₂-Regelstrecke nach Bild 15.24 und einem P-Regler besteht. Die Regelstrecke mit $g = 1$ und $K_p = 1$ erfährt zum Zeitpunkt $t = 0$ eine sprunghafte Störgrößenänderung.

Für $K_p = 1$ setzen wir die Verstärkung der spannungsgesteuerten Spannungsquelle E1, die dem mit den Widerständen R und R_1 beschalteten Operationsverstärker OV1 im Bild 15.24 entspricht, auf den Wert VALUE = 1. Bei den Quellen E2 und E3 setzen wir VALUE = 200k. Die Quelle E4 entspricht dem mit zwei Widerständen R beschalteten Operationsverstärker OV4, der als Inverter arbeitet; wir setzen bei E4 die Verstärkung auf den Wert VALUE = 1.

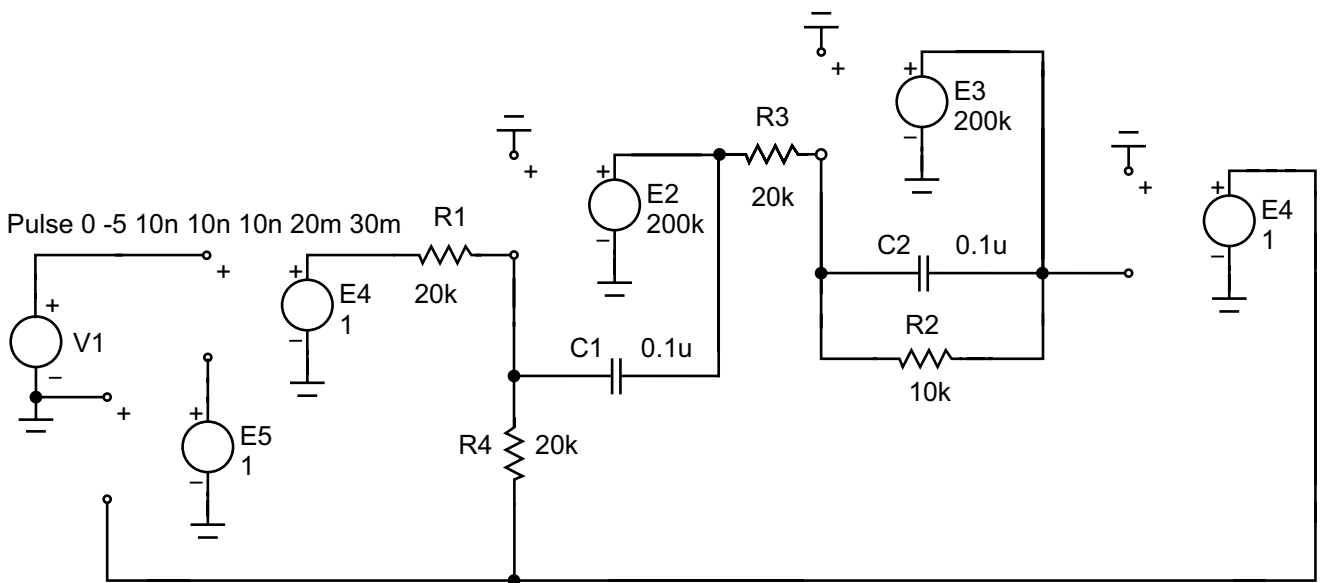


Bild 15.27 Micro-Cap-Modell des Regelkreises zum Beispiel 15.1

Mit $R = 20 \text{ k}\Omega$, $C = 0,1 \text{ }\mu\text{F}$ und $R_2 = 10 \text{ k}\Omega$ hat die Regelstrecke die Werte $T_1 = 1 \text{ ms}$ und $T_2 = 2 \text{ ms}$. Wir verändern die Verstärkung K_R des P-Reglers, die mit der Verstärkung der spannungsgesteuerten Spannungsquelle E5 übereinstimmt.

Der P-Regler ergibt zwar eine Verbesserung gegenüber dem unregulierten Fall, aber es ist nicht möglich, die Wirkung der Störung vollständig zu beseitigen. Macht man K_R größer, so wird die bleibende Regeldifferenz zwar kleiner, aber der Regler fängt an, zu schwingen.

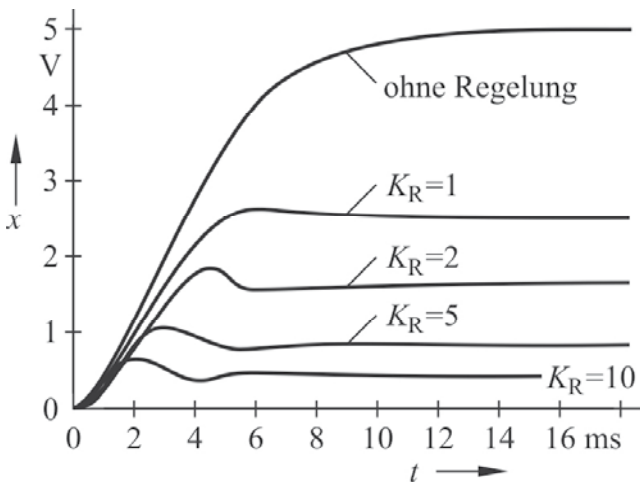


Bild 15.28 Regelgröße einer P-T₂-Regelstrecke nach einer sprungförmigen Störgrößenänderung für unterschiedliche Werte der Regelverstärkung des P-Reglers

Die Regeldifferenz kann mit einem PI-Regler beseitigt werden, der aber etwas verzögert eingreift. Der PID-Regler wirkt einer Störung stärker entgegen. Diese beiden Regler beseitigen die Regeldifferenz restlos.

Beispiel 15.2

Wir wollen untersuchen, wie sich die Anteile eines PID-Reglers bei der sprungförmigen Störgrößenänderung auf die Regelstrecke aus dem Beispiel 15.1 auswirken. Dazu erweitern wir die Schaltung 15.27 um einen D- und einen I-Regler (Bild 15.30).

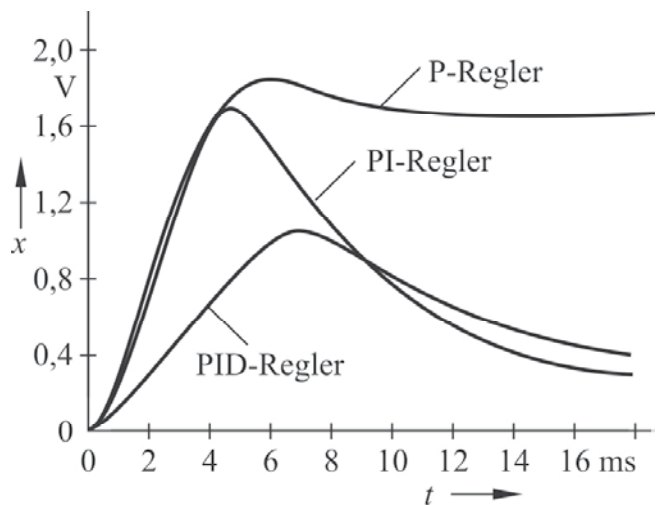


Bild 15.29 Liniendiagramme der Regelgröße für $K_R = 2$, $T_1 = 3 \text{ ms}$ und $T_D = 10 \text{ ms}$

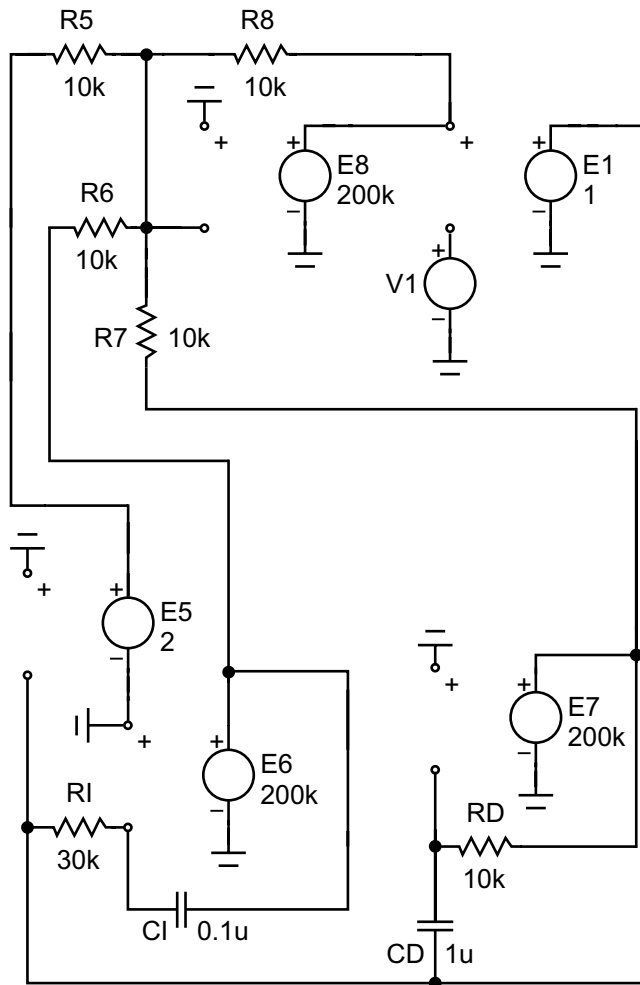


Bild 15.30 Ergänzung der Schaltung 15.27 zum Regelkreis mit PID-Regler

Mit $K_R = 2$ (VALUE E5) und $T_I = C_I R_I = 3$ ms; $T_D = C_D R_D = 10$ ms ergeben sich die im Bild 15.29 dargestellten Liniendiagramme der Regelgröße.

15.5.6 Stabilität von Regelkreisen

Ein Regelkreis stellt ein rückgekoppeltes System dar, weil der Ausgang der Regelstrecke über den Regler mit dem Eingang der Regelstrecke verbunden ist. Überwiegt dabei die Gegenkopplung die Mitkopplung (s. Abschn. 9.4), so arbeitet das System stabil.

Der Begriff **Stabilität** ist folgendermaßen definiert:

Ein System ist stabil, wenn die Systemgrößen aus einem beliebigen Anfangszustand heraus oder nach einem beliebigen Anstoß innerhalb bestimmter Grenzen bleiben.

Es gibt Kombinationen von Regelstrecke und Regler, bei denen von vornherein bekannt ist, dass sie nicht stabil arbeiten; dazu gehören z. B. ein I-Regler an einer I-Strecke und ein P-Regler an einer Totzeitstrecke. Aber auch bei einem PI-Regler kann ein zu großer P- oder I-Anteil zu einer Instabilität des Regelkreises führen.

Eine Prüfung der Stabilität mit mathematischen Methoden (z. B. mit der LAPLACE-Transformation oder dem NYQUIST-Kriterium) ist aufwendig. Bei unserer Simulation mit Micro-Cap kann man eine Instabilität problemlos erkennen.

Beispiel 15.3

Wir wollen untersuchen, bei welcher Zeitkonstanten T_I der PI-Regler mit $K_R = 1$ an die Grenze der Stabilität kommt.

Wie die Gl. (15.15) zeigt, ist der I-Anteil des PI-Reglers umso größer, je kleiner die Zeitkonstante T_I ist. Bei $K_R = 1$ schwingt der Regler mit $T_I = 1$ ms schon ziemlich heftig, aber die Schwingungen klingen ab; in der Praxis ist der Regler dabei bereits unbrauchbar. Für $T_I = 0,5$ ms klingt die Schwingung der Regelgröße nicht mehr ab und der Regler ist instabil.

15.5.7 Auswahl des Reglers

Zur Erzielung eines guten Ergebnisses muss der Regler auf das Zeitverhalten der Regelstrecke abgestimmt sein. Die Suche geeigneter Parameter K_R , T_I und T_D kann bei bekannten Werten der Regelstrecke schon einigermaßen aufwendig sein.

Ist die Regelstrecke bei unbekanntem Wert gegeben, so gibt es Einstellregeln, die von vornherein zu stabilen Einstellungen führen. Hierzu verweisen wir auf die Fachliteratur (z. B. Langmann, Taschenbuch der Automatisierung).

Analoge Regler werden zunehmend durch digitale Regler ersetzt. Der Regelkreis muss um Wandler zur Umformung der Regel- und der Stellgröße erweitert werden; außerdem wird ein Halteglied benötigt, das den Stellwert während der Abtastzeit festhält. Dies ist in der Fachliteratur beschrieben.