

Leseprobe aus Kapitel 2 ‚Einführung in die Regelungstechnik‘ des Buchs

‚Strukturbildung und Simulation technischer Systeme‘

Weitere Informationen zum Buch finden Sie unter

strukturbildung-simulation.de

1.1 Schaltende (unstetige) Regelungen

Schaltende Regler steuern die Regelstrecke im Prinzip **verlustlos** durch das Ein- und Ausschalten der Leistungs-Zu- und Abfuhr. Die Folge dieser drastischen Leistungs-Dosierung sind ständige Schwankungen des Istwerts um den Sollwert (Struktur-Instabilität).

Schaltende Regelungen sind ungenauer als proportionale Regelungen. Was das konkret heißt, soll durch Simulation untersucht werden.

Der Zweipunkt-Regler

Besonders in älteren Anlagen sind Schalt-Regler noch sehr verbreitet, denn der technische Aufwand ist gering. Beispiele: Bimetall- und Thermostat-Schalter

Heute verfügt man über schnelle, elektronische Schalter

- Transistoren und Festkörper-Relais (Solid-State-Relais SSR) für Gleichstrom und
- Triacs und elektronische Last-Relais (ELR) für Wechselstrom.

Mit ihnen lassen sich verlustarme, quasi-proportionale Regelungen realisieren.

Beispiele für elektronische Temperatur- und Beleuchtungs-Regelungen finden Sie im Band 5/7 dieser ‚Strukturbildung und Simulation technischer Systeme‘.

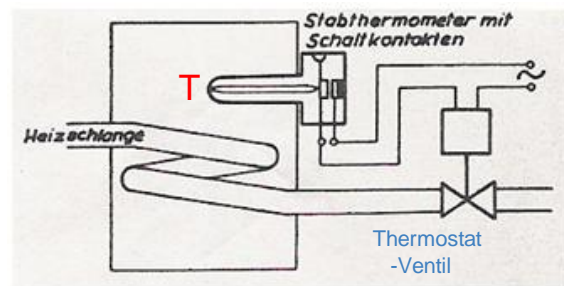


Abb. 2-100 Elektromechanische Temperaturregelung eines Brauchwasser-Kessels mittels Thermostat-Ventil: es öffnet die Heizung, wenn die Temperatur kleiner als der Sollwert ist.

Zweipunkt-Regler schalten die Leistung der Regelstrecke ein, wenn der Istwert den Sollwert unterschreitet und schaltet sie wieder ab, wenn der Istwert den Sollwert überschreitet.

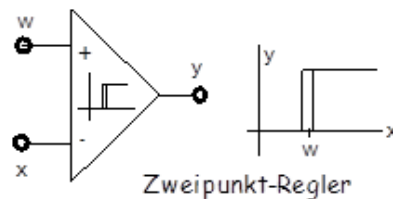


Abb. 2-101 Zweipunkt-Regler: Symbol und Kennlinie

- Zweipunkt-Regler sind immer dann angebracht, wenn die Regelgröße von selbst in eine Richtung tendiert (z.B. Abkühlung) und keine besondere Genauigkeit gefordert ist, z.B. bei Raum-Heizungen.
- Die **Hysterese** macht den Regler ungenauer, verhindert aber das Flackern, wenn sich der Istwert in der Nähe des Sollwerts befindet. Sie soll so klein wie möglich, aber so groß wie nötig eingestellt werden.

1.1.1 Die Zweipunkt-Regelung

Zweipunkt-Regler werden zur Temperatur-Stabilisierung eingesetzt. Wenn der Sollwert größer als die Umgebungs-Temperatur ist, muss die Regelstrecke nur beheizt werden. Abkühlen muss sie sich von allein. Damit das nicht zu lange dauert, muss die Kühlung ständig vorhanden sein. An sie muss die Heiz-Leistung P_{Hzg} angepasst werden. Je größer sie ist, desto schneller kürzer schaltet der Regler auf EIN. Ist P_{Hzg} zu klein, funktioniert die Regelung nicht.

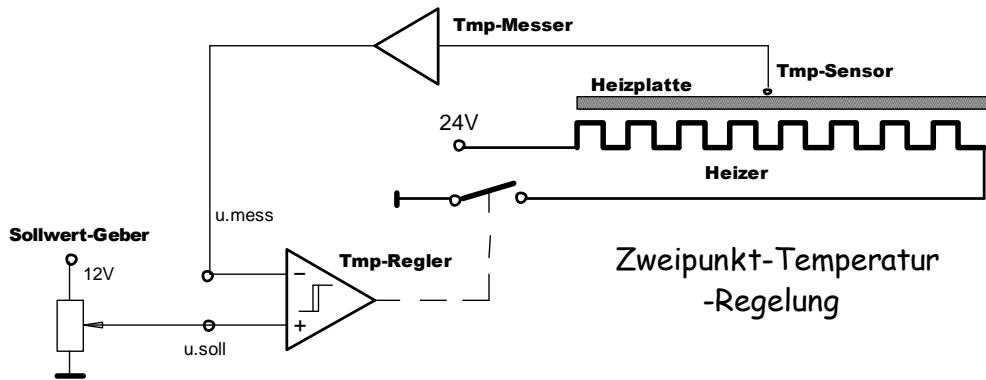


Abb. 2-102 Zweipunkt-Regelung der Temperatur einer Heizplatte

Zu klären ist,

- Wie groß die Temperatur-Schwankungen bei Zweipunkt-Regelung?
- Was bestimmt Schalt-Frequenz?

Daraus soll dann eine Regel zur Einstellung der Hysterese des Zweipunkt-Reglers abgeleitet werden.

Temperatur-Steuerung

Voraussetzung für den Einsatz schaltender Regler sind träge Regelstrecken. Sie bilden den Mittelwert der zugeführten Leistung.

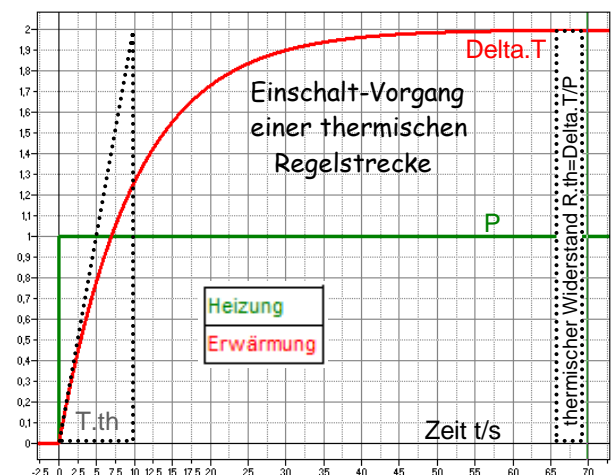
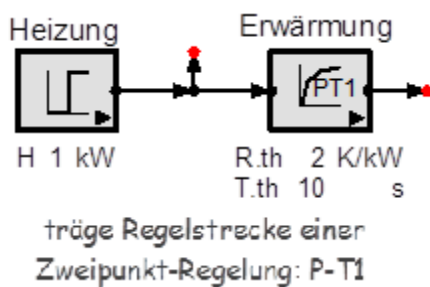


Abb. 2-103 Der thermische Widerstand R_{th} und die thermische Zeitkonstante T_{th} lassen sich aus einer Sprung-Antwort (Einschalt-Vorgang) ermitteln.

Zur Simulation der Zweipunkt-Regelung benötigt man

- den thermischen Widerstand $R_{\text{th}} = \Delta T / P_{\text{Hzg}}$ (in K/W) für die statische Erwärmung und
- die thermische Zeitkonstante T_{th} (in s) für den zeitlichen Verlauf der Erwärmung (e-Funktion).
- Aus $T_{\text{th}} = C_{\text{th}} \cdot R_{\text{th}}$ folgt die thermische Kapazität $C_{\text{th}} = T_{\text{th}} / R_{\text{th}}$ der Regelstrecke. Auch sie werden wir zur Simulation des Zeit-Verhaltens benötigen.

Die Struktur der Zweipunkt-Regelung zeigt ihre Einzelheiten:

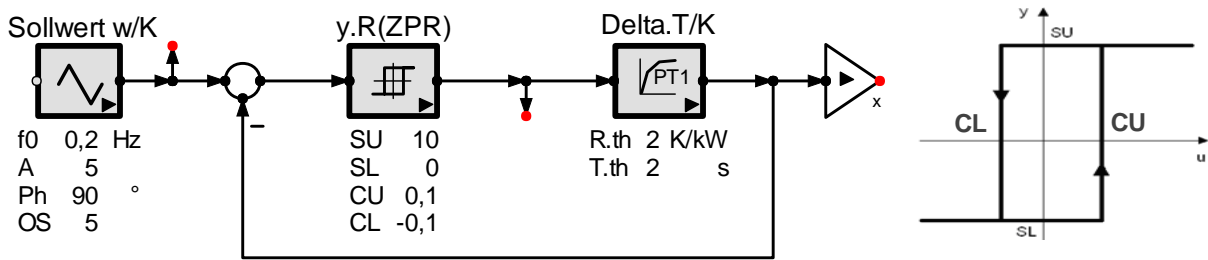


Abb. 2-104 Die Struktur einer Zweipunkt-Regelung: Seine Aussteuerung wird durch SU (oberer Wert) und SL (unterer Wert) eingestellt. CU und CL ist die zugehörige Hysterese.

Der Einschalt-Vorgang

Nach dem Einschalten eines Sollwerts soll sich der Istwert x noch außerhalb der der Hysterese des Reglers befinden. Dadurch schaltet der Regler die Strecke ein. Dann läuft der Istwert x mit Höchst-Geschwindigkeit in Richtung Sollwert. Befindet sich x innerhalb der Hysterese schaltet der Regler die Leistungszufuhr ab. Dann ist die Strecke sich selbst überlassen. Eine Zweipunkt-Regelung macht nur dann Sinn, wenn sich der Istwert ohne Leistungs-Zufuhr in die entgegengesetzte Richtung bewegt. Dann schaltet der Regler ständig aus und ein. Dadurch oszilliert der Istwert um den Sollwert.

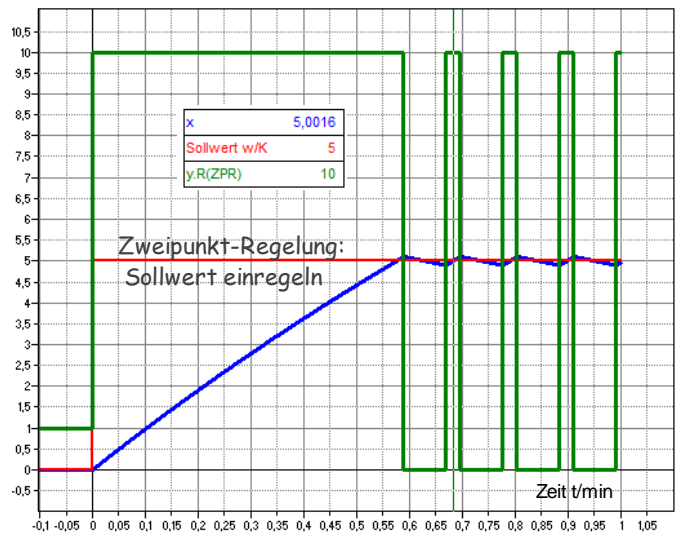
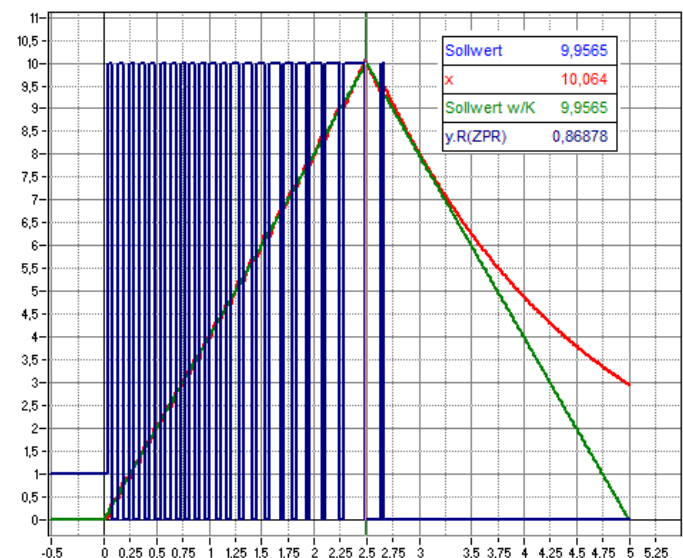


Abb. 2-105 Der Einschalt-Vorgang bei Zweipunkt-Regelung

Zweipunkt Nachlauf-Regelung

Zum Test der Zweipunkt-Regelung wird ein linear ansteigender und abfallender Sollwert vorgegeben. Bei langsamem Anstieg ändert sich das **Tast-Verhältnis** EIN/(EIN+AUS) des Reglers. Dadurch steigt die mittlere Leistung und die Erwärmung folgt dem Sollwert. Der Regler sorgt für die Genauigkeit. Bei fallenden Sollwerten schaltet er AUS. Dann sinkt die Temperatur von selbst.

Abb. 2-106 die Arbeitsweise einer Zweipunkt-Regelung bei linearem Anstieg und Abfall des Sollwerts



Damit der Istwert dem ansteigenden Sollwert folgt, vergrößert der Zweipunkt-Regler das Tast-Verhältnis der Stellgröße wie ein Pulsbreiten-Modulator. Bei sinkendem Sollwert schaltet er ab.

Zweipunkt-Regelung mit wechselnder thermischer Last

Obwohl die Wirkungsweise leicht zu verstehen ist, ist ihre Struktur so kompliziert, dass wir Kenntnisse benötigen, die erst in späteren Kapiteln vermittelt werden.

Simuliert werden soll folgender Fall:

1. Die Regelstrecke wird von außen gekühlt
2. Die äußere Kühlung fällt weg.

Gesucht werden das Schalt-Verhalten des Zweipunkt-Reglers und der Temperatur-Verlauf über der Zeit. Die folgende Struktur zeigt den Algorithmus dazu:

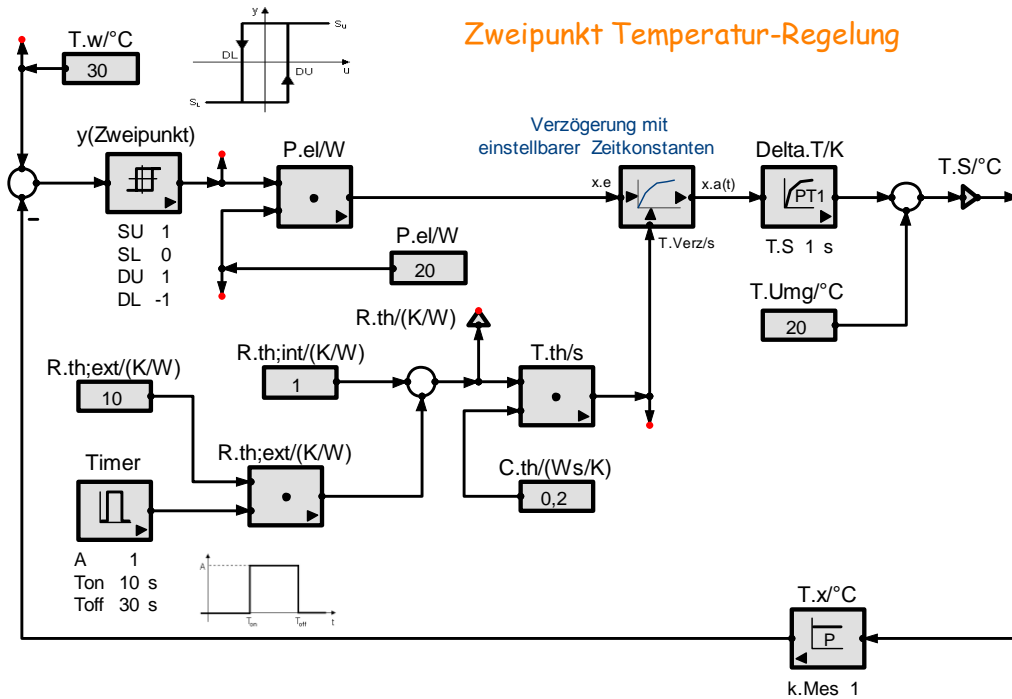


Abb. 2-107 Zweipunkt Temperatur-Regelung bei wechselnder Kühlung

Zur Simulation einer wechselnden Kühlung muss der thermische Widerstand der Regelstrecke von klein ($R_{th;int}$) auf groß ($R_{th;int} + R_{th;ext}$) umgeschaltet werden. Dadurch ändert sich die thermische Zeitkonstante $T_{th} = C_{th} \cdot R_{th}$. Das lässt sich beim Block ‚Verzögerung mit einstellbarer Zeitkonstanten‘ verwenden. Seine interne Struktur wird im Kapitel 3 beim Thema ‚Integration‘ erklärt.

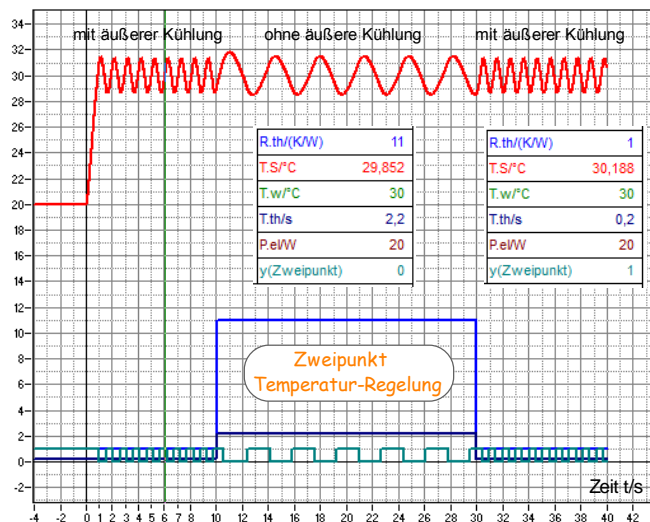


Abb. 2-108 Der Temperatur-Verlauf bei Zweipunkt-Regelung mit und ohne externe Kühlung

Hysterese und Regelabweichung

Bei Schalt-Reglern ist die Hysterese ein freier Parameter. Nun soll ihr Einfluss auf die Schalt-Frequenz und Regelabweichung untersucht werden. Daraus kann dann eine Einstell-Empfehlung abgeleitet werden.

Allgemein gilt:

1. Die Hysterese bestimmt die maximale Regelabweichung.
2. Je größer sie eingestellt wird, desto langsamer schaltet der Regler.

Die Einstellungen zur Simulation einer Zweipunkt-Regelung:

- Sollwert w von 0 bis x_{\max} ;
- Hysterese $Hyst \ll y.R$

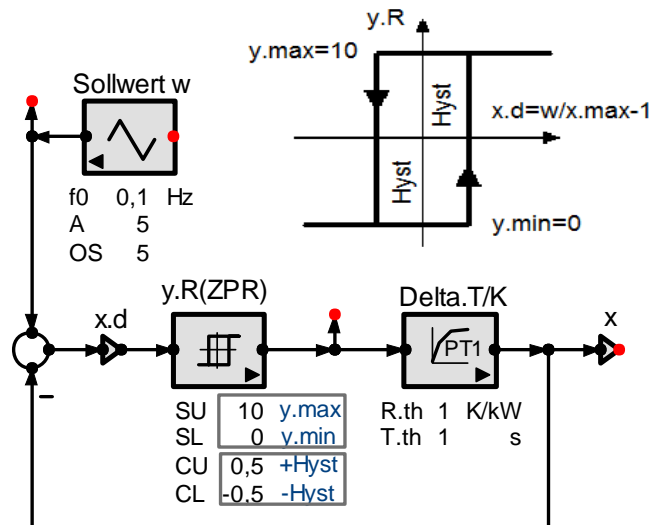


Abb. 2-109 Test einer Zweipunkt-Regelung durch eine Dreiecks-Funktion

Das Simulations-Ergebnis für einen linear ansteigenden und abfallenden Sollwert:

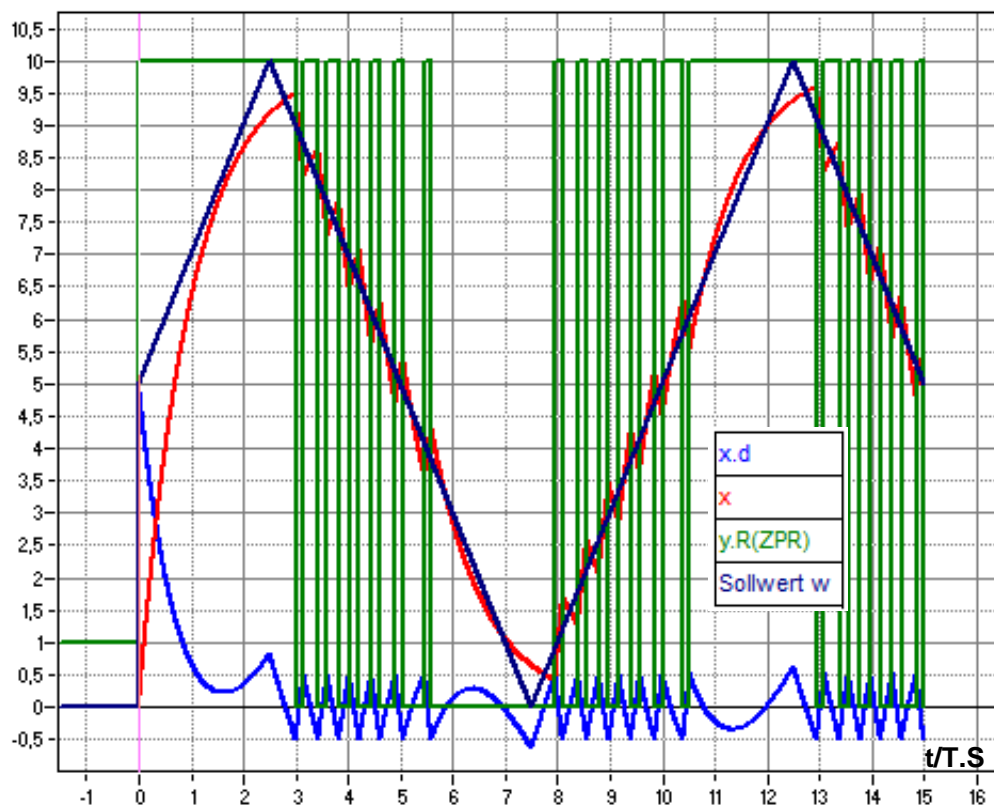


Abb. 2-110 Die Simulation zeigt die Variation des Tast-Verhältnisses (t_{on}/t_0) bei steigendem Sollwert und das Abschalten des Reglers bei fallendem Sollwert

Schalt-Frequenz und Regelabweichung

Die Einschaltzeit t_{on} und die Ausschaltzeit t_{off} sind proportional zu $T.S$ und $Hyst$ und variieren mit der relativen Sollwert w/x_{max} . Wie – hat der Autor durch eine Excel-Analyse der Struktur von Abb. 2-109 ermittelt.

Die nebenstehende Abbildung zeigt die Ergebnisse:

- Bei $w \rightarrow 0$ ist der Regler ständig ausgeschaltet.
- Bei $w \rightarrow 1$ ist der Regler ständig eingeschaltet.
- Bei $w = x_{max}/2$ sind Ein- und Ausschaltzeiten gleich groß und minimal.

Dieses erwünschte Verhalten wird durch Anpassung der Nennleistung des Reglers an die der Strecke erreicht.

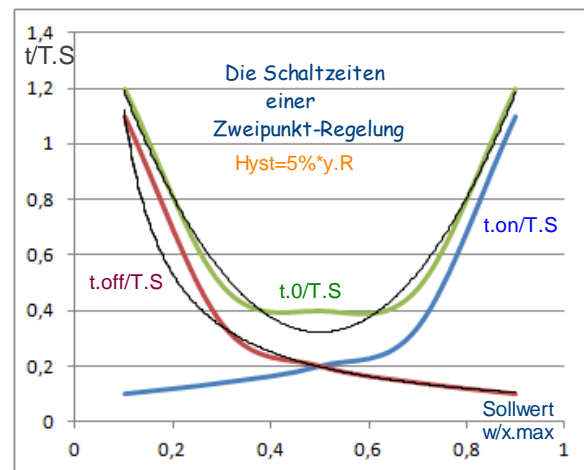


Abb. 2-111 Ein und Ausschalt-Zeiten einer Zweipunkt-Regelung nach Abb. 2-109

Berechnung der Schaltzeiten eines Zweipunkt-Reglers

Den Ingenieur interessiert, ob und wie er die Schaltzeit $t_0 = t_{on} + t_{off}$ des Reglers beeinflussen kann, denn davon hängt die Genauigkeit der Regelung ab. Die Excel-Analyse hat gezeigt, dass t_{on} und t_{off} vom relativen Sollwert w/x_{max} abhängen.

Die **AUS-Zeit** t_{off} als Funktion des Sollwerts w :

$$t_{off} \approx T.S * Hyst * (x_{max}/w)$$

Wenn der Sollwert w von 0 bis 1 variiert, ändert sich t_{off} von $T.S * Hyst$ bis ∞

Die **EIN-Zeit** t_{on} als Funktion des Sollwerts w :

$$t_{on} \approx T.S * \frac{Hyst}{1 - w/x_{max}}$$

Die **Oszillations-Periode** $t_0 = t_{on} + t_{off}$ als Funktion des Sollwerts w :

$$t_0 \approx T.S * Hyst * F(w/x_{max})$$

Wenn der Sollwert w von 0 bis 1 variiert, ändert sich t_0 von ∞ bei $w=0$ über ein Minimum wieder bis ∞ bei $w=x_{max}$. Das Minimum der **Aussteuerungsfunktion** $F(w/x_{max})$ liegt bei $w/x_{max}=50\%$

$$F(w/x_{max}) = \frac{1}{(w/x_{max}) * (1 - w/x_{max})}$$

Wenn der Sollwert w von 0 bis x_{max} geändert wird, variiert die Oszillations-Frequenz $f_0 = 1/t_0$ von 0 über ein Maximum bei $w/x_{max}=0,5$ ($\rightarrow F_{max}=4$) wieder bis 0.

Die maximale Oszillations-Frequenz $f_{0;max} = 4/(T.S * Hyst)$ kann durch die Hysterese $Hyst$ eingestellt werden. **Ohne Hysterese ginge die Schalt-Frequenz gegen unendlich** und die Regelabweichung gegen null.

Bei größeren äußeren Störungen auf die Regelstrecke kann $Hyst$ nicht so weit wie nötig verkleinert werden. Dann bestimmen die Störungen die Frequenz und Regelabweichung der Zweipunkt-Regelung. Technisch ist dies unerwünscht.

Beeinflussbar ist die Frequenz eines Schalt-Reglers durch Mit- und Gegenkopplung. Das ist das nächste Thema.

1.1.1.1 Zweipunkt-Regler mit Rückführung

Bei Zweipunkt-Regelungen bestimmen die Verzögerungen der Regelstrecke die Schaltfrequenz und damit die Genauigkeit. Beides möchte der projektierende Ingenieur jedoch selbst bestimmen – wie er es vom Pulsweiten-Modulator kennt. Das ist beim Zweipunkt-Regler ebenfalls möglich, wenn man ihm eine Rückkopplung gibt:

- Mitkopplung vermindert die Schaltfrequenz und vergrößert die Amplituden der Regelgröße.
- Bei Gegenkopplung ist es umgekehrt: die Schaltfrequenz wird größer und die Regelabweichung kleiner. Bei zu starker GK erlischt das Schaltverhalten.

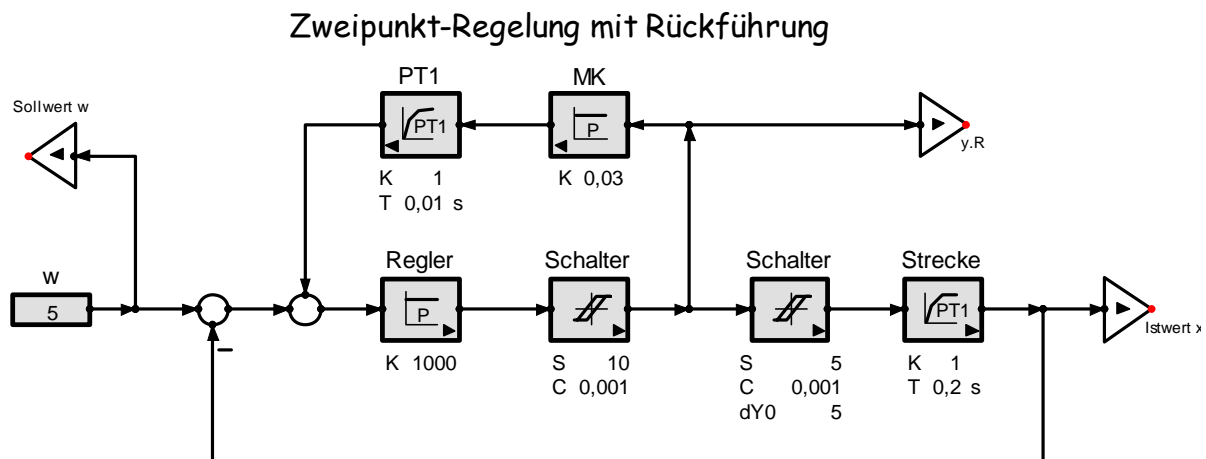


Abb. 2-112 Zweipunkt-Regelung mit Rückkopplung: Zweipunktregelung mit Mitkopplung. Je größer sie gemacht wird, desto langsamer schaltet der Regler.

Die folgende Abbildung zeigt das Schalt-Verhalten eines Zweipunkt-Reglers:

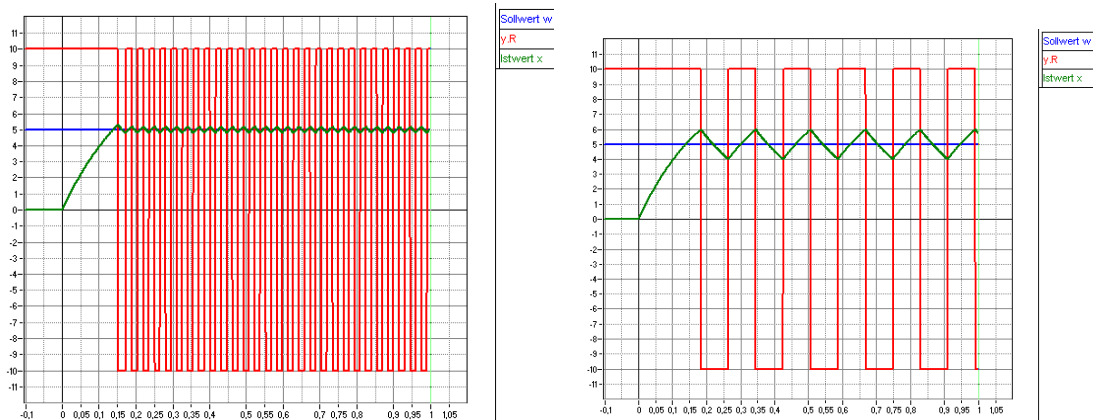


Abb. 2-113 Das Schaltverhalten der Zweipunkt-Regelung: links schwache und rechts stärkere Mitkopplung.

1. Mitkopplung vergrößert die Hysterese. das bedeutet niedrigere Schalt-Frequenz und größere Regelabweichung.
2. Gegenkopplung verkleinert die Hysterese. das bedeutet höhere Schalt-Frequenz und kleinere Regelabweichung.

Durch Mit- oder Gegenkopplung der Schalt-Regelung hat es der Anwender in der Hand einzustellen, wie oft der Regler schaltet und wie genau seine Regelung arbeitet.

Elektronischer Zweipunkt-Regler mit einstellbarer Rückkopplung

Die Realisierung elektronischer Schalt-Regler erfolgt durch Operations-Verstärker. Wie sie funktionieren entnehmen wir Kapitel 8 unter ‚Der Operations-Verstärker als Schalter‘.

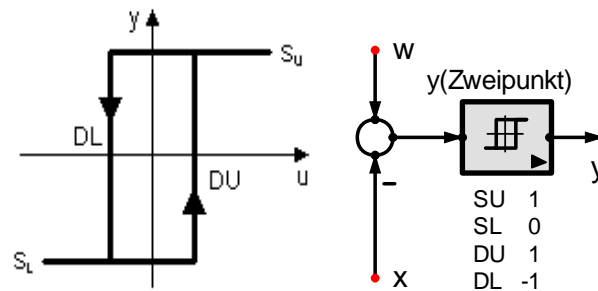


Abb. 2-114 Ein elektronischer Schalter mit Differenz-Eingängen und einstellbarer Hysterese soll elektronisch realisiert werden.

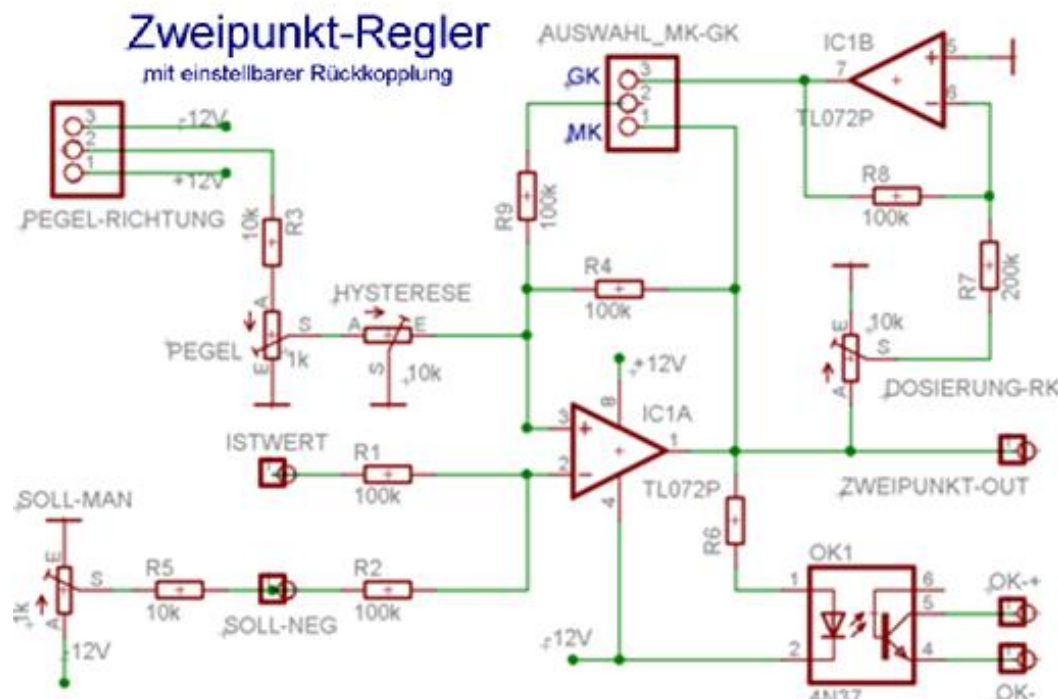


Abb. 2-115 Vielseitiger elektronischer Zweipunkt-Regler: Einsteller für Sollwert, Hysterese und Rückführung als Mit- oder Gegenkopplung

Die Funktionen eines Zweipunkt-Reglers mit einstellbarer Rückkopplung:

- Realisiert werden soll ein elektronischer Schalter mit Differenz-Eingängen für den Sollwert w und den Istwert x .
- Der Sollwert w und die Hysterese sollen manuell einstellbar sein.
- Die mit- oder Gegenkopplung des Reglers soll per ‚Jumper‘ wählbar und dosierbar sein.

Zur Realisierung:

1. Die Mitkopplung über R4 erzwingt das Schalt-Verhalten.
2. Die Schalt-Hysterese wird durch den variablen Widerstand ‚Hysterese‘ eingestellt.
3. Falls der Istwert x einen Gleich-Anteil (Offset) hat, kann er durch das Pegel-Potentiometer kompensiert werden.
4. Der Sollwert kann per Hand durch ein Potentiometer oder als elektrische Spannung vorgegeben werden.
5. Über Das Dosierungs-Potentiometer wird die Rückkopplung variiert.
6. An den Auswahl-Pins kann die Mit- oder Gegenkopplung festgelegt werden.