

Unstetige Regler: Zweipunktregler, Dreipunktregler

1. Zweipunktregler

a) Allgemeines

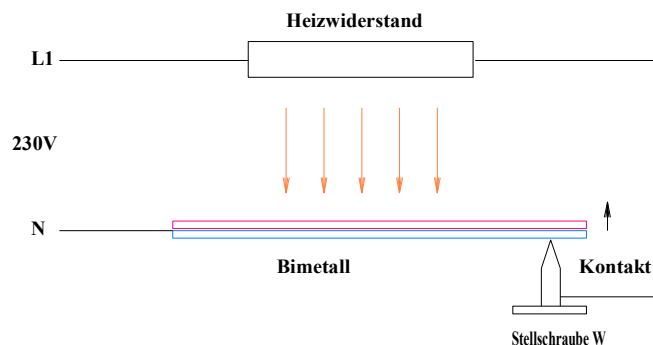
Prinzip

Die Stellgröße kann nur 2 Werte annehmen (Ein / Aus)

Vorteile

- Wegen des einfachen Aufbaus ist der Regler billig.
- Die Verlustleistung des Stellgliedes ist oft viel kleiner als im analogen Betrieb.
- In mechanischer Ausführung als Bimetallschalter (Thermostat) braucht der Regler keine Hilfsenergie.

Beispiel: mechanischer Zweipunktregler mit Temperaturstrecke



Bei tiefer Temperatur ist der Kontakt, bestehend aus Bimetall und Stellschraube, geschlossen. Es fließt Strom, der Heizwiderstand wird warm.

Bei steigender Temperatur hat das Bimetall eine zunehmende Tendenz, sich nach oben durchzubiegen. Bei einer bestimmten Temperatur öffnet der Kontakt und der Heizwiderstand wird ausgeschaltet.

Je nach der von der Stellschraube ausgeübten Spannung liegt der Schalterpunkt anders (Einstellung des Sollwertes).

Hier wird keine Hilfsenergie benötigt.

Die Regeleinrichtung mit Sollwertsteller, Vergleichler und Regler besteht aus Bimetall, Kontakt und Stellschraube.

Anwendung

Temperaturregelung bei trägen Strecken (Raumheizung, Kühlschrank, Boiler, LötKolben, Kochherd, Bügeleisen...)

Problem: Schleichende Kontaktgabe und fehlende Hysterese

Beim Öffnen des Kontaktes entsteht ein Lichtbogen. Die Kontakte brennen mehr oder weniger schnell ab. Um dieses Problem zu vermeiden sollte der Kontakt sehr schnell öffnen und schließen.

Um die Schalthäufigkeit zu verringern (weniger Abnutzung) sollte das Schaltglied eine Hysterese haben.

Springschaltung

Eine Feder oder ein Magnet halten den Kontakt unter Spannung, so dass eine gewisse Kraft zum Öffnen nötig ist.

Die Kontakte öffnen und schließen schlagartig: es funkt weniger, dies erhöht die Lebensdauer der Kontakte.

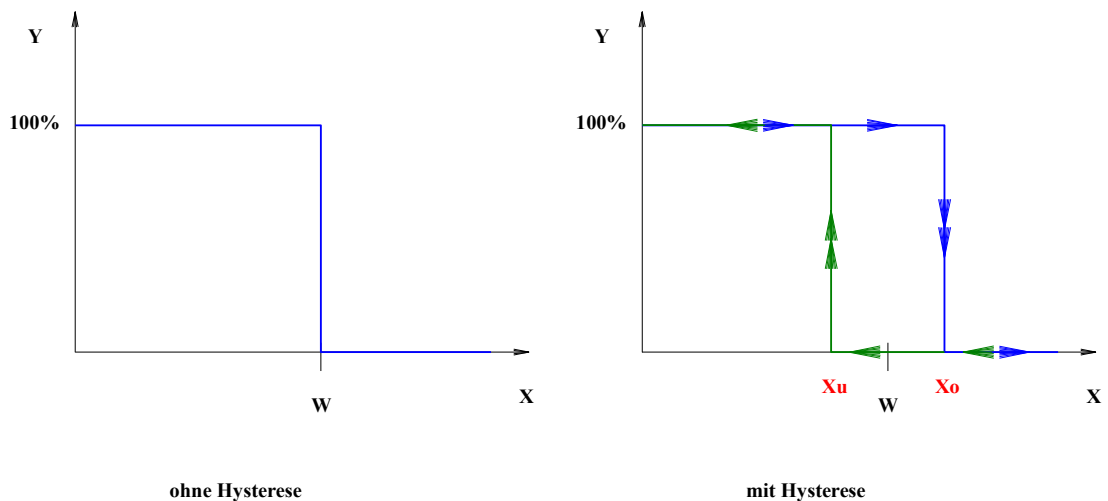
Das Ein- und Ausschalten erfolgt bei unterschiedlichen Werten der Regelgröße. Die Differenz dieser beiden Werte ist die **Schaltdifferenz** oder **Hysterese** X_{sd} .

Bei einer elektronischen Realisierung sind die Entsprechungen:

Schleichende Kontaktgabe:	Komparator
Springschaltung:	Schmitt-Trigger

b) Kennlinie des Zweipunktreglers mit Sollwertsteller

Wir betrachten hier die Kennlinie der Regeleinrichtung, bestehend aus Sollwertsteller, Vergleichler und Zweipunktregler. Bei mechanischen Reglern bildet diese eine Einheit.



Regler ohne Hysterese:

Beim Überschreiten des Sollwertes wird ausgeschaltet, beim Unterschreiten wird eingeschaltet.

Regler mit Hysterese:

Nach dem Anfahren wird eingeschaltet, X steigt an bis zur oberen Schaltschwelle X_o , bei der ausgeschaltet wird. Wenn X noch weiter ansteigt (z.B. aufgrund einer Totzeit), bleibt ausgeschaltet.

Irgendwann fällt X wieder. Die Stellgröße bleibt aber null, auch beim Unterschreiten der oberen Schaltschwelle.

Erst beim Unterschreiten der unteren Schaltschwelle X_u schaltet der Regler wieder ein.

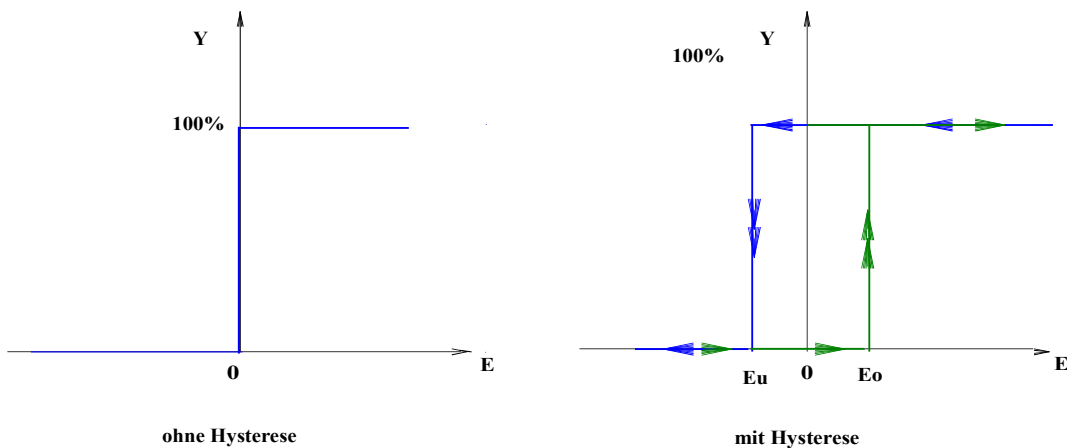
Die **Hysterese** oder **Schaltdifferenz** X_{sd} ist die Differenz der oberen und unteren Schaltschwelle:

$$X_{sd} = X_o - X_u$$

c) Kennlinie des Zweipunktreglers (ohne Sollwertgeber und Vergleicher)

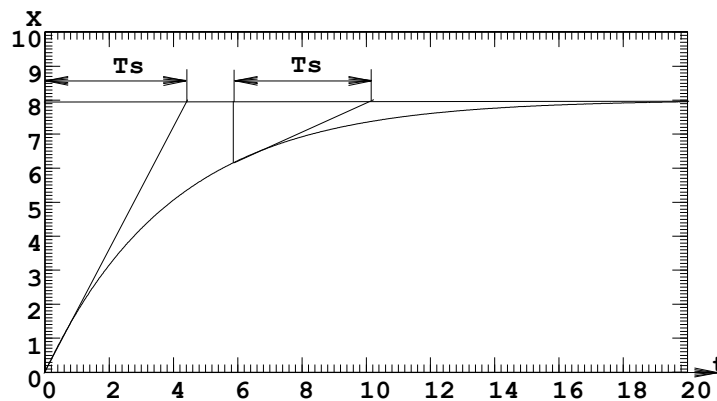
Bei der Simulation oder der elektronischen Realisierung begegnet man dem „nackten“ Zweipunktregler ohne Vergleicher und Sollwertsteller. Dieser hat als Eingangssignal nicht die Regelgröße X , sondern die Regeldifferenz $E = W - X$.

Die Kennlinie ist also horizontal gespiegelt und um den Sollwert W verschoben:



d) Zwischenbemerkung über die Exponentialfunktion

Zur Konstruktion des nächsten Beispiels benötigen wir eine Eigenschaft der Exponentialfunktion: alle Subtangenten sind gleich lang, die Länge beträgt eine Zeitkonstante.



d) Führungsverhalten eines Zweipunktreglers mit Hysterese beim Anfahren

Beispiel:

PT1-Tt - Strecke mit Zweipunktregler (Sprungantwort siehe Diagramm).

Strecke: $T_s = 5\text{s}$, $T_t = 1\text{s}$

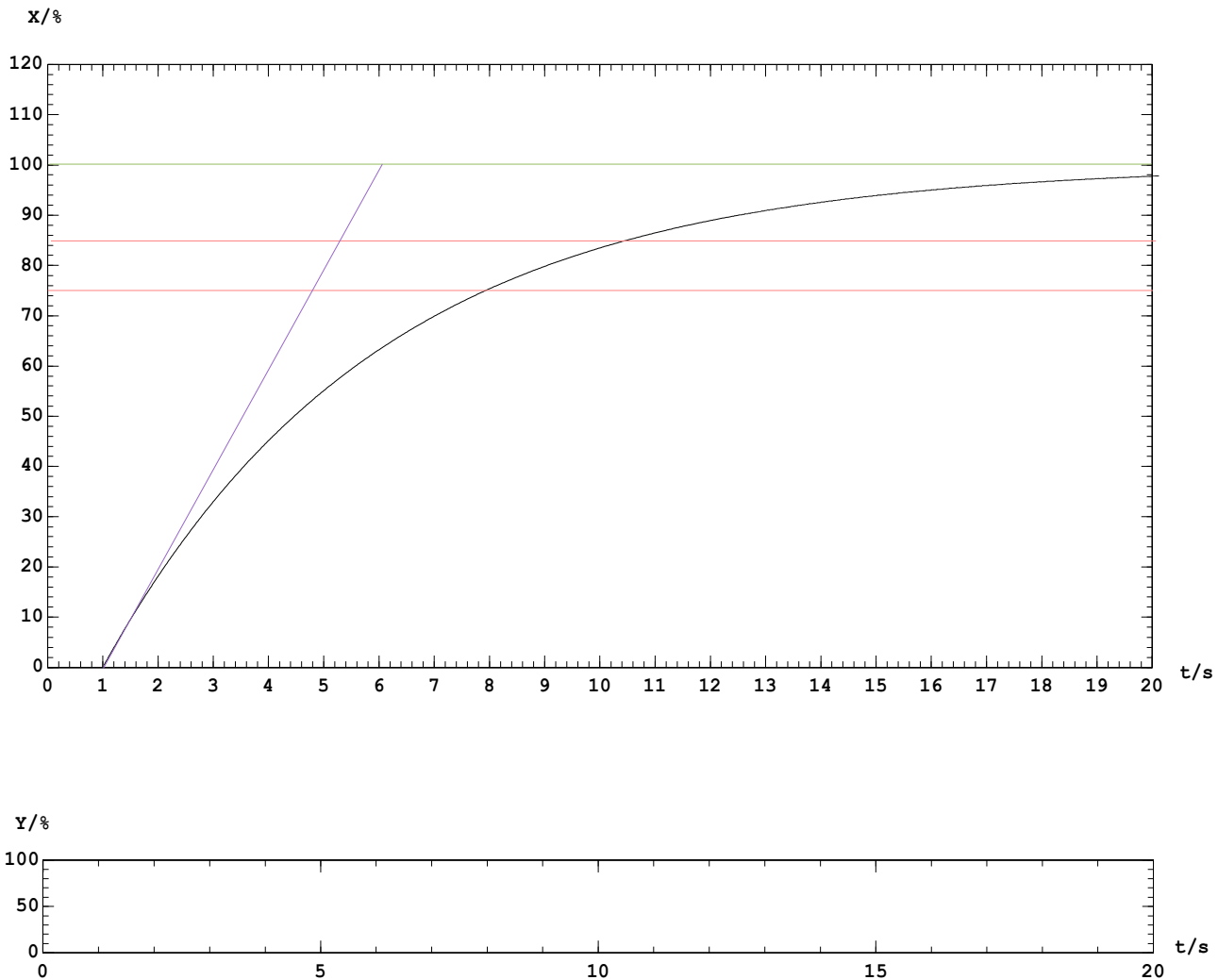
Regler: $X_{sd} = 10\%$, $W = 80\%$

Bemerkung:

Wir untersuchen hier das Verhalten von Strecken mit Totzeit, da die zeichnerischen Konstruktionen dafür einfach sind. In der Praxis finden sich wohl eher Strecken mit Verzugszeit. Alle Ergebnisse können mit der Entsprechung $T_t \leftrightarrow T_u$ übernommen werden.

Aufgabe ZP1

Trage für das obige Beispiel den angenäherten Verlauf von Regelgröße und Stellgröße in das untenstehende Diagramm ein. Benutze dabei die oben beschriebene Eigenschaft der Exponentialfunktion. Die Exponentialfunktion kann in kleinen Abschnitten durch ihre Tangente angenähert werden. Beachte dass X während der Totzeit noch weiter ansteigt bzw. abfällt, auch wenn schon ausgeschaltet bzw. eingeschaltet ist!

**Aufgabe ZP2**

Kontrolliere das Ergebnis anhand einer Simulation.

Was geschieht nach dem Anfahren des Regelkreises?

Anfahren:

$$X = 0 \rightarrow Y = 100\%$$

Nach der Totzeit T_t steigt X exponentiell an auf einer Kurve mit Endwert 100%.

Wenn die obere Schaltschwelle erreicht ist, schaltet der Regler ab: $Y = 0$

Wegen der Totzeit steigt X aber noch weiter an (während $T_t = 1s$) und erreicht einen oberen Wert X_1 .

Nach der Totzeit fällt X exponentiell ab, bis die untere Schaltschwelle erreicht ist.

In diesem Moment schaltet der Regler wieder ein: $Y = 100\%$
 Wegen der Totzeit fällt X aber noch während T_t weiter ab und erreicht einen unteren Wert X_2 .

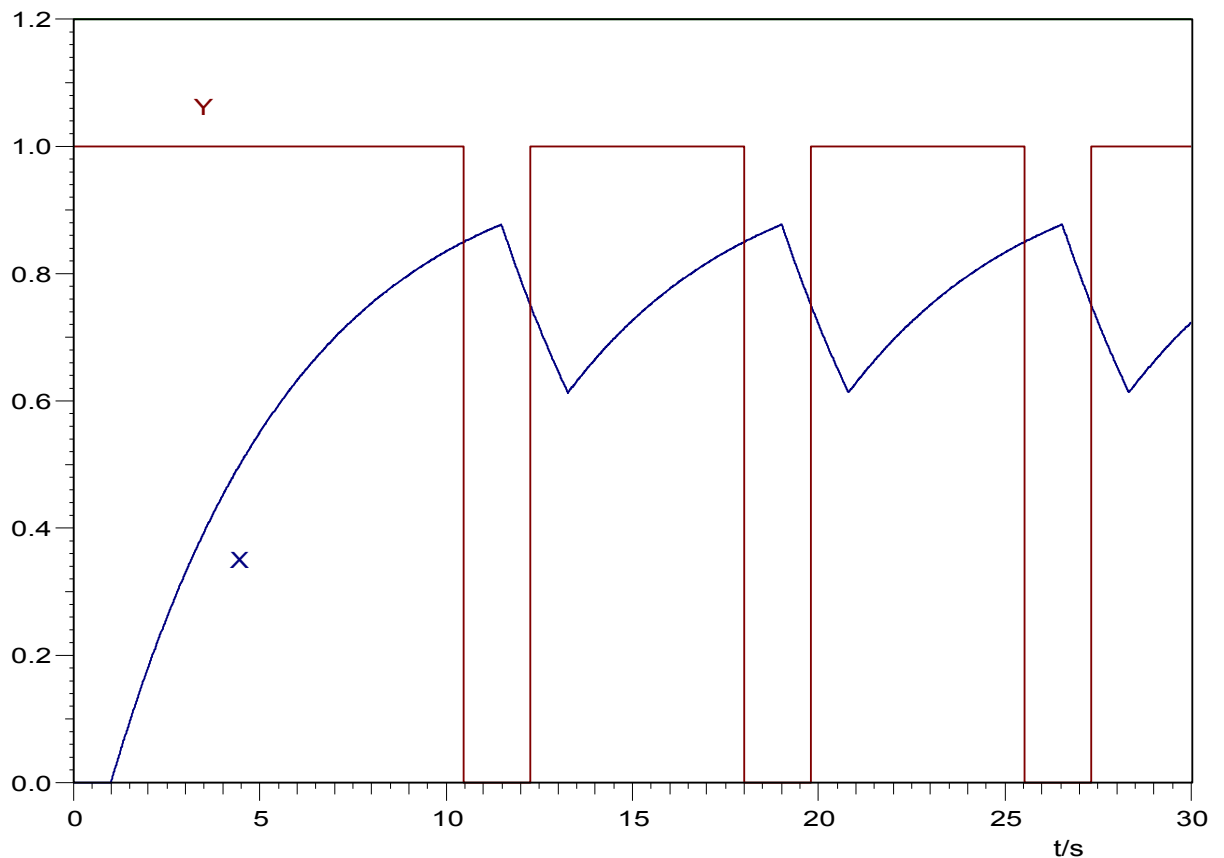
Nach Ablauf der Totzeit steigt X wieder exponentiell an, Richtung $X=100\%$.

Wenn die obere Schaltschwelle erreicht ist, schaltet der Regler ab.
 X steigt aber während der Totzeit weiter an

usw.

Es ergibt sich nach dem erstmaligen Erreichen der unteren Schaltschwelle ein periodischer Verlauf.

Hier das Simulationsergebnis des obigen Beispiels:



e) Definitionen

T = Schaltperiodendauer

T_{ein} = Einschaltdauer

T_{aus} = Ausschaltdauer

$f = 1/T$ = Schaltfrequenz

$X\sigma = |X_1 - X_2|$ = Schwankungsbreite, Schwingspanne

$X_m = (X_2 + X_1) / 2$ = Mittelwert der Regelgröße

$X_{wb} = X_m - W$ = (mittlere) bleibende Regelabweichung

Von Vorteil sind:

- geringe Schwankungsbreite:
der Sollwert wird relativ genau eingehalten
- geringe Schaltfrequenz:
geringere Abnutzung der Kontakte bzw. geringe Schaltverluste bei Transistoren

Leider kann man beides nicht gleichzeitig optimieren.

Wie bei den analogen Reglern spielt auch hier das Verhalten der Regelstrecke eine entscheidende Rolle.

Aufgabe ZP3

Bestimme die obigen Parameter für das untersuchte Beispiel.

f) Einfluss von Strecke und Hysterese

Aufgabe ZP4

Untersuche mit Hilfe von BORIS nacheinander den Einfluss von

- *vergrößerter Hysterese 20% (im Vergleich zu 10%)*
 - *vergrößerter Totzeit $T_t = 2s$ (im Vergleich zu $1s$)*
 - *vergrößerter Zeitkonstante $10s$ (im Vergleich zu $5s$)*
- auf die Schwankungsbreite.*

Ziehe Schlussfolgerungen aus den Ergebnissen.

Ergebnisse:

- größere Hysterese X_{SD} → größere Schwankungsbreite $X\sigma$
- größere Totzeit T_t → größere Schwankungsbreite $X\sigma$
- größere Zeitkonstante T_s → kleinere Schwankungsbreite $X\sigma$

Oft wird die Schwankungsbreite stärker durch die Tot- oder Verzugszeit der Strecke als durch die Hysterese des Reglers verursacht.

f) Einfluss der Stell-Leistung

Ist es günstiger, größere oder kleinere Heizkörper in einem Raum zu installieren?
Wie viel „Reserve“ (Leistungsüberschuss) soll man bei einer Regelung vorsehen?

Bei **kleiner Stelleistung** kann es sein, dass der Sollwert gar nicht oder zu langsam erreicht wird.

Große Stelleistung bedingt einen hohen Maximalwert der Regelgröße im unregulierten Fall. Die Kurve der Regelgröße steigt steil an. Der Sollwert wird schnell erreicht (kurze Anregelzeit), aber bei trägen Strecken kommt es zu starkem Überschwingen.

Beispiel

Eine PT1-Tt - Strecke ($T_t = 1\text{s}$, $T_s = 5\text{s}$) wird mit einem Regler mit 10% Hysterese geregelt. Der Sollwertgeber erzeugt ein Signal von 0...1 entsprechend einer Einstellung von 0...100% des Sollwertes. Da der Regler auch beim höchsten Sollwert funktionieren muss, untersuchen wir hier nur den Fall $w = w_{\max} = 1 = 100\%$.

Vorsicht!

Bei Prozentangaben müssen wir aufpassen, worauf sie sich beziehen.

Dies kann zu Verwirrungen führen.

In unserem Fall ist die Prozentangabe 0...100% für den Sollwert unwichtig, da wir sowieso nur den Fall $w = w_{\max} = 100\% = 1$ betrachten.

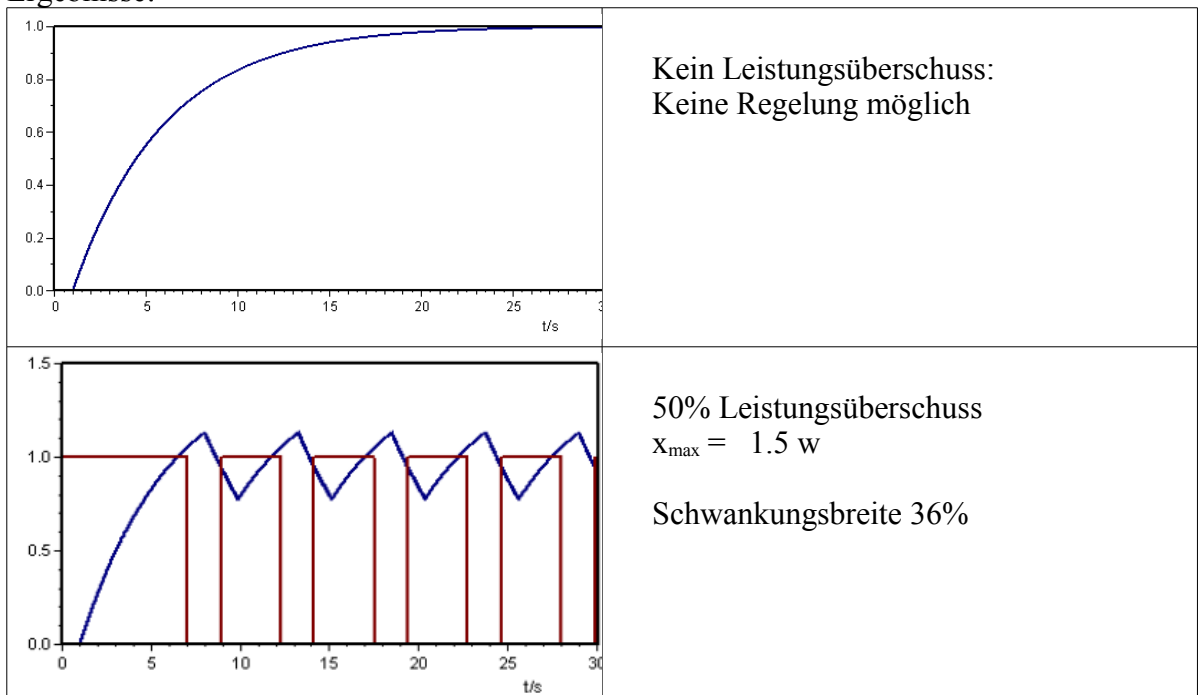
Der **Leistungsüberschuss** \bar{u} in % sagt uns, wie viel Prozent der erreichbare Wert der Regelgröße x_{\max} über dem Sollwert liegt, also z.B. bedeutet $x_{\max} = 1.5 w$ einen Leistungsüberschuss von 50%.

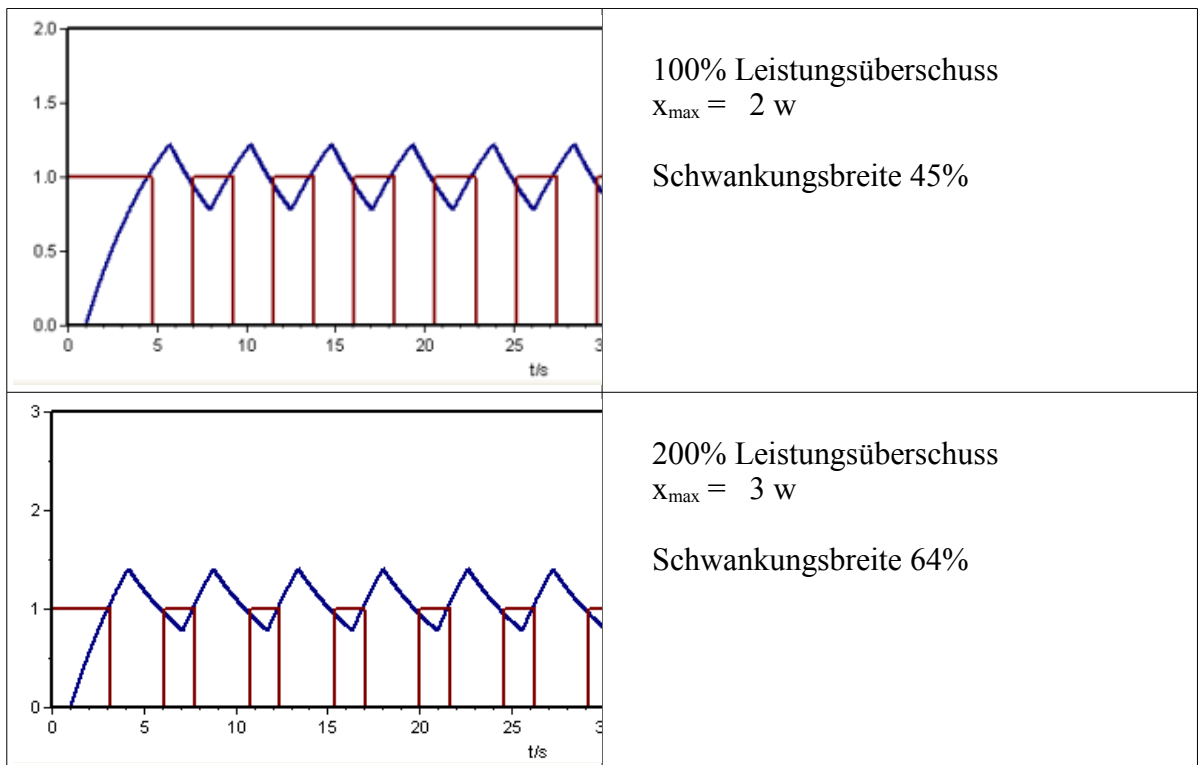
In der Praxis (und in der Simulation) bedeutet mehr Stell-Leistung, dass die Strecke einen höheren K_{PS} -Wert hat (wenn der Regler das gleiche Stellsignal abgibt), denn $K_{PS} = x/y$.

Aufgabe ZP5

Untersuche mit Hilfe von BORIS wie sich ein Leistungsüberschuss von 0%, 50%, 100% und 200% für obiges Beispiel auf die Schwankungsbreite auswirkt.

Ergebnisse:





Man sieht:

Ein großer Leistungsüberschuss bewirkt eine große Schwankungsbreite.

Ein zu kleiner Leistungsüberschuss stellt die Regelung infrage.

Ein günstiger Kompromiss ist ein Leistungsüberschuss von 100%, also $x_{\max} = 2 w$

g) Formel für die Schwankungsbreite

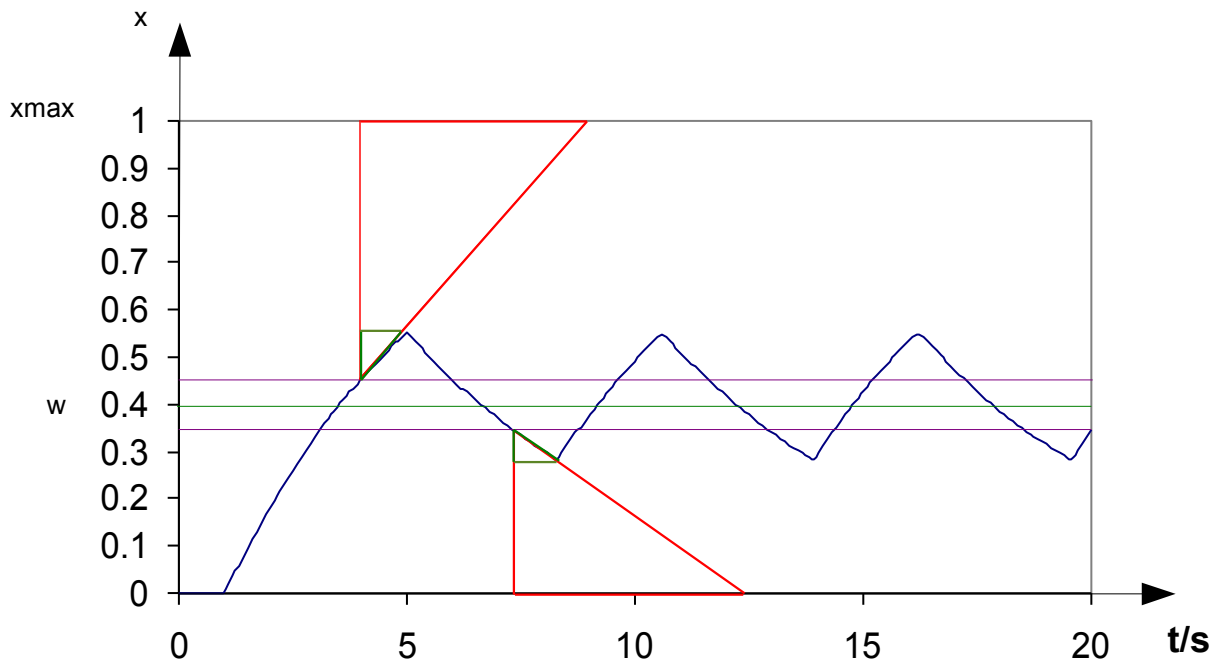
Die Formel wird näherungsweise hergeleitet, wobei die Exponentialfunktionen durch ihre Tangenten angenähert werden. Dies ist eine gute Näherung bei kleinen Schwankungsbreiten, was ja auch in der Praxis erwünscht ist.

Zum Aufstellen der Formel werden ähnliche Dreiecke (triangles semblables) benutzt.

Aufgabe ZP6

- Trage in dem untenstehendem Diagramm ein: Schwankungsbreite, obere und untere Schaltschwelle, Schaltdifferenz (Hysterese).
- Beschrifte die Zustände „Ein“ und „Aus“ der Strecke.
- Wie lang sind die horizontalen Seiten der roten und grünen Dreiecke? Warum? Beschrifte sie.
- Benenne die vertikalen Seiten der grünen Dreiecke mit $x\sigma_1$ und $x\sigma_2$. Berechne $x\sigma_1$ und $x\sigma_2$ mithilfe der Formeln für ähnliche Dreiecke als Funktion von x_{\max} , w und X_{sd} .
- Stelle damit die Formel für die Schwankungsbreite auf.

Beispiel mit einer PT1-Tt - Strecke ($T_t = 1s$, $T_s = 5s$), $w = 0.4$



Ergebnis:

$$X_{\sigma} = X_{Sd} + \frac{T_t}{T_s} (x_{max} - X_{Sd})$$

Da in der Praxis die Schalt Differenz (Hysterese) X_{sd} des Reglers klein gegenüber x_{max} ist, kann die Formel vereinfacht werden zu

$$X_{\sigma} \approx X_{Sd} + \frac{T_t}{T_s} x_{max}$$

Für PTn-Strecken ersetzt man T_t durch T_u :

$$X_{\sigma} \approx X_{Sd} + \frac{T_u}{T_s} x_{max}$$

Bei Strecken mit großer Verzugszeit spielt die Hysterese des Reglers nur eine kleine Rolle. In diesem Fall kann man im Fall eines elektronischen Reglers auch einen Komparator einsetzen.

Aufgabe ZP7

- Die Temperatur eines Glühofens ($T_u = 2\text{min}$, $T_g = 30\text{min}$) wird mit einem Zweipunktregler (Regelbereich 0 bis 1000°C , 0.5% Hysterese) geregelt. Der Sollwert beträgt 800°C .
- Mit der vollen Stelleistung können 1400°C erreicht werden.
- Berechne den Leistungsüberschuss und die Schwankungsbreite
- Wodurch wird die Schwankungsbreite hauptsächlich verursacht (Regler oder Strecke?)

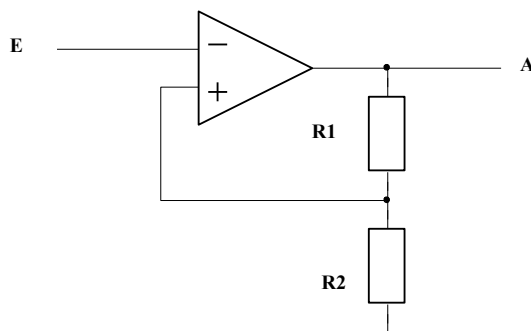
Aufgabe ZP8

- Eine Raumtemperaturregelung funktioniert mit Zweipunktthermostat. Dieser ist auf 20°C eingestellt, er schaltet bei 20.5°C aus und bei 19.5°C ein.
- Die Verzugszeit des Raumes beträgt 10min, die Ausgleichszeit 50min. Ohne Heizung hat der Raum eine Temperatur von 15°C , bei dauernd eingeschalteter Heizung steigt die Temperatur auf 27°C .
- Welche Schwankungsbreite der Temperatur ergibt sich?
- Wie könnte man die Schwankungsbreite verringern?

h) Elektronische Zweipunktregler

- ohne Hysterese: Komparator
- mit Hysterese: Schmitt-Trigger

Am einfachsten zu verstehen ist die Schaltung des invertierenden Schmitt-Triggers mit OPV:



$$\alpha = \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

Wird die Schaltung mit symmetrischer Speisespannung betrieben, so hat sie eine untere Schaltschwelle U_{su} im negativen Bereich und eine obere Schaltschwelle U_{so} im positiven Bereich.

Wegen der Mitkopplung gibt es nur 2 Zustände am Ausgang: H ($U_{amax} = \text{ca. } +13\text{V}$) und L ($U_{amin} = \text{ca. } -13\text{V}$). Der Übergang zwischen H und L erfolgt wegen der Mitkopplung sehr schnell.

Funktionsweise:

- Ausgangszustand:
 $U_e < U_{su}$ (negative Eingangsspannung unterhalb der unteren Schaltschwelle).
 Wegen der Invertierung ist U_a positiv, der Ausgang ist voll durchgesteuert ($H = +13\text{V}$)
 Am P-Eingang liegt eine positive Spannung $U_p = \alpha \times U_{amax}$.

Die Spannung U_{PN} bleibt positiv (und damit der Ausgang auf H) solange U_e kleiner als $U_p = \alpha \times U_{amax}$ ist.

- Wenn U_e den Wert $\alpha \times U_{amax}$ nur sehr geringfügig übersteigt, kehrt U_{PN} die Polarität um (wird negativ) und der Ausgang schaltet sehr schnell auf L (= $U_{amin} = -13V$).
Nun liegt am P-Eingang die negative Spannung $U_p = \alpha \times U_{amin}$.
Der N-Eingang hingegen liegt auf der positiven Spannung U_e .
 U_{PN} ist negativ und bleibt es auch, wenn U_e weiter vergrößert wird.
 U_a bleibt also weiterhin auf L.
- Nun soll U_e wieder verringert werden.
Die Spannung U_{PN} bleibt negativ (und damit der Ausgang auf L) solange U_e größer als $U_p = \alpha \times U_{amin}$ ist.

Wenn U_e den Wert $\alpha \times U_{amin}$ nur sehr geringfügig unterschreitet, kehrt U_{PN} die Polarität um (wird positiv) und der Ausgang schaltet sehr schnell auf H. Nun liegt am P-Eingang die positive Spannung $U_p = \alpha \times U_{amax}$. Der N-Eingang hingegen liegt auf der negativen Spannung U_e .

U_{PN} ist positiv und bleibt es auch, wenn U_e weiter verringert wird.
 U_a bleibt also weiterhin auf H.

Aufgabe ZP9

- Bestimme die Schaltschwellen für einen OPV mit $U_{amax} = +13V$ und $U_{amin} = -13V$. Das Potentiometer ist so eingestellt, dass $R1 = 8k\Omega$ und $R2 = 2k\Omega$.
- Zeichne die Kennlinie $U_a = f(U_e)$ der Schaltung.
- Was müsste geändert werden, damit die Hysterese auf die Hälfte reduziert wird?

Aufgabe ZP10

Zeichne die vollständige Schaltung einer Zweipunkt-Regleinrichtung (mit Sollwertsteller, Vergleichler und Zweipunktregler).

Bemerkungen:

- Es gibt auch eine nicht invertierende Schmitt-Trigger-Schaltung mit OPV.
(siehe T2EE Analogelektronik, Funktionsgenerator)
- Um einen fertigen Regler zu erhalten, muss ein Vergleichler hinzugefügt werden.
- Es gibt in den TTL-, CMOS- und HCMOS-Reihen fertige Schmitt-Trigger mit digitalem Ausgang (z.B. 7414, 74132..)
- Mit einem Schmitt-Trigger und einem RC-Glied (PT1) lässt sich sehr einfach ein Oszillator aufbauen:
http://staff.ltam.lu/feljc/electronics/recipes/OPV_Impulsgeneratoren.pdf
http://staff.ltam.lu/feljc/electronics/recipes/CMOS_Impulsgeneratoren.pdf

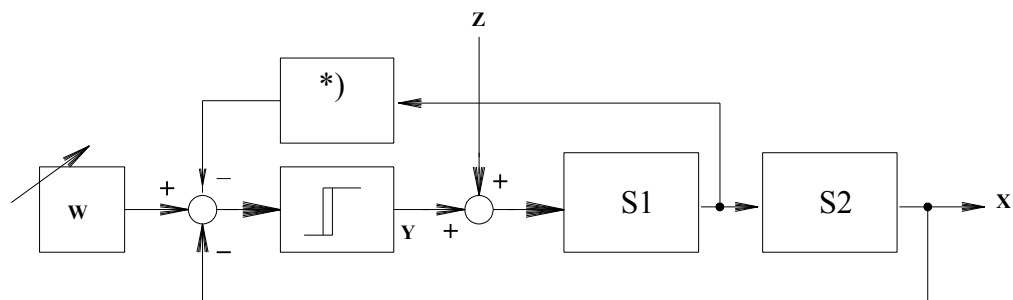
2. Zweipunktregler mit Rückführung

Was kann man tun um die Schwankungsbreite einer Zweipunktregelung zu verringern?

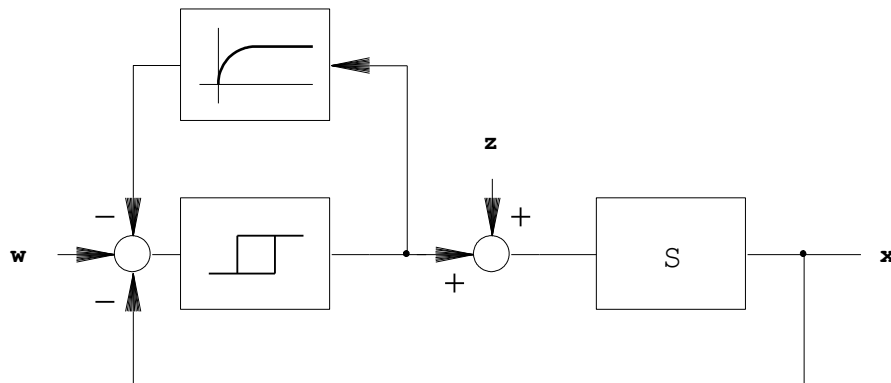
$$x_{\sigma} \approx x_{Sd} + \frac{T_t}{T_S} x_{\max}$$

Die Schaltdifferenz des Reglers spielt bei Strecken mit Tot- oder Verzugszeit normalerweise nur eine untergeordnete Rolle. Die Strecke lässt sich meist nur in Grenzen beeinflussen.

Eine kleinere Schwankungsbreite kann also nur durch eine Erweiterung des Regelkreises erreicht werden. Wie bei stetigen Regelungen kann man eine Hilfsgrösse am Anfang der Strecke abgreifen und auf den Regler schalten (Hilfsgrössenaufschaltung).

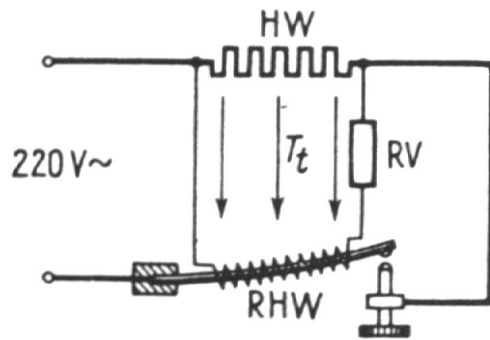


Technisch noch einfacher zu realisieren ist ein Regler mit Rückführung der Stellgrösse:



Der Vorteil ist, dass die Rückführung innerhalb des Reglers geschehen kann. Als Rückführglied (Aufschaltglied) wird ein PT1-Glied benutzt. Die Zeitkonstante muss an die Strecke angepasst werden.

Eine einfache Möglichkeit der Rückführung ist es, am Bimetall des Thermostaten einen Widerstand anzubringen, der durch die Stellgrösse (Netzspannung) beim Einschalten erwärmt wird:



HW = Heizwiderstand

RHW = Heizwiderstand für thermische Rückführung

Beim Schließen der Reglerkontakte wird der Rückführwiderstand aufgeheizt und täuscht dem Fühler ein vorzeitiges Erreichen des oberen Schaltpunktes vor, so dass die Wärmezufuhr vorzeitig unterbrochen wird. Der Rückführwiderstand kühlt sich schnell ab, aber die Regelgröße nimmt noch während der Totzeit zu.

Im Gegensatz zu obigem Blockschaltbild ist bei dieser Realisierung die untere Schaltschwelle unverändert, da der Widerstand dann ausgeschaltet ist.

Aufgabe ZP11

Simuliere einen Regelkreis mit Zweipunktregler und Rückführung über ein PT1-Glied. Vergleiche mit der Schaltung ohne Rückführung.

Sollwert: 50%

Regler: $X_{sd} = 10\%$, $Y_{max} = 1$

Strecke: PT3 mit $T_s = 5s$, $K_{PS} = 1$

Rückführung: $K_{PY} = 1$, $T_{SY} = 1s$

Ergebnis:

Die Schwankungsbreite wird kleiner, die Schaltfrequenz steigt an.