

Grundlagen Regelungstechnik

– Regeln heißt:

- Ziel ist es eine bestimmte physikalische Größe wie Temperatur konstant zu halten.
- Problem: Beispielsweise Wärmeentnahme (**Störgröße z**) sorgen für ein ständiges nachregeln.
- Ständiges Messen der aktuellen Temperatur (**Istwert x**)
- Ständiges Vergleichen der aktuellen Temperatur (Istwert x) mit der Wunschtemperatur (**Sollwert w**).
- Es gibt eine Temperaturdifferenz (**Regeldifferenz e**)
- Umwandeln der Temperaturdifferenz in die **Stellgröße y** um die Zieltemperatur zu erreichen. Wie funktioniert das?

$$y(t) = K_p \cdot [(x-w) + \int \frac{1}{T_n} (x-w) \cdot dt + T_v \frac{d(x-w)}{dt}]$$

- Diese mathematische Formel ist die Grundlage der Elotech PID-Reglers

– P = Proportionalanteil = $K_p \cdot [(x-w)]$

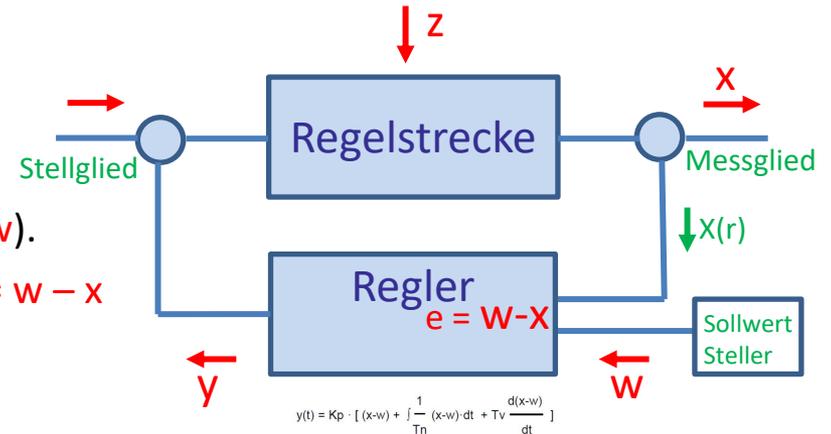
– I = Integralanteil = $\int \frac{1}{T_n} (x-w) \cdot dt$

– D = Differentialanteil = $T_v \frac{d(x-w)}{dt}$

Grundlagen Regelungstechnik

– Regelstrecke

- z.B. Wärmeentnahme (**Störgröße z**)
- Ist-Temperaturwert (**Istwert/Regelgröße x**)
- Wunschtemperatur (**Sollwert/Führungsgröße w**).
- Temperaturdifferenz (**Regeldifferenz e**) $e = w - x$
- **Stellgröße y**

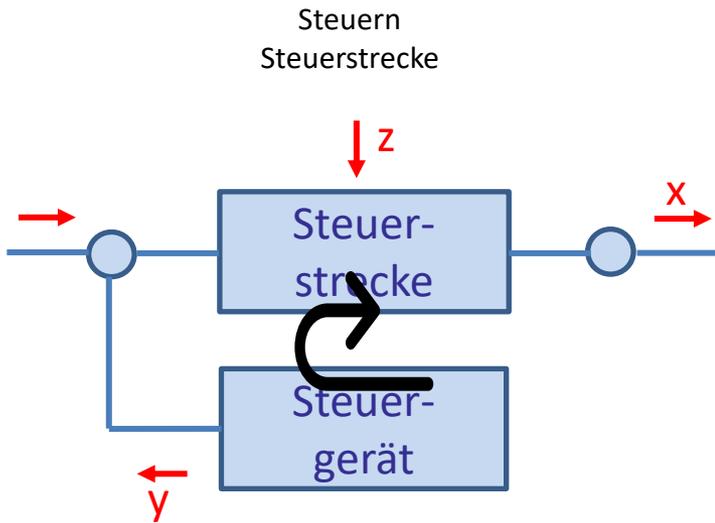


Weitere Bezeichnungen

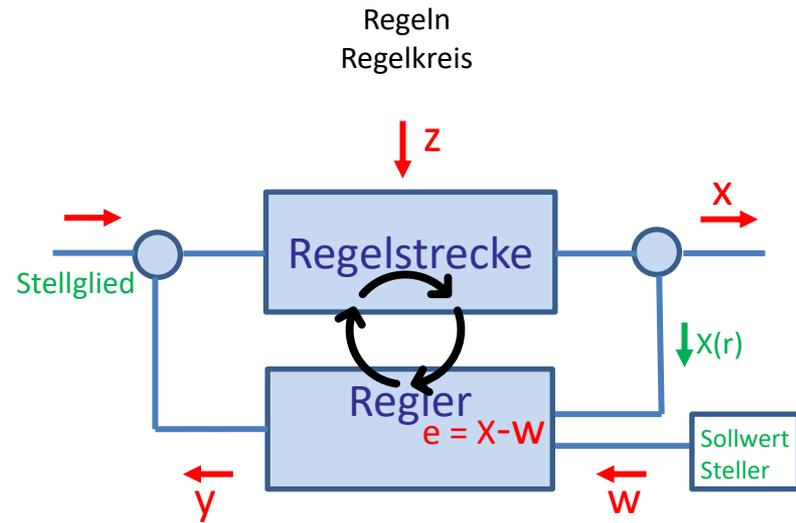
- $X_w = x - w =$ **Regelabweichung**
- $X(r) =$ **Rückführgröße** = Meistens wird nicht der Temperaturwert zurückgeführt sondern umgewandelt in einen anderen Wert – meistens Strom
- **Sollwertsteller** = Anpassung des Sollwertes
- **Messglied** = Messung der Temperatur (**Istwert x**) und Umwandlung in eine **Rückführgröße**
- **Stellglied** = An dieser Stelle wird die zugefügte Wärme um einen Wert Y erhöht oder erniedrigt.

Grundlagen Regelungstechnik

– Kurzer Exkurs: Steuern - Regeln



Offener Wirkungsablauf



Geschlossener Wirkungsablauf

Grundlagen Regelungstechnik

Beispiele

Regelstrecke

Elektromotoren
Benzinmotoren
Heizgeräte
Heizungsanlagen
Kühlgeräte
Klimaanlagen
Netzgeräte
Flüssigkeitsbehälter

Regelgröße

Drehzahl
Geschwindigkeit
Temperatur
Temperatur
Luftfeuchtigkeit
Elektrische Spannung
Füllstand (Niveau)

Regler

Bimetallstreifen
Fliehkraftregler
Elektronische Regler

Anwendung

im Bügeleisen oder im Heizkörperventil
in Dampfmaschinen
in Netzteilen, CD-/DVD-Recordern, Waschmaschinen, im Auto, in der industriellen Produktion usw. usw.

Stellglieder

Transistoren, Thyristoren, Triacs

Ohne Stellantrieb

Schalter
Potentiometer
Ventile
Schieber

Mit Stellantrieb

Relais', Schütze
Motor-Potentiometer
Magnet-Ventile
Motor-Schieber

Messglieder, Sensoren, Messfühler

Passive Sensoren

(Sensoren, die eine eigene Energieversorgung benötigen)
Foto-Widerstände (LDR)
NTC-/PTC-Widerstände
Dehnungs-Meßstreifen (DMS)

Aktive Sensoren

(Sensoren, die selbst eine Spannung abgeben)
Foto-Zellen
Thermoelemente
Piëzo-Kristalle
Tacho-Generatoren

Grundlagen Regelungstechnik

Einteilung von Regelungen

- Nach Art des Reglers
 - Handregelung (Mensch regelt)
 - Automatische Regelung
- Nach Art der Führungsgröße
 - Festwertregelung (Sollwert ändert sich nicht)
 - Folgeregelung (Sollwert ändert sich nach einem gewissen Schema)
 - Zeitplanregelung (Änderung des Sollwertes, abhängig von einem definierten Zeitablauf)
- Nach der Art der Stellgröße
 - Stetige Regelung
 - P, I, PI, PD, PID
 - Stellgröße kann innerhalb eines bestimmten Bereiches jeden Zwischenwert annehmen
 - Nichtstetige Regelung
 - 2-Punkt-Regelung (An-Aus) , 3-Punkt-Regelung
 - Nur Einstellung in festen Stufen
- Nach der Art der Energieversorgung des Reglers
 - Mit Hilfsenergie (Elektronische Regler)
 - Ohne Hilfsenergie (z.B. Bimetall im Bügeleisen)

Grundlagen Regelungstechnik

Beispiele

Name	Lenkung eines Kfz	Temperaturregelung (Raumheizung)	Drehzahlregelung (DVD-Player)
Regelgrösse x	Fahrtrichtung	Raumtemperatur	Motor-Drehzahl
Stellgrösse y	Winkel d. Lenkrades	Ventilstellung	Motor-Spannung
Sollwert w	Strassenverlauf	gewünschte Temperatur	Soll-Drehzahl
Störgrössen z	Gegenverkehr, Umleitung, Tiere ...	Offene Fenster/Türen, Personenzahl im Raum ...	Temperatur, Belastung ...
Regelstrecke	Lenkanlage (Lenkrad bis Vorder- räder)	Heizkörper, Raum	Motor
Regler (Regel- Einrichtung)	Mensch am Lenkrad	Thermostat	Regel-Elektronik
Stellglied	Lenkrad	Ventil	Transistor
Sensor	Augen des Fahrers	NTC, Bimetallstreifen	Tachogenerator

Grundlagen Regelungstechnik

Was ist eine optimale Regelung ?

Angleichung des Istwertes an den Sollwert

- So **schnell** wie möglich
- So **genau** wie möglich
- So **schwingungsfrei** wie möglich – möglichst kein Überschwingen

Genauere Kenntnisse des

- Zeitverhaltens der Regelstrecke
- Die wichtigsten Kennwerte
 - vom Regler, Stellglied, Messglied (Herstellerangaben)
 - Regelstrecke (Erfahrungswert, Messen, ...)

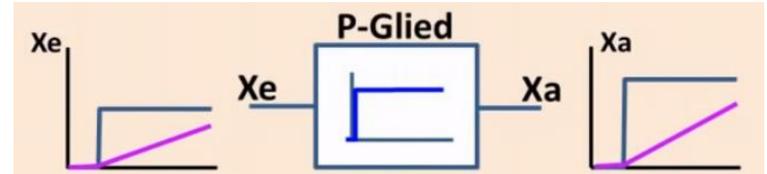
Daher ist es wichtig für die richtige Auswahl eines Reglers und anderen Komponenten sowie deren Bedienung sich mit folgenden Themen zu beschäftigen: **Zeitverhalten, P-, I- und D-Verhalten, Verzögerungsglieder, Totzeit,...**

P-Verhalten

P-Verhalten = Proportionalverhalten

Zu jedem Zeitpunkt gilt:

- $X_a / X_e = \text{kontant} = k_p$
- $K_p = \text{Verstärkung} = \text{Proportionalbeiwert} = \text{Übertragungsbeiwert}$



$$y(t) = K_p \cdot e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt}$$

$$y(t) = K_p \cdot \left[(x-w) + \int \frac{1}{T_n} (x-w) \cdot dt + T_v \frac{d(x-w)}{dt} \right]$$

Der Proportionalbereich ist der lineare Bereich des Reglers und wirkt unter- und oberhalb des Sollwertes. Er wird in Prozent, bezogen auf den Messbereichsumfang eingestellt.

Beispiel: $x_p = 5\%$, Messbereich = $0 \dots 200^\circ\text{C}$, Messbereichsumfang = 200K
 Proportionalbereich = $\pm 10\text{K}$ um den Sollwert

Der Proportionalanteil (P) des Stellgrads beträgt beim Anfahren solange 100%, bis der Istwert in den Proportionalbereich eintritt. Nun wird der Stellgrad solange (bis auf 0) reduziert, bis der Istwert dem Sollwert entspricht.

Da Regelprozesse jedoch immer einen gewissen Stellgrad benötigen, wird sich bei einem P-Regler eine bleibende Regelabweichung einstellen. Diese wird durch den I-Anteil des Reglers ausgeglichen.

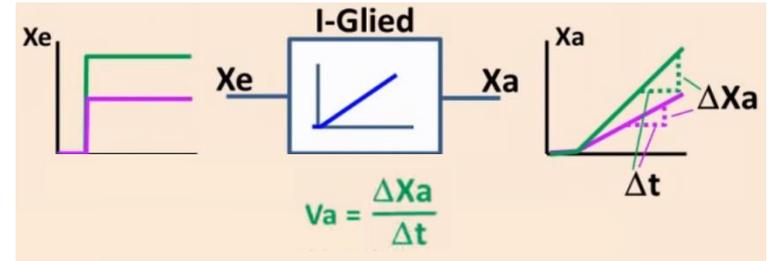


I-Verhalten

I-Verhalten = Integralverhalten

Zu jedem Zeitpunkt gilt:

- $V_a / X_e = \text{konstant} = K_i$
- $K_i = \text{Integrierbeiwert}$
- Das Ausgangssignal steigt, solange das Eingangssignal nicht Null ist.
- Wird das Eingangssignal Null, verharret das Ausgangssignal auf dem erreichten Wert.
- Besonderheit: Das I-Verhalten würde bis ins unendlich ansteigen. Daher nennen man dieses Verhalten auch „Strecke ohne Ausgleich“



Beispiel: Ein Flüssigkeitsbehälter:

Zufluss: $X_e = 6 \text{ l/s} = 6000 \text{ cm}^3/\text{s}$

Querschnitt: 1200 cm^2

$V_a = 6000 / 1200 = 5 \text{ cm/s}$ um 5 cm steigt pro Sekunde das Wasser

$K_i = V_a / X_e = 5 \text{ cm/s} / 6 \text{ l/s} = 0,83 \text{ cm/l}$

$$y(t) = K_p \cdot e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt}$$

Der für den Regelprozess erforderliche Stellgrad wird vom I-Anteil des Reglers (I) erzeugt. Mit der Dauer der Regelabweichung wächst hier die Stellgröße an. Es werden andauernd kleine Regelabweichungen durch den I-Anteil aufaddiert. Dadurch ändert sich die Stellgröße so, dass die Regelabweichung schließlich zu Null wird. Eine durch den I-Anteil erzeugte, zu große Stellgröße, kann nur dann wieder abgebaut werden, wenn sich die Regelabweichung in ihrem Vorzeichen ändert. Wenn also der Sollwert mindestens einmal über- oder unterschritten wurde. Beim PI-Regler können daher Schwingungen um den Sollwert auftreten. Insbesondere dann, wenn T_n zu klein (= I-Anteil zu groß) eingestellt ist. Des Weiteren ist zu beachten, dass PI-Regler langsamer als P-Regler sind.



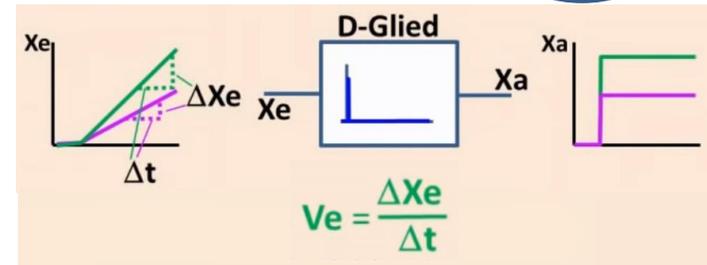
D-Verhalten

D-Verhalten = Differentialverhalten

Zu jedem Zeitpunkt gilt:

- $X_a / V_e = \text{konstant} = k_D$
- $K_D = \text{Differenzierbeiwert}$
- Ein D-Glied erzeugt nur dann ein Ausgangssignal, wenn das Eingangssignal sich ändert.
- Bei konstanten Eingangssignal $\Delta x_e = 0$ ist das Ausgangssignal in jedem Fall Null.

$$y(t) = K_P \cdot e(t) + K_I \int_0^t e(\tau) d\tau + K_D \frac{de(t)}{dt}$$



Der D-Anteil des Reglers reagiert nicht auf die Dauer, sondern auf die Geschwindigkeit, mit der sich die Differenz zwischen Soll- und Istwert ändert.

Durch die Änderungsgeschwindigkeit des Istwertes wächst die Stellgröße schneller an, als bei einem P-Regler.

Der PD-Regler benötigt, um die gleiche Stellgröße zu erzielen wie P-Regler, eine um die Vorhaltezeit T_v verringerte Zeit.

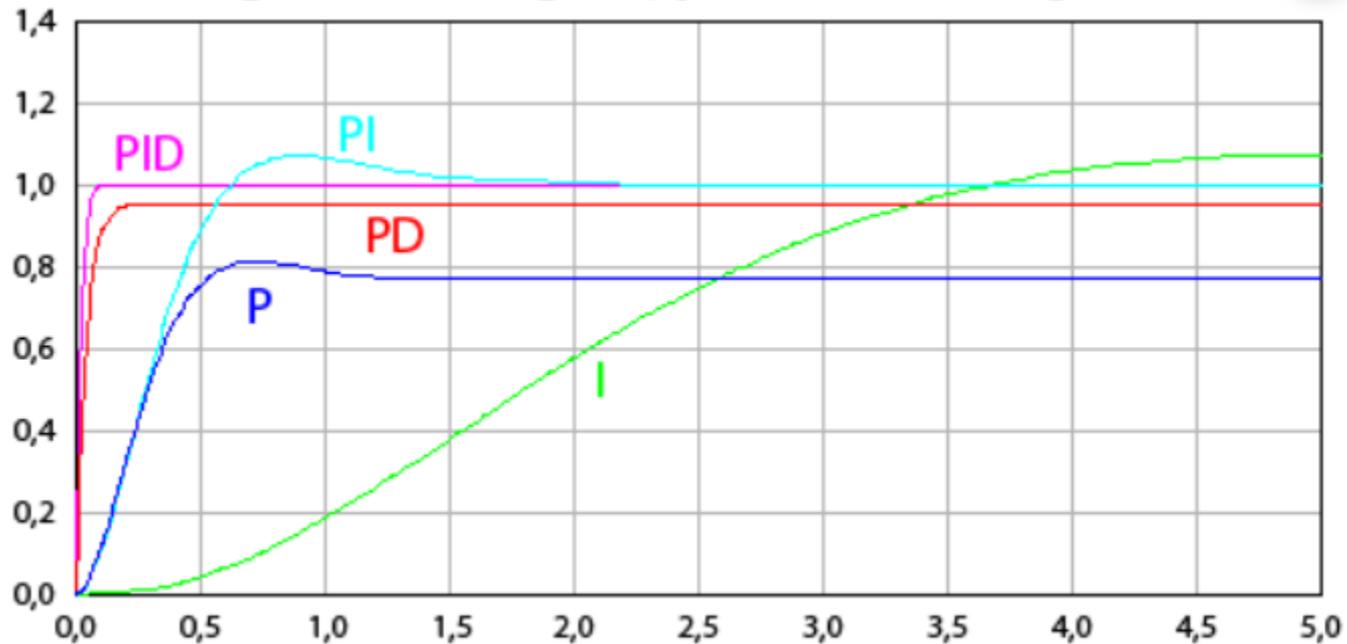
Durch den D-Anteil erreicht man ein schnelles, überschwingfreies Anfahren an den Sollwert.

Der Regler reagiert schneller. Nachteil: bleibende Regelabweichung.



Vergleich der Reglertypen

dddd



Zeitverhalten

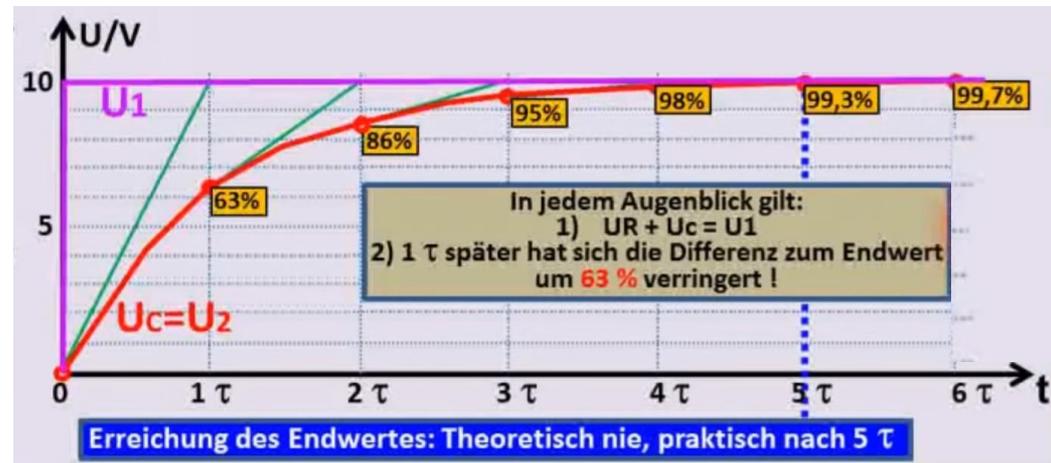
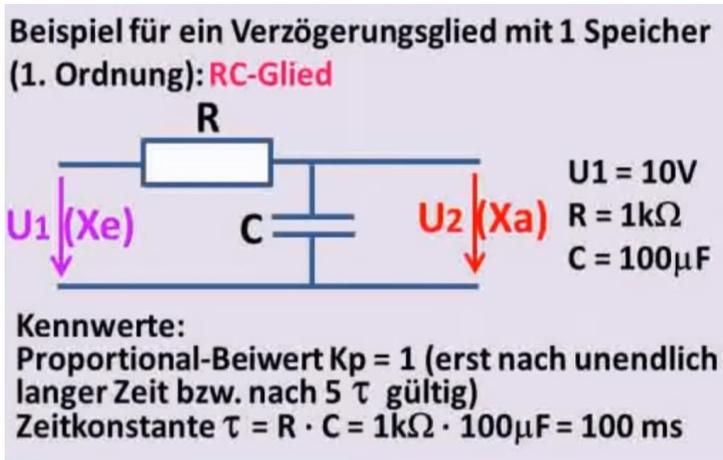
Zeitverhalten (Verzögerungen, Totzeiten)

- Jede Wärme-Regelstrecke hat eine Zeitverzögerung. Diese ist meistens unbekannt.
- Die Energie die man reinsteckt kommt nicht unbedingt an der Regelstrecke an. Verluste auf dem Weg oder Wärmeabstrahlungen in andere Richtungen sind typisch.
- Ein genaues Verhalten insbesondere von komplexeren Regelstrecken können nur über Erfahrungswerte und Testläufe ermittelt werden.

Unverzögerte & verzögerte Regelstrecken

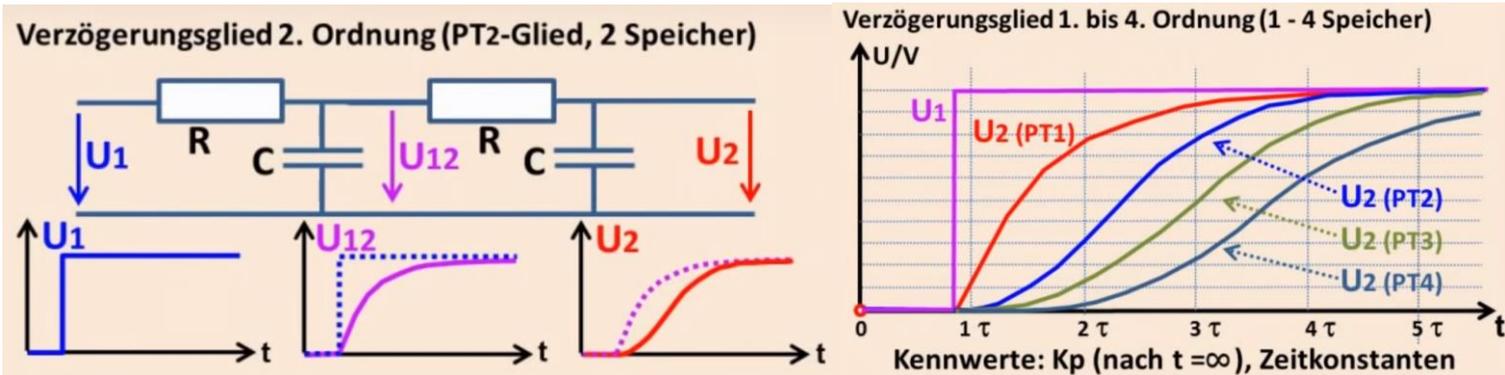
Bei P-, I- und D-Verhalten gab es immer ein proportionales Verhalten. Dieses sind **unverzögerte Regelwerte**.

In der Realität sieht es anders aus. Ein Heizgerät benötigt immer eine gewisse Zeit bis zum Erreichen des Sollwertes. Dieses bezeichnet man als **verzögerte Regelwerte**. Beispiel für eine „verzögerte Regelstrecke“ 1. Grades

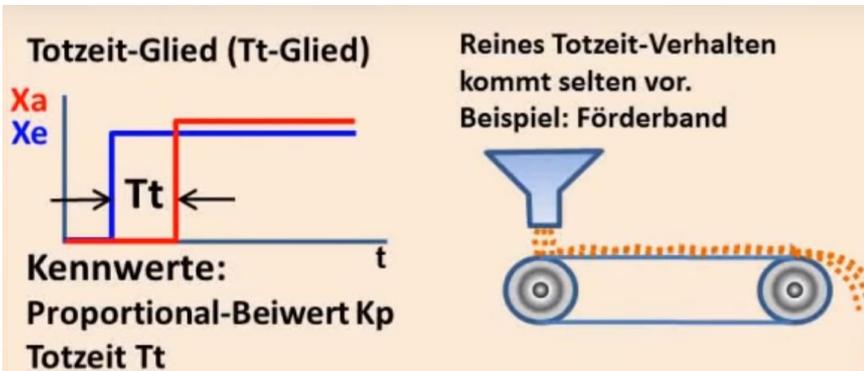


Verzögerung und Totzeit

Verzögerte Regelkreise n-ter Ordnung



Totzeit-Glied



Richtige Einstellung

Unverzögerte Regelkreisglieder

X_e		X_a	Blocksymbole: Proportional-Glied (P)
X_e		X_a	Integrier-Glied (I)
X_e		X_a	Differenzier-Glied (D)

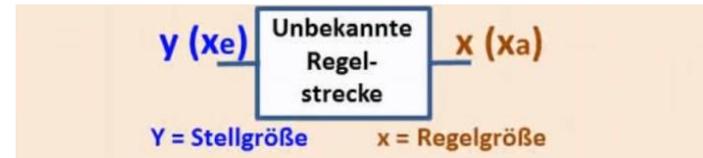
Verzögerte Regelkreisglieder

X_e		X_a	Blocksymbole: Verzögerungsglied 1. Ordnung (PT1)
X_e		X_a	Verzögerungsglied höherer Ordnung (PTn) <i>n = Gradzahl = Anzahl der Speicher</i>
X_e		X_a	Totzeitglied (Tt)

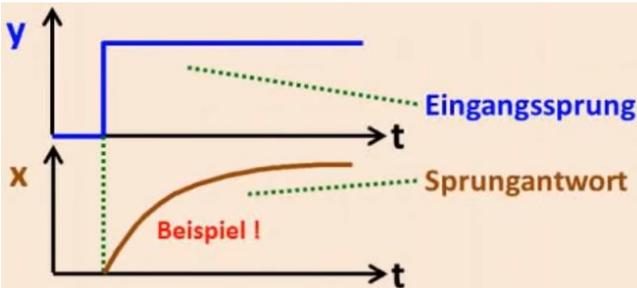
Unbekannte Regelstrecken

Unbekannte Regelstrecken

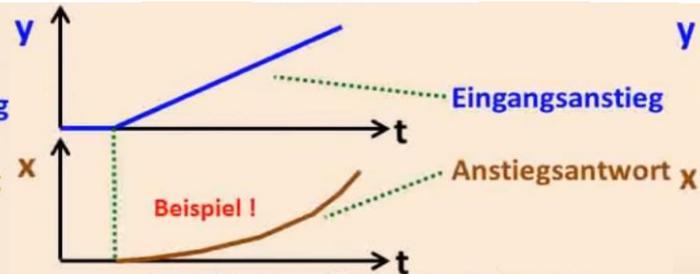
- Experimentelle Verfahren



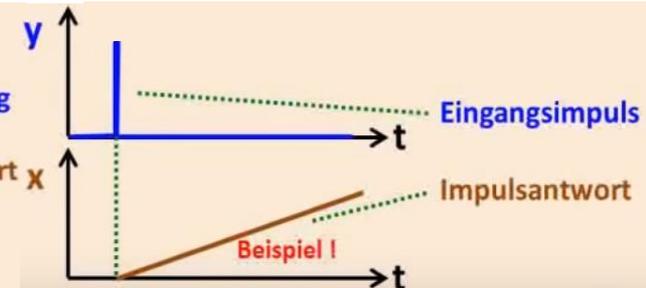
Sprung-Antwort-Verfahren



Anstiegs-Antwort-Verfahren



Impuls-Antwort-Verfahren

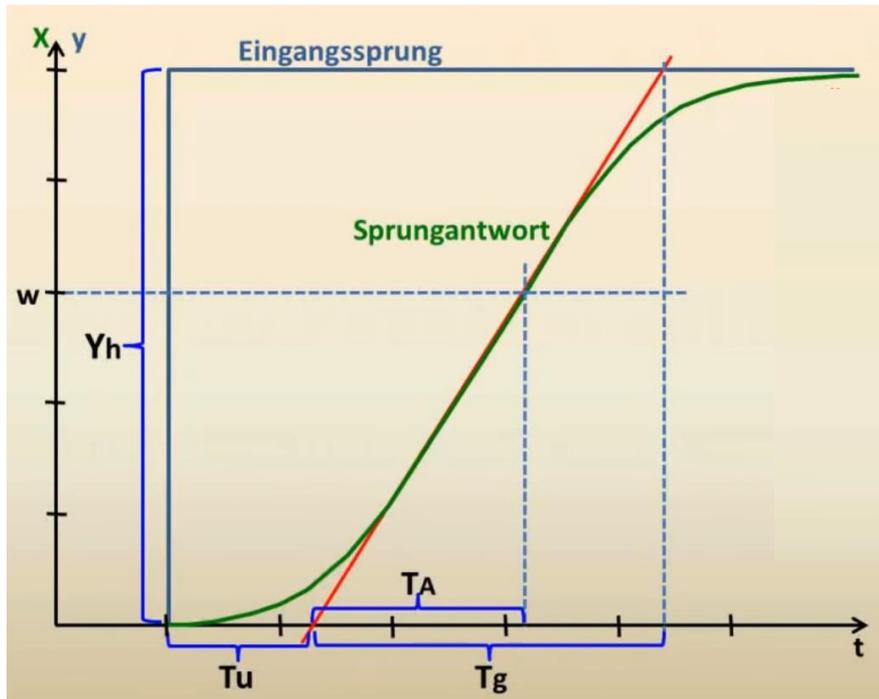


Unbekannte Regelstrecken – Typische Regelstrecken

Typische Regelstrecken sind P-, I-Strecken, Verzögerte und Totzeit Strecken

Verzögerte Strecke n-Ordnung

Einzeichnen der Wendetangente im steilsten Punkte des Verlaufs.



Übertragungswert $K_s = \Delta x / \Delta y = Y_{yh} / Y_h$

Verzugszeit T_u (auch Ersatztotzeit genannt) = 0 bei PT1 Strecken (Verzögerung 1. Ordnung)

Ausgleichszeit T_g (auch Ersatz-Zeitkonstante) = Tau bei PT1 Strecken

Sollwert w – Angenommen

Anlaufzeit = Schnellstmögliche Zeit bis zum Erreichen des Sollwert:
 $= T_a * \Delta y / Y_h$

Anlaufwert = Kehrwert der größtmöglichen Änderungsgeschwindigkeit einer Regelstrecke $A = T_a / \Delta x * \Delta y / Y_h$

Schwierigkeitsgrad: $S_o = T_u / T_g$

S_o	0...0,1	sehr gut regelbar
	0,1...0,2	gut regelbar
	0,2...0,4	befriedigend regelbar
	0,4...1,0	schwer regelbar
	> 1,0	kaum noch regelbar

Die Korrekturfaktoren (in blau) sind 1 bzw. können entfallen, wenn $\Delta y = Y_h$, d.h. wenn der maximal mögliche Stellsprung angewendet wurde.

Unbekannte Regelstrecken – Typische Regelstrecken

Beispiel:

Allgemein:

X = Ausgangsgröße der Regelstrecke = Wirkung

Y = Stellgröße = Eingangsgröße der Regelstrecke = Ursache

2) Heizungs-Regelstrecke

Der Anlaufwert eines großen elektrischen Ofens beträgt 8s/K.
Wieviel Zeit benötigt der Ofen bei halber Heizleistung für eine
Temperatur-Änderung von 40 K ?

Lösung:

$$A = \Delta t / \Delta x = 1 / v_{\max} = 8 \text{ s/K}$$

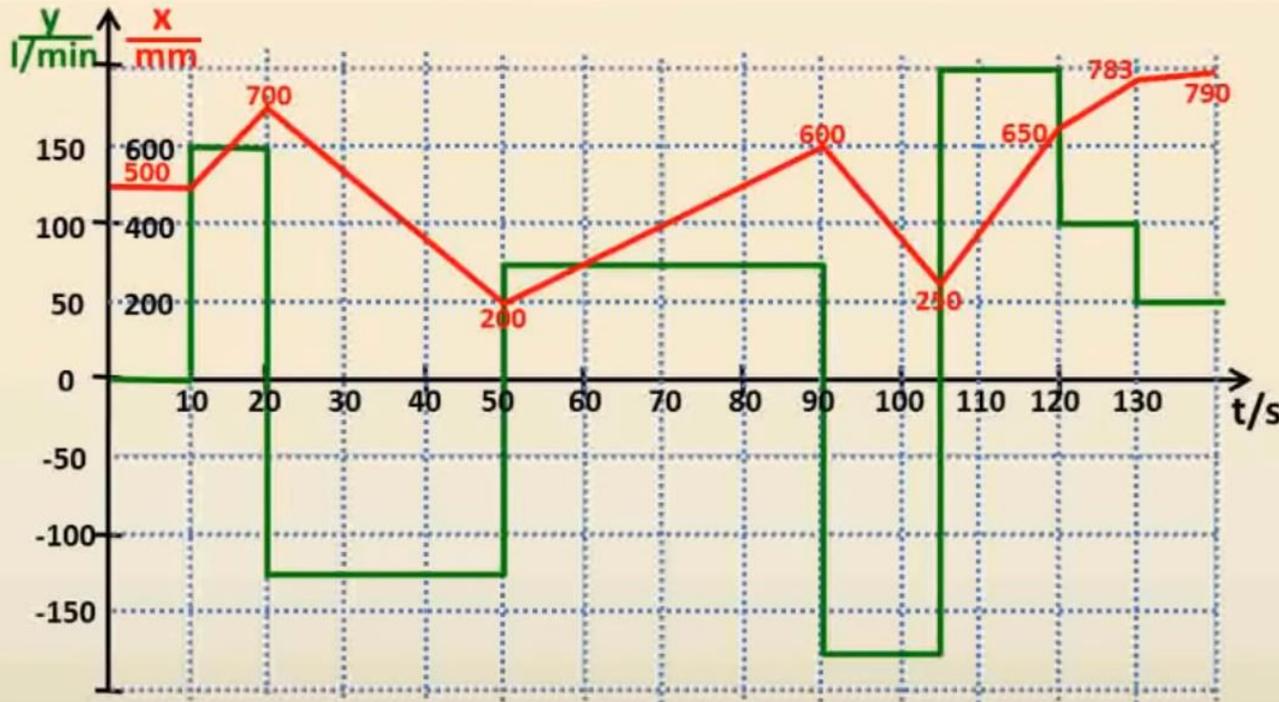
$$v_{\max} = 1 / A = 0,125 \text{ K/s}$$

$$v_{50\%} = 0,0625 \text{ K/s}, A_{50} = 1 / v_{50\%} = 16 \text{ s/K}$$

$$\Delta t = \Delta x \cdot A_{50} = 40 \text{ K} \cdot 16 \text{ s/K} = 640 \text{ s}$$

Unbekannte Regelstrecken – Typische Regelstrecken

Beispiel:



Lösung:

a) Das Flüssigkeits-Volumen im Behälter ergibt sich aus dem Produkt Grundfläche x Höhe.

Für 1 cm Pegel-Änderung ist also ein Zu- oder Abfluß von $1250 \cdot 1 = 1250 \text{ cm}^3 = 1,25 \text{ l}$ nötig.

- 150 l/min 10 s lang >>> 25 l = 20 cm
- 125 l/min 30 s lang >>> 62,5 l = 50 cm
- 75 l/min 40 s lang >>> 50 l = 40 cm
- 175 l/min 15 s lang >>> 43,75 l = 35 cm
- 200 l/min 15 s lang >>> 50 l = 40 cm
- 100 l/min 10 s lang >>> 16,67 l = 13,3 cm
- 50 l/min 10 s lang >>> 8,33 l = 6,67 cm

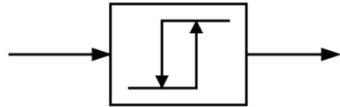
b) $K_I = v_x / \Delta y$
 $= (400 \text{ mm} / 40 \text{ s}) / (75 \text{ l} / \text{min})$
 $= (10 \text{ mm} / \text{s}) / (1,25 \text{ l} / \text{s})$
 $= 8 \text{ mm} / \text{l}$

Bei einem Flüssigkeitsbehälter ändert sich der Zufluß gemäß dem vorstehenden Diagramm. Zum Zeitpunkt $t = 0$ hat der Pegel im Behälter den Wert 500 mm. Die Querschnittsfläche des Behälters ist 1250 cm^2 .

- a) Zeichne den zeitlichen Verlauf des Pegels!
- b) Berechne den Übertragungs-Beiwert der vorliegenden Regelstrecke!

Definition: Zweipunktregelung

- Nichtstetig arbeitender Regler
- Zwei Ausgangszustände (2-Punkt-Regler)



Strukturbild: Zweipunktregler

Stetige Regelung

P, I, PI, PD, PID

Stellgröße kann innerhalb eines bestimmten Bereiches jeden Zwischenwert annehmen

Nichtstetige Regelung

2-Punkt-Regelung (An-Aus) , 3-Punkt-Regelung

Nur Einstellung in festen Stufen

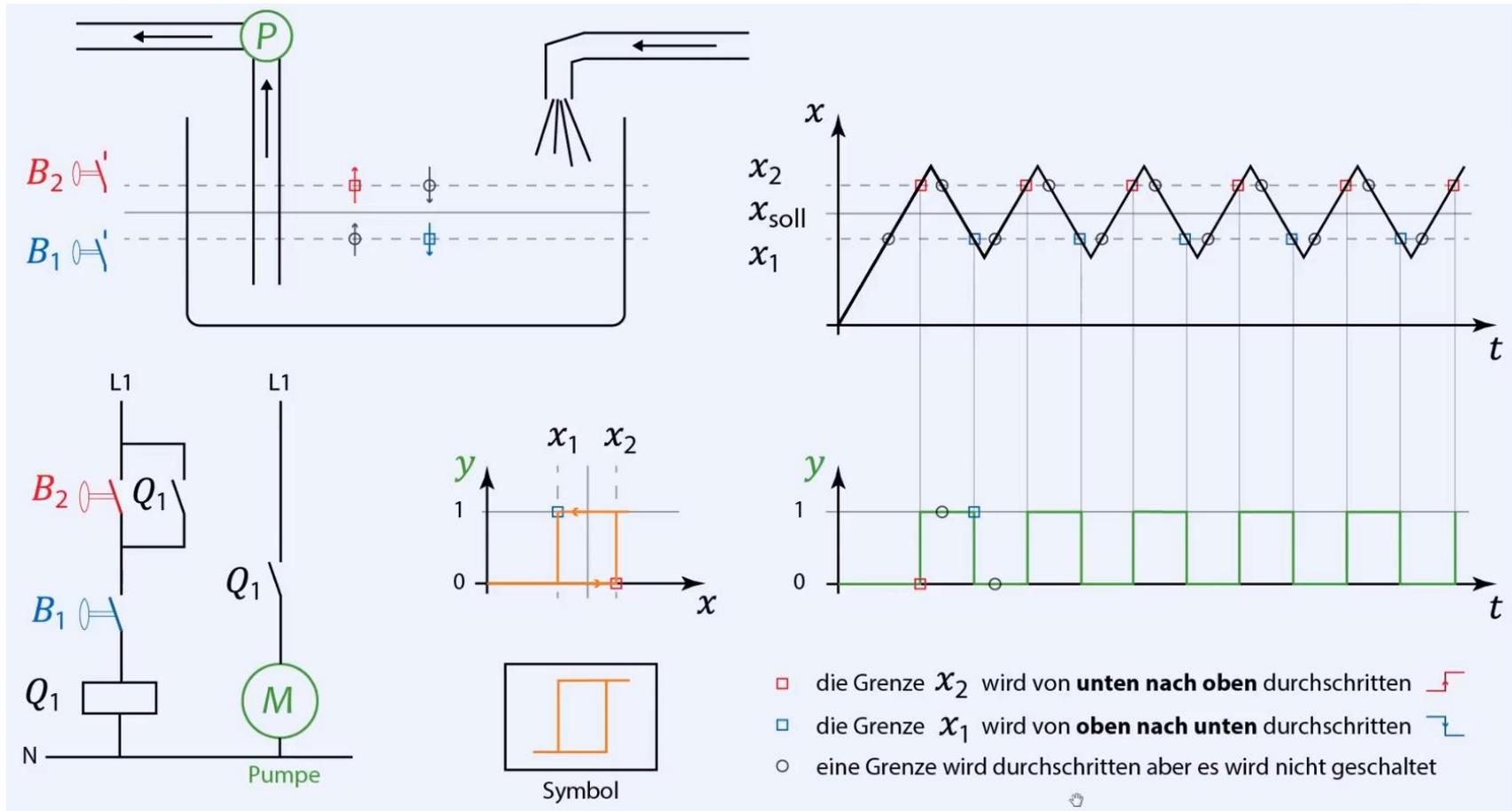
Zweipunktregler

- Wenn der Istwert über oder unter dem Sollwert liegt, wird der obere oder der untere Ausgangszustand eingenommen.
- Einsatzfall: Stellgröße nicht stetig variabel also nur zwischen zwei Zuständen wechseln kann, z. B. Ein/Aus
- Erreicht eingeschwungenen Zustand
- Kommt nie zur Ruhe.
- Bei starken Änderungen der Führungsgröße kann er aber Regelabweichungen schneller ausregeln.

Beispiel: Thermostat, der ein Heiz- oder Kühlgerät mit nicht variabler Leistung steuert.

Um schnelle Schwingungen des Ausgangs zu vermeiden, haben Zweipunktregler oft eine eingebaute Hysterese, d. h. einen gewissen Totbereich um den Schwellwert, um den sich der Istwert ändern muss, um ein Umschalten in den gegenteiligen Ausgangszustand zu bewirken. Beispielsweise schaltet ein Thermostat ein Heizgerät beim Erreichen von 21 °C ab, aber erst beim Unterschreiten von 18 °C wieder ein, was einer Hysterese von 3 K entspricht.

Beispiel: Zweipunktregelung / Hysterese-Regelung



Definition: Dreipunktregelung

- Nichtstetig arbeitender Regler
- Drei Ausgangszuständen (3-Punkt-Regler)



Dreipunktregler

- Wenn der Istwert unter dem ersten Sollwert, zwischen erstem und zweitem Sollwert, oder über dem zweiten Sollwert liegt, wird der erste, zweite oder dritte Ausgangszustand eingenommen.
- Ein Dreipunktregler kann aber auch zweistufige Stellglieder ansteuern, beispielsweise Gas- oder Ölbrenner mit zwei Leistungsstufen, wobei beim Unterschreiten des niedrigeren Sollwertes die zweite Stufe hinzugeschaltet wird.
- Ein Dreipunktregler kann auch durch die Kombination von zwei Zweipunktreglern mit Umschaltkontakten oder zusätzlichen Relais bzw. Logikfunktionen realisiert werden.

Beispiel 1: Heiz/Kühl-Thermostat

Unter der Minimaltemperatur schaltet er ein Heizgerät ein, über der Maximaltemperatur aktiviert er ein Kühlgerät; im Bereich zwischen Minimal- und Maximaltemperatur sind beide ausgeschaltet.

Beispiel 2: Lageregler - Höhe der Bürsten in einer Autowaschstraße (zu tief / zu hoch / Stopp).

Ein Zweipunktregler hätte hier den Nachteil, dass sich die Bürsten laufend um den Sollwert auf und ab bewegen würden.

Heutige Begrifflichkeiten

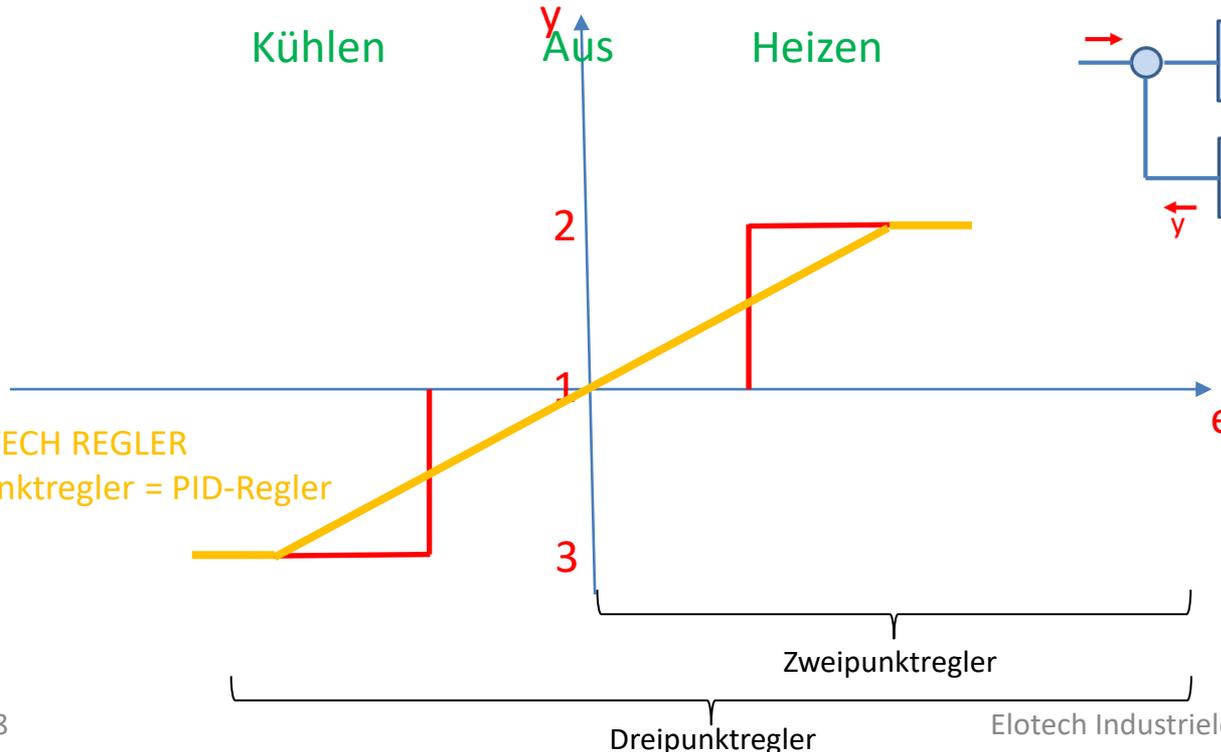
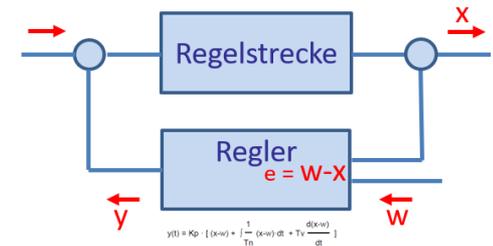
- Der S1000 ist ein klassischer Zweipunktregler auch „klick-klack-Regler“ genannt.
- Alle anderen ELOTECH-Produkte sind keine nach physikalischen Grundlagen definierten Zweipunkt- oder Dreipunktregler!
- Dieses sind Weiterentwicklungen wie auch die meisten anderen im Markt üblichen hochwertigen Produkte.

Beispiel

Kühlen

y Aus

Heizen

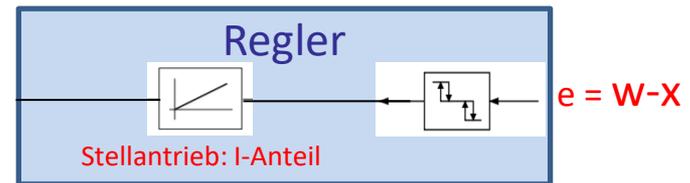
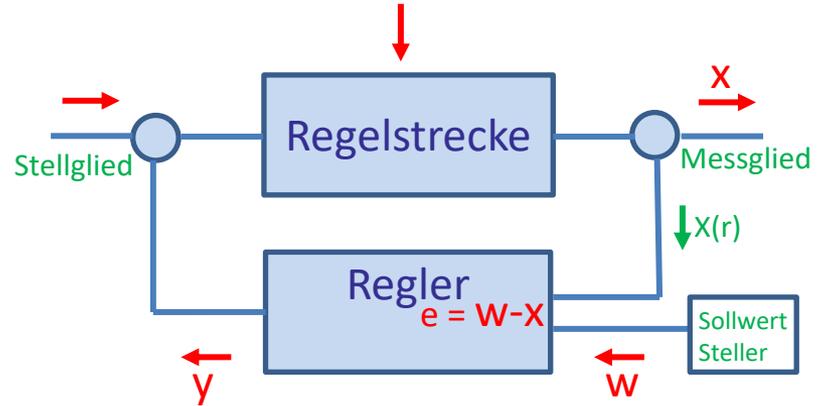


Arbeitsweise ELOTECH REGLER
Zweipunkt/Dreipunktregler = PID-Regler

Sonderfall: Dreipunktschrittregelung

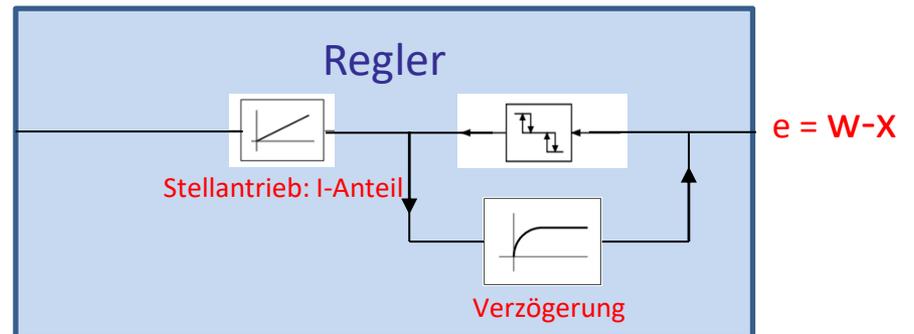
Sonderfall Dreipunkt-Schrittregler

- Ohne Rückführung: Anwendung Durchflussregelung



- Mit Rückführung: Ziel Reduzierung der Schwankungsbreite durch den Einsatz einer Verzögerung

Bei richtiger Dimensionierung erreicht man ein quasistetiges Verhalten, ähnlich einem P-, PI- oder PID-Regler. Wegen der toten Zone kann das Verhalten sogar günstiger als das von stetigen Reglern, da Störsignale weniger Probleme machen.



ELOTECH Temperaturregler Algorithmus

Im Gegensatz zu dem bekannten PID – Regelalgorithmus, der durch die folgende Gleichung beschrieben wird,

$$y(t) = K_p \cdot \left[(w-x) + \int \frac{1}{T_n} (w-x) \cdot dt + T_v \frac{d(w-x)}{dt} \right]$$

arbeiten ELOTECH-Temperaturregler mit einem **PD/I-Stellverhalten**.

PD/I ist eine modifizierte Form der PID-Regelung und soll den Nachteil der PID-Regelung, das Überschwingen in der Anfahrphase, ausgleichen.

Das heißt, Anfahren des Sollwertes weitgehend ohne Überschwingen und Regeln ohne bleibende Regelabweichung.

Das Stellverhalten aller ELOTECH-Temperaturregler ist in seiner Struktur umschaltbar:

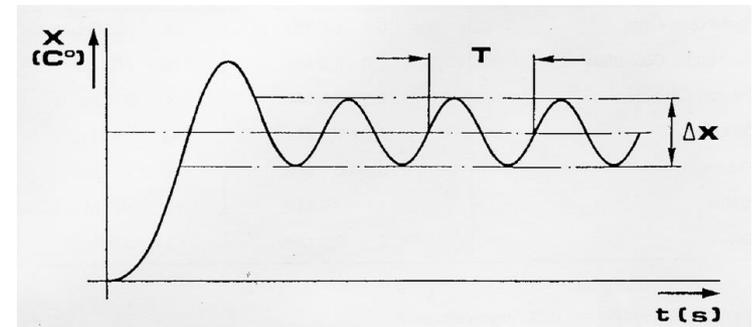
- a. ohne Rückführung, ein-aus (bei Einstellung von: xp = OFF)
- b. P-Regler (bei Einstellung von: Tv und Tn = OFF)
- c. PD-Regler (bei Einstellung von: Tn = OFF)
- d. PI-Regler (bei Einstellung von: Tv = OFF)
- e. PD/I-Regler (bei Einstellung von P, D und I)

Ermittlung der ELOTECH Parameter

ELOTECH: Ermittlung des Proportionalbereiches (x_p)

Der Regler wird mit x_p (Parameter: P) = OFF betrieben und hat so ein reines ein/aus-Verhalten.
 Aus der entstehenden Schwingungsamplitude des Istwertes wird der x_p -Bereich wie folgt errechnet:

Schwingungsamplitude (ΔX) x 1,5,2,0 x 100%
 x_p = Messbereichsumfang = $1/K_p \times 100\% K_p$
 = Proportionalbeiwert des Reglers.



Entspricht der Regler-Verstärkung

Alternativ kann man den Proportionalbereich (P) auch solange vergrößern, bis die Strecke nicht mehr schwingt.

Einfluss des Proportionalbereiches auf das Regelverhalten:

x_p groß: P-Anteil groß

x_p klein: P-Anteil klein

x_p größer = Verstärkung kleiner: Regelverhalten stabiler, träger. Schwankungsbreite kleiner

x_p kleiner = Verstärkung größer: Regelverhalten weniger stabil. Schwankungsbreite größer



Ermittlung der ELOTECH Parameter

Ermittlung der Vorhaltezeit (T_v) und Nachstellzeit (T_n):

Der Regler wird mit x_p (Parameter: P) = OFF betrieben und hat so ein reines ein/aus-Verhalten. Aus der Schwingungsweite der Amplitude (Amplitudendauer) des Istwertes errechnet sich die Verzugszeit (T_u) der Regelstrecke und aus dieser die Vorhaltezeit (T_v) und Nachstellzeit (T_n) des Reglers.

Bei einem Ein-/Ausschaltverhältnis von ca.1:1 können T_v und T_n annäherungsweise wie folgt errechnet werden:

$$T_v = 0,3 \dots 0,4 \times T_u$$

$$T_n = 5 \times T_v \quad (T_n = \text{OFF bedeutet „unendliche“ Nachstellzeit})$$

Prinzipieller Einfluss von T_v auf das Regelverhalten:

T_v groß: D-Anteil groß

T_v klein: D-Anteil klein

T_v zu klein: Überschwingen

T_v zu groß: „sägezahnförmiges“ Einschwingen

Prinzipieller Einfluss von T_n auf das Regelverhalten:

T_n groß: I-Anteil klein

T_n klein: I-Anteil groß

T_n größer: Regelverhalten träger, Ausregeln langsamer

T_n zu klein: Schwingen

Wahl der Schaltzykluszeit (C): Die Schaltzykluszeit sollte nicht größer als $T_v \times 0,33$ liegen.

