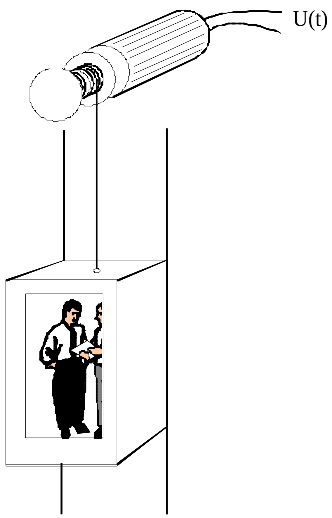
3 Regelstrecken und Regler

3.1 Typen von Regelstrecken



Wiederholung: Die Regelstrecke ist derjenige Teil des Wirkungsweges, welcher den aufgabengemäß zu beeinflussenden Teil der Anlage darstellt.

Eine Regelstrecke (System) verhält sich **ohne Ausgleich**, links, wenn nach einem begrenzten Eingangssignal das System auf keinen neuen Beharrungszustand zustrebt.

Stellt sich ein neuer Beharrungszustand ein, liegt eine Strecke **mit Ausgleich**, unten, vor.

Abbildung 3-1 Aufzugssystem: Strecke ohne Ausgleich[1]

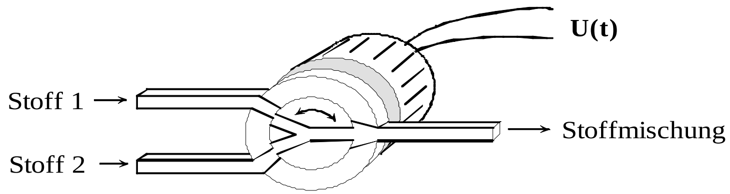


Abbildung 3-2 Mischungssystem: Strecke mit Ausgleich[2]

[1]Tröster, F.: Steuerungs- und Regelungstechnik für Ingenieure; München, Wien: Oldenbourg, 2005
[2]Tröster, F.: Steuerungs- und Regelungstechnik für Ingenieure; München, Wien: Oldenbourg, 2005

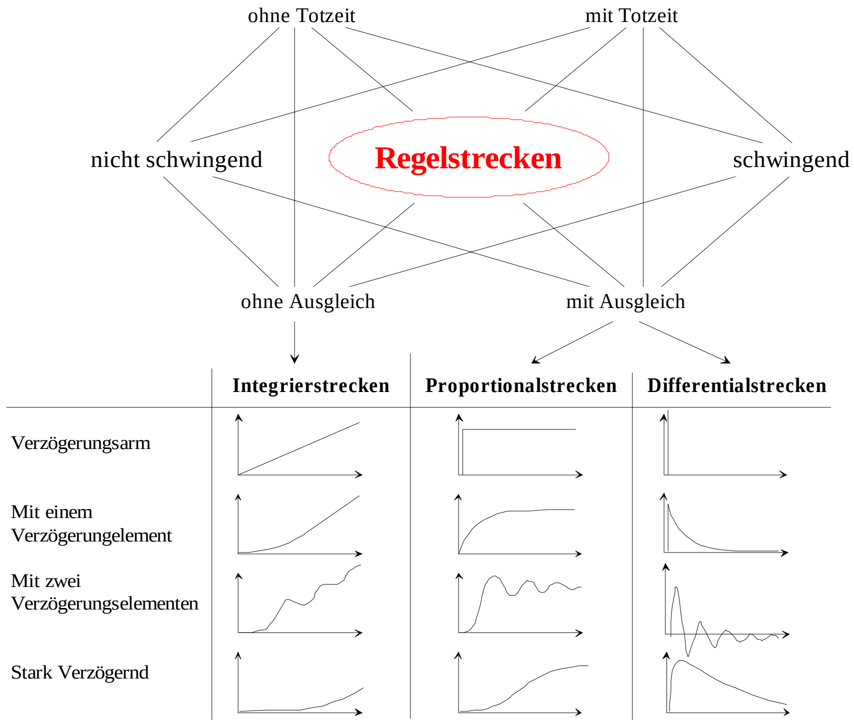
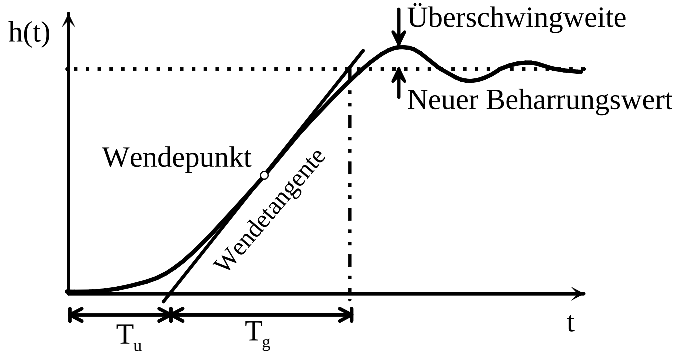


Abbildung 3-3 Arten von Regelstrecken[1]

[1]Tröster, F.: Steuerungs- und Regelungstechnik für Ingenieure; München, Wien: Oldenbourg, 2005

3.1.1 Strecken mit Ausgleich



Die **Verzugszeit T_u** ist der Zeitabschnitt, der von Beginn des Übergangs bis zu der Wendetangente einer Sprungantwort dauert.

Die **Ausgleichszeit T_g** ist die Zeit, die für den Übergang vom Ausgangszustand zum neuen Beharrungswert benötigt wird, als verliefe dieser entlang der Wendetangente an die Sprungantwort.

Die **Überschwingweite** kennzeichnet die maximale Amplitude, mit der das Ausgangssignal bei einem Zustandswechsel über den neuen Beharrungswert hinaus schwingt.

Annäherung eines P-T_n-Systems durch P-T_1-T_t-Systeme

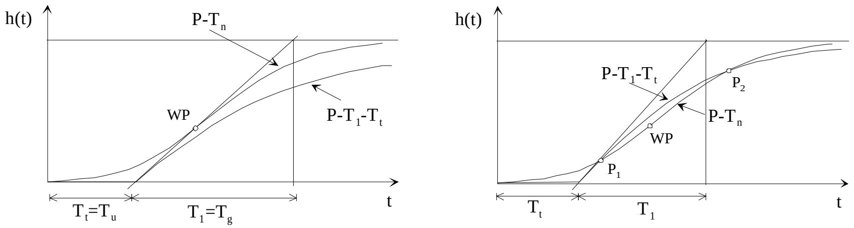


Abbildung 3-4 Annäherung eines P-T_n-Systems durch P-T_1-T_t-Systeme[1]

[1]Tröster, F.: Steuerungs- und Regelungstechnik für Ingenieure; München, Wien: Oldenbourg, 2005

$$T_1 = \frac{t_2 - t_1}{\ln\left(\frac{h(\infty) - h(t_1)}{h(\infty) - h(t_2)}\right)}$$

$$T_t = t_1 - T_1 \cdot \ln\left(\frac{h(\infty)}{h(\infty) - h(t_1)}\right).$$

Variante links: Festlegung $T_t = T_u$ und $T_1 = T_g$ → häufig starke Abweichung bei t → ∞ (siehe linke Abb.).

Variante rechts: Festlegung von P_1 und P_2 vor und nach dem Wendepunkt WP. $t_1 = t(P_1)$, $t_2 = t(P_2)$. → günstiger als oben.

Weitere Methoden zur Kennwertermittlung siehe separates Kapitel.

3.1.2 Regelbarkeit

Definition: Schwierigkeitsgrad einer Regelstrecke

Ein Kriterium für die Regelbarkeit von Strecken höherer Ordnung ist der Schwierigkeitsgrad S, welcher berechnet wird durch das Verhältnis

$$S = \frac{\text{Verzugszeit}}{\text{Ausgleichszeit}} = \frac{T_u}{T_g}.$$

Es gilt für Strecken mit Ausgleich:

Je kleiner der Schwierigkeitsgrad S ist, desto besser ist die Strecke regelbar.

Regelbarkeit und Verzögerungsordnung einer Regelstrecke

Die Regelbarkeit lässt sich als Kehrwert des Schwierigkeitsgrads S angeben. Für stark verzögernde Strecken mit jeweils gleichen Verzögerungszeiten ergibt sich ein näherungsweiser Zusammenhang zwischen Verzögerungsordnung und Regelbarkeit:

$$S^{-1} = \frac{T_g}{T_u} \approx \frac{10}{n-1}$$

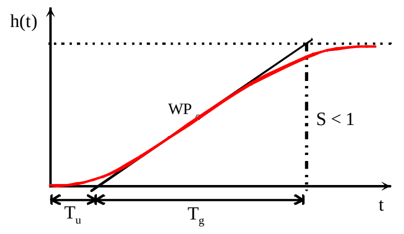
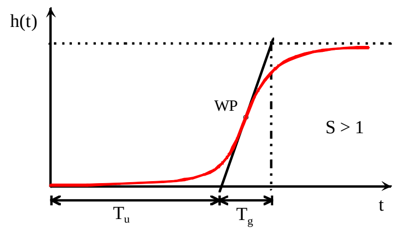
	S klein Gut regelbar
	S groß Schlecht regelbar

Abbildung 3-5 Regelstrecken mit unterschiedlichem Schwierigkeitsgrad[1]

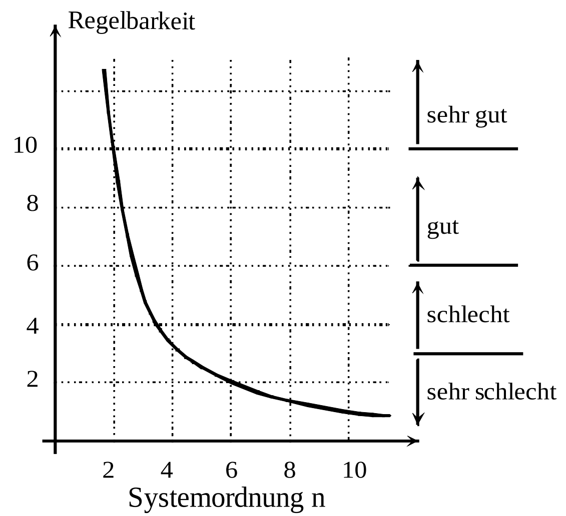
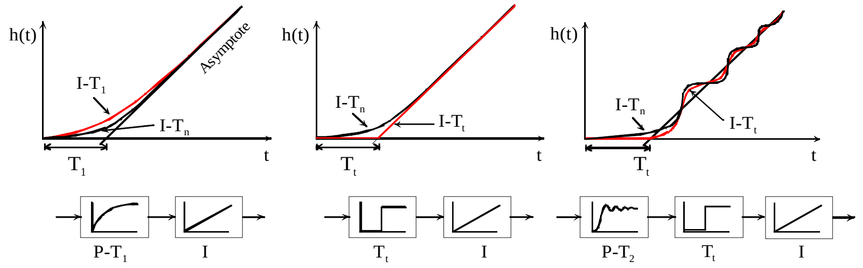


Abbildung 3-6 Regelbarkeit von P-T_n-Systemen

[1]Tröster, F.: Steuerungs- und Regelungstechnik für Ingenieure; München, Wien: Oldenbourg, 2005

3.1.3 Strecken ohne Ausgleich



Strecken ohne Ausgleich sind im allgemeinen schlecht regelbar!

3.2 Regler

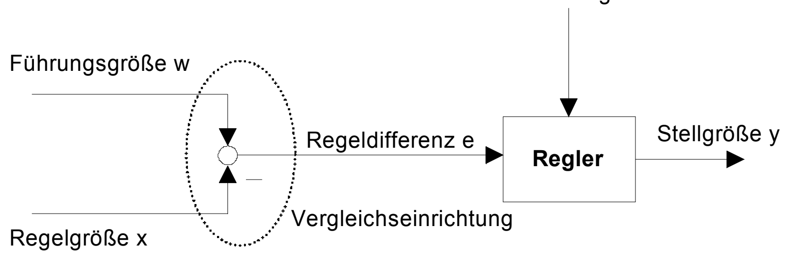
Aufgabe, Aufbau und Einteilung von Regeleinrichtungen:

Die Regeleinrichtung ist derjenige Teil des Wirkungswegs, welcher die aufgabengemäße Beeinflussung der Regelstrecke über die Stelleinrichtung bewirkt.

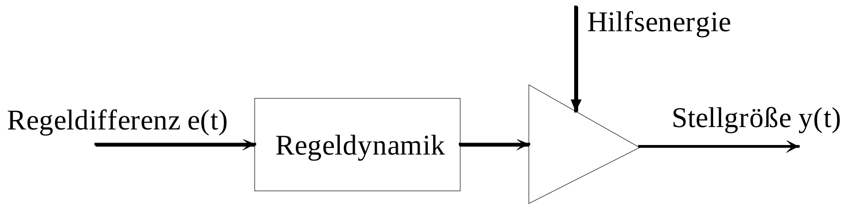
Die Regeleinrichtung besteht aus:

- Vergleichseinrichtung von Regelgröße mit Führungsgröße und
- Regler zur Bildung der Stellgröße.

Die Vergleichseinrichtung überprüft als Eingangsglied der Regeleinrichtung die Regelgröße x mit der Führungsgröße w auf Abweichung. Das Ergebnis ist die Regeldifferenz e(t). Sie dient als Regelmaß für den Regler.



Der Regler generiert aus der Regeldifferenz eine für die Regelstrecke geeignete dynamische Stellgröße, welche den Anforderungen der Regelaufgabe nachkommt. Bei Bedarf stellt er sie als leistungsstarkes Ausgangssignal zur Verfügung.



3.2.1 Regler mit und ohne Hilfsenergie

Muss dem Stellsignal eines Reglers Energie über einen Verstärker zugeführt werden, um für die Beeinflussung der erweiterten Regelstrecke genug Leistung zu besitzen, spricht man von einem **Regler mit Hilfsenergie**.

Liefert die Vergleichseinrichtung einer Regeleinrichtung zur Betätigung der Stelleinrichtung ausreichend viel Energie, liegt ein **Regler ohne Hilfsenergie** vor.

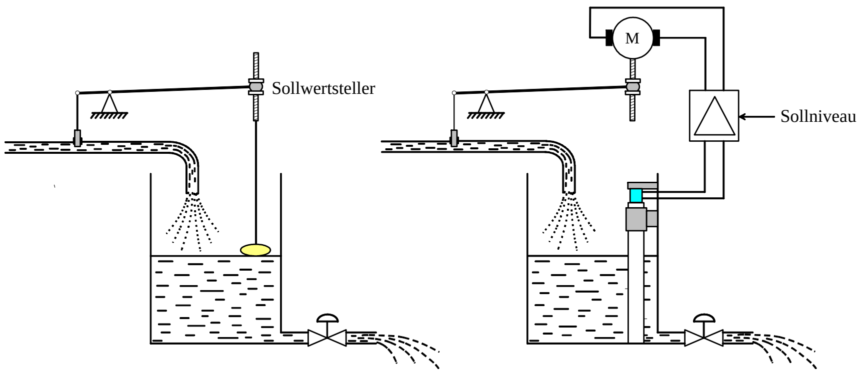


Abbildung 3-7 Regler ohne und mit Hilfsenergie[1]

Hinweis: Hier (rechts) liegt kein stabiler Regelkreis vor!

[1]Tröster, F.: Steuerungs- und Regelungstechnik für Ingenieure; München, Wien: Oldenbourg, 2005

3.2.2 Reglerarten

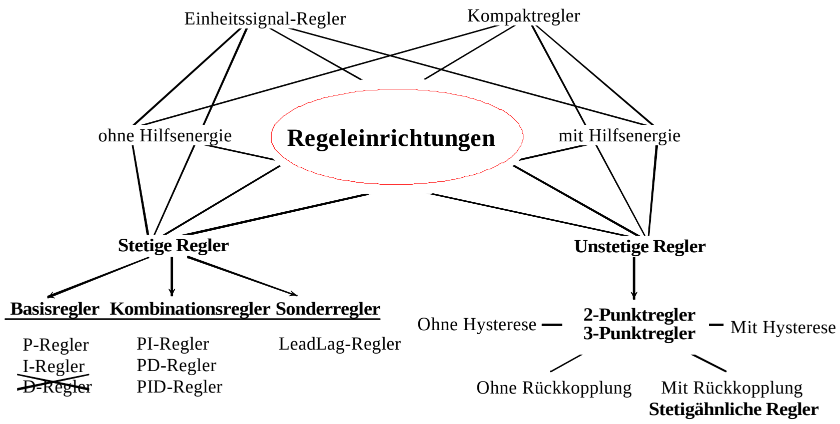


Abbildung 3-8 Arten von Regeleinrichtungen[1]

Abbildung 3-9 Kompaktregler 96x96 mm, 2-/4-kanalig[2]

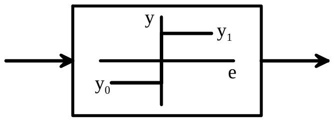
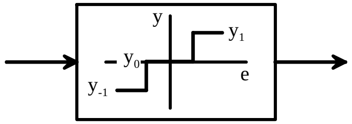
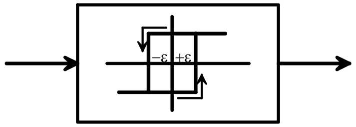
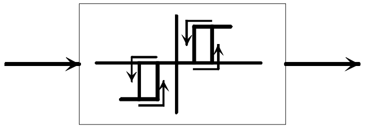
Ein stetiger Regler generiert aus dem kontinuierlich-analogen Eingangssignal (der Regeldifferenz) ein kontinuierlich-analoges Stellsignal, das jeden Wert des Stellbereichs annehmen kann. Sie greifen über das Stellsignal stetig in die Streckenprozesse ein.

Ein unstetiger Regler erzeugt als Reaktion auf ein kontinuierlich-analoges Eingangssignal nur eine beschränkte Anzahl von Stellwerten für die Regelstrecke.

Der Stellbereich Y_h eines Reglers ist der gesamte Signalbereich, in dem die Stellgröße Einfluss auf die Regelstrecke nehmen kann, um eine evtl. vorhandene Regeldifferenz zum Verschwinden zu bringen.

[1]Tröster, F.: Steuerungs- und Regelungstechnik für Ingenieure; München, Wien: Oldenbourg, 2005
[2]http://www.gossenmetrawatt.com/deutsch/produkte/r0300.htm#

3.2.3 Unstetige Regler

	Der **Zweipunktregler** weist als unstetiger Regler nur zwei Zustände der Stellgröße y(t) auf. Die Stellgröße y(t) mit den Werten y_0 und y_1 muss innerhalb des Stellbereichs Y_H liegen.	Bei einem **Dreipunktregler** kann die Stellgröße y(t) drei Werte innerhalb des Stellbereichs Y_H annehmen.
Ohne Hysterese		
Mit Hysterese	 e-ε → y:=y_0 e+ε → y:=y_1	

Große Hysterese ε → große Schwankungsbreite ΔX oder Schwingspanne x_δ der Regelgröße → große Schaltdauer T_S → kleine Schaltfrequenz f_S

Die Kennlinien verdeutlichen die Wirkungsweise der unstetigen Regler. Bei exakt festgelegten Werten der Regeldifferenz schalten sie in jeweils andere Zustände um. Wendet man dieses Ausgangsverhalten auf eine beliebige Regelstrecke an, erhält man die folgende Regeldynamik:

Die Genauigkeitsforderung einer Regelung verlangt eine verschwindende Regeldifferenz e(t) = 0. Der Zweipunktregler schaltet genau bei diesem Wert. Da alle technischen Signale, somit auch die Regelgröße, minimale Signalschwankungen aufweisen, schaltet der Regler mit hoher Frequenz hin und her. Die Lebensdauer des Reglers verkürzt sich dadurch drastisch.

Man verwendet deshalb schaltende Regler mit Hysterese. Sie vermeiden das ständige Umschalten des Ausgangssignals, wenn sich das Eingangssignal in der Umgebung eines Schaltpunkts aufhält.

Fachhochschule Jena
University of Applied Sciences Jena
Fachbereich Elektrotechnik / Informationstechnik
Regelungstechnik (Grundlagen) für WI
Zusammenstellung
Prof. Dr. Jörg Müller

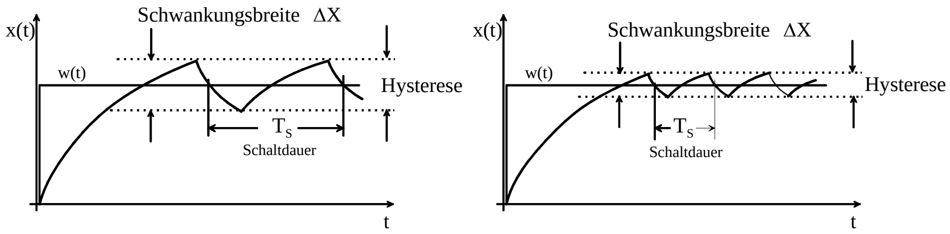


Abbildung 3-10 Schwingungseffekt bei unstetigen Reglern (bei verzögerungsarmer Strecke)[1]

Die **Schwankungsbreite ΔX, Schwingspanne x_δ, Pendelamplitude** einer unstetigen Regelung stellt den Bereich der Regelgröße x(t) dar, innerhalb dessen sie periodische Schwankungen bei konstant anliegender Führungsgröße ausführt.

Die **Schaltfrequenz f_S** einer unstetigen Reglung wird durch die **Schaltdauer T_S** der Regelschwingung bestimmt, die unter stationären Bedingungen auftreten.

Die **mittlere Regelgröße x_m** bei unstetigen Reglern beschreibt die Lage der "gedachten" Regelgröße innerhalb der Schwankungsbreite ΔX, bei welcher die eingeschlossenen Flächen zur Regelgröße unterhalb und oberhalb gleich groß sind.

[1]Tröster, F.: Steuerungs- und Regelungstechnik für Ingenieure; München, Wien: Oldenbourg, 2005

Bsp.: Stark verzögernde Strecke (mit großer Verzugszeit[1] T_u)

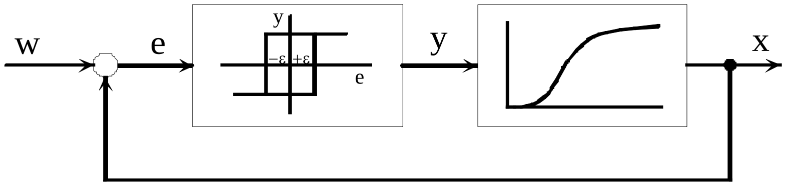
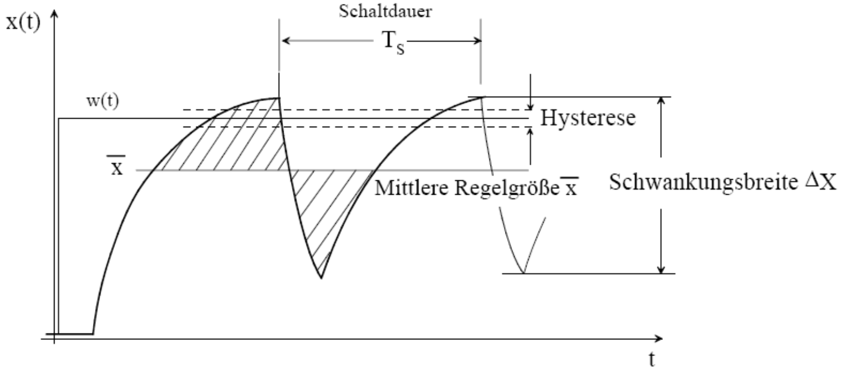


Abbildung 3-11 Regelkreis mit 2-Punkt-Regler (oben) und Regelgüte (unten) bei stark verzögernder Strecke[2]



[1] Einfache Modelle ersetzen die Verzugszeit T_u durch die Totzeit T_t und die Ausgleichzeit T_a durch die Verzögerungszeit T_1

[2] Tröster, F.: Steuerungs- und Regelungstechnik für Ingenieure; München, Wien: Oldenbourg, 2005

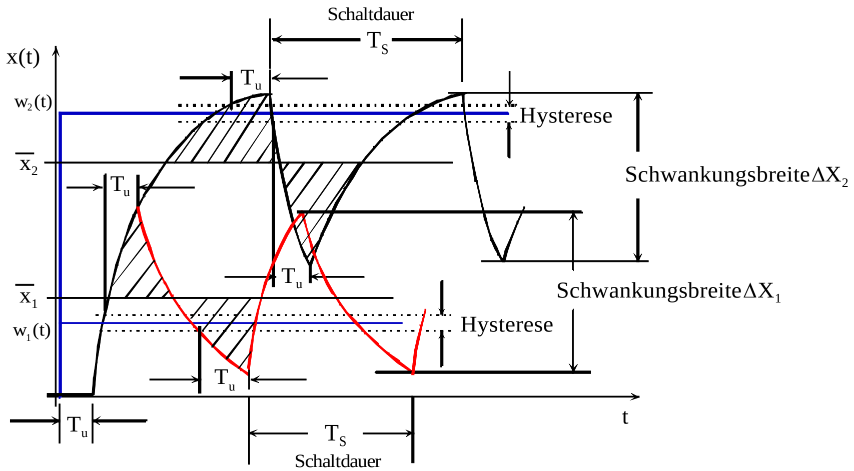


Abbildung 3-12: Regelgüte bei unstetigem Regler und verzögerungsreicher Strecke[1]

w_1, w_2: Sollwerte, hier bei 30% bzw. 70% des Regelbereiches,

$\overline{x}_1$, $\overline{x}_2$: mittlere Regelgrößen

Mittlere Regeldifferenz: $\overline{e} = w - \overline{x}$

Im „unteren“ Arbeitsbereich gilt: $\overline{e}_1 = w_1 - \overline{x}_1 < 0$

Im „oberen“ Arbeitsbereich gilt: $\overline{e}_2 = w_2 - \overline{x}_2 > 0$

Im „mittleren“ Arbeitsbereich gilt demnach: $\overline{e} = w - \overline{x} \approx 0$

Also: Der Arbeitspunkt ist in der Mitte des Arbeitsbereiches X_h des Regelkreises einzurichten.

[1] Tröster, F.: Steuerungs- und Regelungstechnik für Ingenieure; München, Wien: Oldenbourg, 2005

Zweipunktregelung einer Strecke 1. Ordnung mit Ausgleich ohne Totzeit bei unterschiedlichen Sollwerten, Schaltdifferenz $x_\Delta \neq 0$

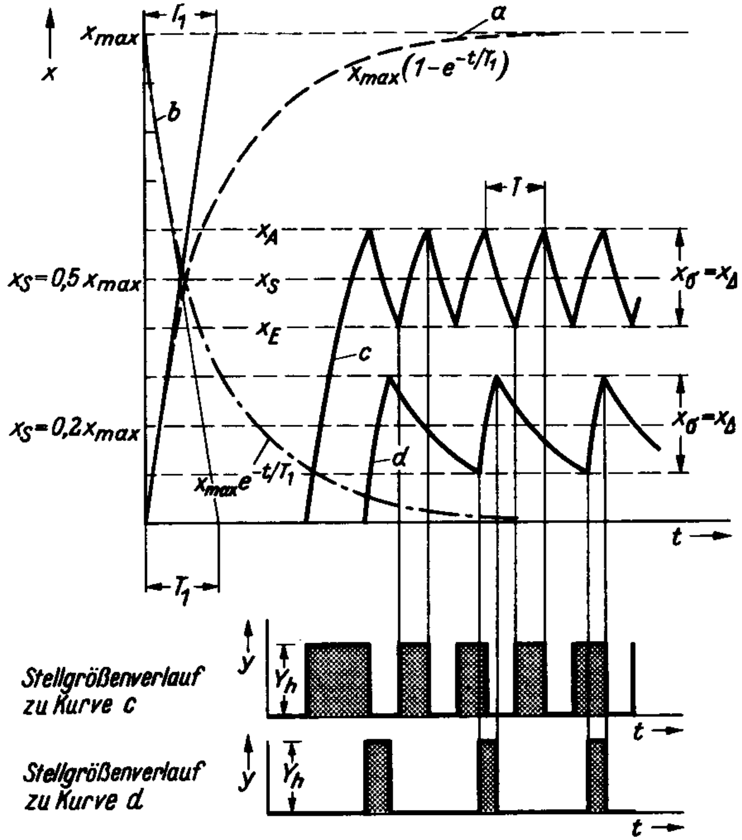


Abbildung 3-13 Verlauf der Regelgröße und der Stellgröße bei einer Strecke 1. Ordnung mit Ausgleich ohne Totzeit.[1]

Schwingspanne x_δ (Schwankungsbreite) = Schaltdifferenz x_Δ (Hysterese).

[1]Mann, H. u.a.: Einführung in die Regelungstechnik: ... ; München, Wien: Hanser, 2005

Zweipunktregelung einer Strecke 1. Ordnung mit Ausgleich und mit Totzeit bei unterschiedlichen Sollwerten, Schaltdifferenz $x_\Delta = 0$

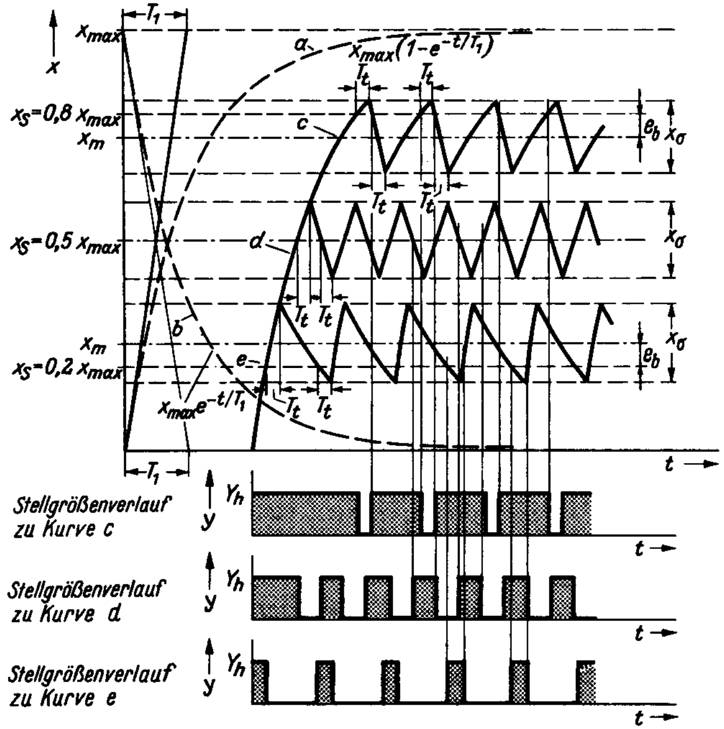


Abbildung 3-14 Verlauf der Regelgröße und der Stellgröße bei einer Strecke 1. Ordnung mit Ausgleich und mit Totzeit.[1]

x_m – Mittelwert der stationären Schwingung

Schwingspanne x_δ (Schwankungsbreite) $\neq$ Schaltdifferenz x_Δ (Hysterese).

[1]Mann, H. u.a.: Einführung in die Regelungstechnik: ... ; München, Wien: Hanser, 2005

Zweipunktregelung einer Strecke 1. Ordnung mit Ausgleich und mit Totzeit, Schaltdifferenz $x_\Delta \neq 0$

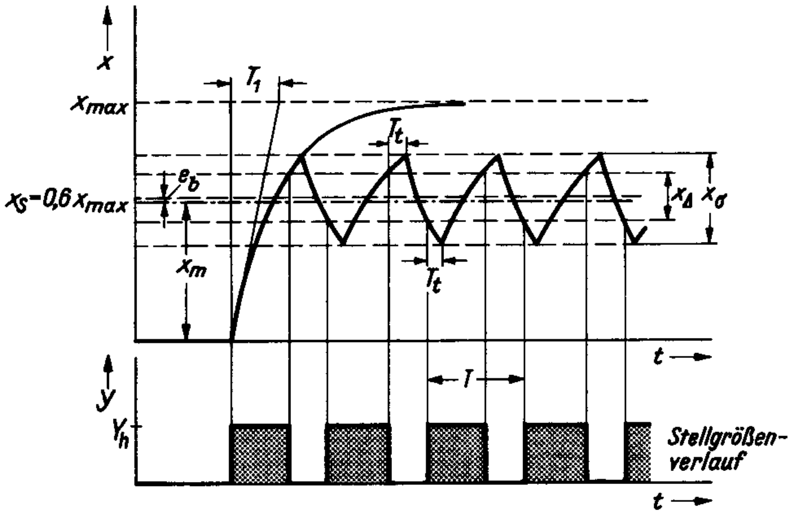


Abbildung 3-15 Verlauf der Regelgröße und der Stellgröße bei einer Strecke 1. Ordnung mit Ausgleich und mit Totzeit.[1]

[1]Mann, H. u.a.: Einführung in die Regelungstechnik: ... ; München, Wien: Hanser, 2005

Näherungsweiser Ersatz einer e-Funktion durch ihre Tangente im Arbeitspunkt (Sollwert) zur Abschätzung wichtiger Kenngrößen:

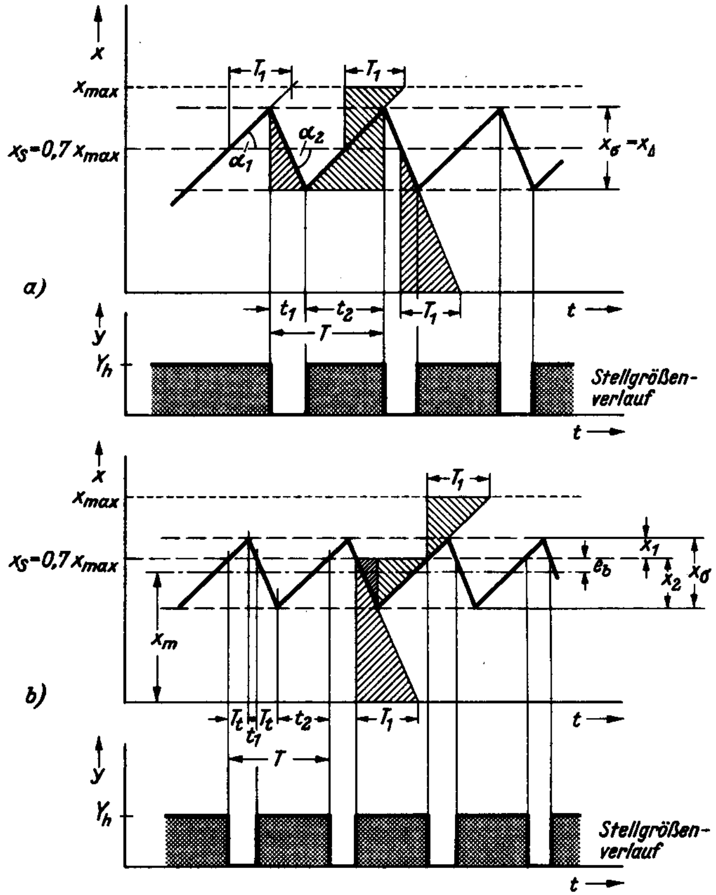


Abbildung 3-16 Näherungsweiser Ersatz einer e-Funktion durch ihre Tangente im Arbeitspunkt (Sollwert)

a) mit Ausgleich, ohne Totzeit, b) mit Ausgleich und mit Totzeit[1]

[1]Mann, H. u.a.: Einführung in die Regelungstechnik: ... ; München, Wien: Hanser, 2005

3.2.4 Kenngrößen unstetiger Regler

Schwingspanne:
$$x_\delta = x_\Delta + T_t \cdot \left(\frac{x_{max} - x_S}{T_{1auf}} + \frac{x_S}{T_{1ab}} \right)$$

Bleibende Regeldifferenz:
$$e_b = \frac{T_t}{2} \cdot \left(\frac{x_S}{T_{1ab}} - \frac{x_{max} - x_S}{T_{1auf}} \right)$$

Schwingungsdauer:
$$T_S = x_\Delta \cdot \left(\frac{T_{1auf}}{x_{max} - x_S} + \frac{T_{1ab}}{x_S} \right)$$
$$+ T_t \cdot \left(2 + \frac{T_{1ab}}{T_{1auf}} \cdot \frac{x_{max} - x_S}{x_S} + \frac{T_{1auf}}{T_{1ab}} \cdot \frac{x_S}{x_{max} - x_S} \right)$$

Schaltfrequenz:
$$f_S = \frac{1}{T_S}$$

$$x_{max} = K_{PS} \cdot Y_h$$

K_{PS} – Streckenverstärkung $\qquad$ Y_h – max. Stellgröße

x_Δ – Schaltdifferenz $\qquad$ x_δ – Schwingspanne

$e_b = x_S - x_m$ $\qquad$ e_b – bleibende Regeldiffernz

x_m – Mittelwert der stationären Schwingung $\qquad$ x_S – Sollwert

T_t – Totzeit $\qquad$ T_1 – Verzögerungszeit

Fallunterscheidungen → angepasste, einfachere Gleichungen für $x_\Delta = 0$, $T_t = 0$ und / oder $T_{1auf} = T_{1ab}$: nächste Seiten[1]

[1] Mann, H. u.a.: Einführung in die Regelungstechnik: ... ; München, Wien: Hanser, 2005

Im einzelnen lassen sich folgende Fälle unterscheiden:

1) Strecke 1. Ordnung mit Ausgleich *ohne* Totzeit ($T_{1auf} = T_{1ab} = T_1$); Regler *mit* Schaltdifferenz, d. h. $x_\Delta \neq 0$. Der Verlauf der Regelgröße geht aus Bild 4.11a hervor. Daraus läßt sich ablesen:

Schwingspanne $\quad x_\sigma = x_\Delta \quad$ (Schaltdifferenz)

Bleibende Regeldifferenz $\quad e_b = 0$

Schwingungsdauer $\quad T = T_1 \dfrac{x_{max} x_\Delta}{x_S(x_{max} - x_S)}$

Schaltfrequenz $\quad f = \dfrac{1}{T} = \dfrac{x_S(x_{max} - x_S)}{T_1 x_{max} x_\Delta}$

Die Schwingungsdauer erhält man aus $T = t_1 + t_2$, wobei sich die Hilfsgrößen t_2 und t_1 aus der Ähnlichkeit der gleichsinnig schraffierten Dreiecke ergeben:

$$\frac{x_\Delta}{t_1} = \frac{x_S}{T_1} \quad \text{d. h.} \quad t_1 = T_1 \frac{x_\Delta}{x_S} \qquad \frac{x_\Delta}{t_2} = \frac{x_{max} - x_S}{T_1} \quad \text{d. h.} \quad t_2 = T_1 \frac{x_\Delta}{x_{max} - x_S}$$

2) Strecke 1. Ordnung mit Ausgleich und *mit* Totzeit ($T_{1auf} = T_{1ab} = T_1$); Regler *ohne* Schaltdifferenz, d. h. $x_\Delta = 0$ (Bild 4.11b).

Schwingspanne $\quad x_\sigma = x_{max} \dfrac{T_t}{T_1} = x_1 + x_2$

mit $\quad x_1 = \dfrac{x_{max} - x_S}{T_1} T_t \quad$ und $\quad x_2 = \dfrac{x_S}{T_1} T_t \qquad$ als Hilfsgrößen.

Bleibende Regeldifferenz $\quad e_b = \dfrac{T_t}{T_1} \left(x_S - \dfrac{x_{max}}{2} \right) = x_S - x_m = \dfrac{x_2 - x_1}{2}$,

wobei der Mittelwert $x_m = x_S + (x_1 - x_2)/2$ ist und die Regeldifferenz negativ für $x_m > x_S$ und positiv für $x_m > x_S$ gerechnet wird.

Schwingungsdauer $\quad T = \dfrac{T_t}{\dfrac{x_S}{x_{max}} - \left(\dfrac{x_S}{x_{max}} \right)^2}$

Schaltfrequenz $\quad f = \dfrac{1}{T} = \dfrac{\dfrac{x_S}{x_{max}} - \left(\dfrac{x_S}{x_{max}} \right)^2}{T_t}$

T erhält man aus $T = 2T_t + t_1 + t_2$ (Bild 4.11b). t_1 und t_2 ergeben sich aus

$$\frac{x_1}{t_1} = \frac{x_S}{T_1} \quad \text{d. h.} \quad t_1 = \frac{T_1}{x_S} x_1 = \frac{x_{max} - x_S}{x_S} T_t$$

$$\frac{x_2}{t_2} = \frac{x_{max} - x_S}{T_1} \quad \text{d. h.} \quad t_2 = \frac{T_1}{x_{max} - x_S} x_2 = \frac{x_S}{x_{max} - x_S} T_t ,$$

so daß $\quad T = T_t \left(2 + \dfrac{x_S}{x_{max} - x_S} - \dfrac{x_{max} - x_S}{x_S} \right) = \dfrac{T_t}{\dfrac{x_S}{x_{max}} - \left(\dfrac{x_S}{x_{max}} \right)^2} \quad$ ist.

Auf Grund ähnlicher Überlegungen wie bei den vorangegangenen Beispielen ergibt sich für die folgenden Fälle (ohne Ableitung):

3) Strecke 1. Ordnung mit Ausgleich und *mit* Totzeit; Regler *mit* Schaltdifferenz; $T_{1\text{auf}} = T_{1\text{ab}} = T_1$.

Schwingspanne $$x_\sigma = \frac{T_t}{T_1}\, x_{\max} + x_\Delta$$

Bleibende Regeldifferenz $$e_b = \frac{T_t}{T_1}\left(x_S - \frac{x_{\max}}{2}\right)$$

Schwingungsdauer $$T = \frac{T_t + \dfrac{x_\Delta}{x_{\max}}\,(T_1 - T_t)}{\left(\dfrac{x_S}{x_{\max}} - \dfrac{x_\Delta}{2x_{\max}}\right)\left(1 - \dfrac{x_\Delta}{2x_{\max}} - \dfrac{x_S}{x_{\max}}\right)}$$

4) Strecke 1. Ordnung mit Ausgleich *ohne* Totzeit; Regler *mit* Schaltdifferenz; $T_{1\text{auf}} \neq T_{1\text{ab}}$.

Schwingspanne $$x_\sigma = x_\Delta$$

Bleibende Regeldifferenz $$e_b = 0$$

Schwingungsdauer $$T = x_\Delta\left(\frac{T_{1\text{auf}}}{x_{\max} - x_S} + \frac{T_{1\text{ab}}}{x_S}\right)$$

5) Strecke 1. Ordnung mit Ausgleich *mit* Totzeit; Regler *ohne* Schaltdifferenz; $T_{1\text{auf}} \neq T_{1\text{ab}}$.

Schwingspanne $$x_\sigma = T_t\left(\frac{x_{\max} - x_S}{T_{1\text{auf}}} + \frac{x_S}{T_{1\text{ab}}}\right)$$

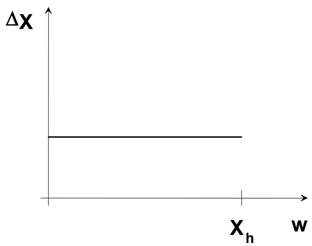
Bleibende Regeldifferenz $$e_b = \frac{T_t}{2}\left(\frac{x_S}{T_{1\text{ab}}} - \frac{x_{\max} - x_S}{T_{1\text{auf}}}\right)$$

Schwingungsdauer $$T = T_t\left(2 + \frac{T_{1\text{ab}}}{T_{1\text{auf}}}\,\frac{x_{\max} - x_S}{x_S} + \frac{T_{1\text{auf}}}{T_{1\text{ab}}}\,\frac{x_S}{x_{\max} - x_S}\right)$$

Eigenschaften von Kenngrößen unstetiger Regler

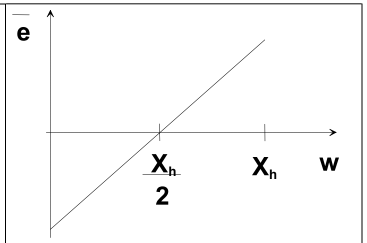
Schwankungsbreite:

- unabhängig vom Arbeitspunkt
- nimmt zu, wenn der Arbeitsbereich $X_h = x_{max} - x_{min}$ der Regelgröße vergrößert wird, also die zugeführten Energieleistung erhöht wird → Regelgenauigkeit wird schlechter



Mittlere bleibende Regeldifferenz:

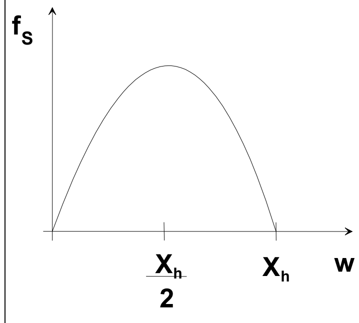
- geht gegen Null, wenn der Arbeitspunkt in der Mitte des Arbeitsbereiches X_h liegt



Schaltfrequenz:

(ohne Berückichtigung der Schalthysterese)

- nimmt im mittleren Arbeitsbereich maximale Werte an



- Die Schwankungsbreite ΔX / Schwingspanne x_δ zeigt sich unabhängig vom gewählten Arbeitspunkt, der vom Wert der Führungsgröße w vorgegeben wird, falls $T_{1auf} = T_{1ab}$
- Die Schwankungsbreite nimmt zu, wenn der Arbeitsbereich der Regelgröße vergrößert wird. Dies bedeutet, dass bei Erhöhung der zugeführten Energieleistung in die Regelstrecke die Regelgenauigkeit leidet.
- Die mittlere bleibende Regeldifferenz verschwindet, wenn der Arbeitspunkt in die Mitte des Arbeitsbereichs gelegt wird.
- Es muss in Kauf genommen werden, dass die Schaltfrequenz f_S im mittleren Arbeitsbereich maximale Werte annimmt.

Fazit:

- Leistungsüberschuss von 100% → Arbeitspunkt liegt in der Mitte des Regelbereiches

Definition: Grundlast

Die **Grundlast** stellt einen fest eingestellten Wert der Stellgröße eines unstetigen Reglers dar, welche nicht geschaltet werden kann.

→ verbleibender Regelbereich wird kleiner, ebenso die Schwankungsbreite

Definition: Unstetige Regler mit Rückkopplung

Bei **unstetigen Reglern mit Rückkopplung** wird die Stellgröße des Reglers über ein Zeitglied subtraktiv auf seinen Eingang zurückgeführt.

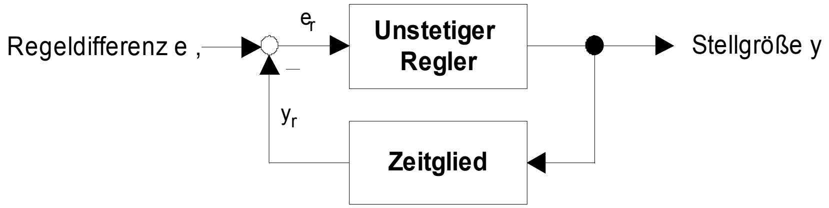


Abbildung 3-17: Unstetige Regler mit Rückkopplung [1]

$$e_r = e - y_r = (w - x) - y_r = w - (x + y_r)$$

→ das Umschalten erfolgt deutlich eher, ist abhängig vom Zeitglied (Verstärkung, Verzögerungszeit)

[1]Tröster, F.: Steuerungs- und Regelungstechnik für Ingenieure; München, Wien: Oldenbourg, 2005

Definition: **Stetigähnlicher Regler**

Unstetige Regler mit Rückkopplung bezeichnet man als stetigähnliche Regler oder quasistetige Regler, da sie ähnliche Regelverhalten wie die stetig wirkenden Regler aufweisen. (wie PD-T_1-System)

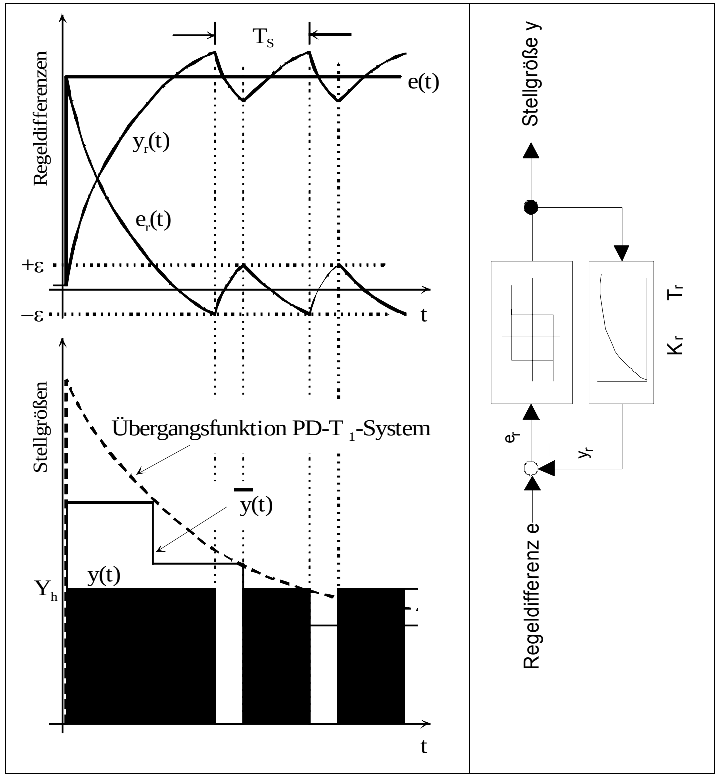


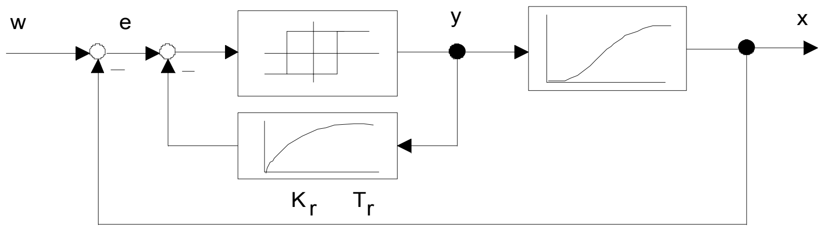
Abbildung 3-18: Dynamisches Verhalten eines Zweipunktreglers mit P-T_1- Rückkopplung[1]

Schaltfrequenz:
$$f_S = \frac{1}{T_r} \frac{e}{2\varepsilon} \left(1 - \frac{e}{K_r \cdot Y_h} \right)$$

[1]Tröster, F.: Steuerungs- und Regelungstechnik für Ingenieure; München, Wien: Oldenbourg, 2005

Maximale Schaltfrequenz f_{smax}: $$f_S = \frac{1}{T_r}\frac{K_r \cdot Y_h}{8\varepsilon}$$

Mittlere wirksame Stellgröße pro Schaltdauer: $$\overline{y}(t) = \frac{T_{Ein}}{T_S} Y_h$$



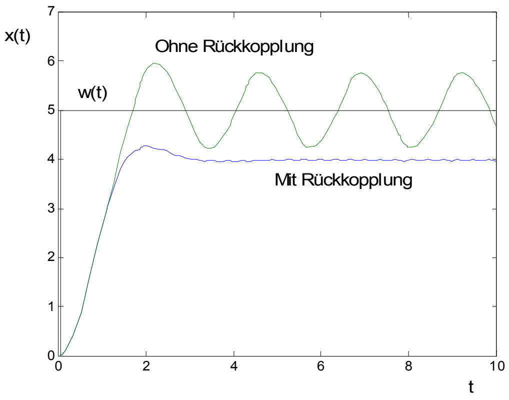


Abbildung 3-19: Verhalten mit/ohne Rückkopplung am Regler und mit verzögerungsreicher Strecke[1]

Maßnahmen zur Reduzierung der Schwankungsbreite ΔX einer Regelgröße:

(1) Verkleinerung der Verzugszeit der Regelstrecke.

(2) Vergrößerung ihrer Ausgleichszeit.

[1]Tröster, F.: Steuerungs- und Regelungstechnik für Ingenieure; München, Wien: Oldenbourg, 2005

(3) Der Regelkreis wird mit dauernd eingeschalteter Grundlast betrieben und die Regelung auf den Arbeitspunkt in einem verkleinerten Arbeitsbereich X_h vorgenommen.

(4) Die Verwendung stetigähnlicher Regler anstelle einfacher Schaltregler verbessert bei richtiger Parameterwahl die Schwankungsbreite der Regelgröße erheblich. Durch die geeignete Auswahl der Rückkopplungsdynamik erzielt man ein gutes Führungs- bzw. Störverhalten der Regelung.

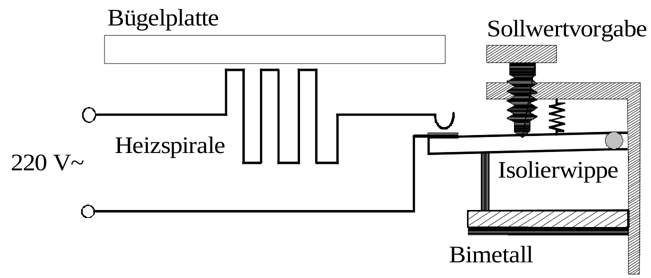


Abbildung 3-20: Temperaturregelung mit Hysterese ohne Rückkopplung[1]

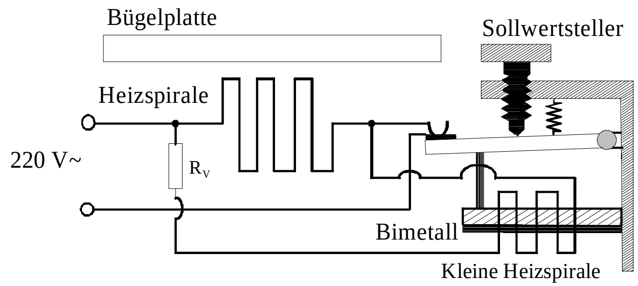


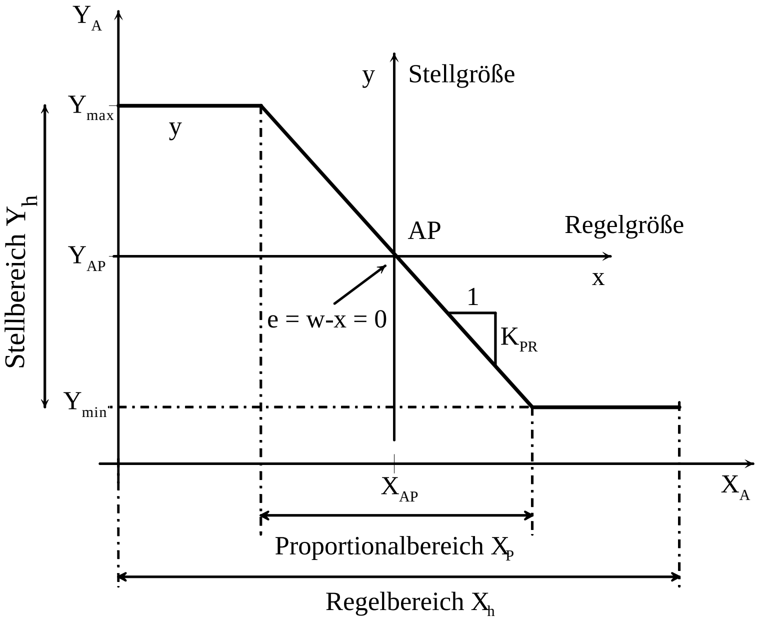
Abbildung 3-21: Temperaturregelung mit Hysterese und mit Rückkopplung[2]

Wirkungsweise: Kleine Heizspirale heizt kleine Platte am Bimetall → Temperaturänderung ΔT (PT_1-Verhalten) → ΔT wirkt additiv zur Regelgröße Temperatur.

[1]Tröster, F.: Steuerungs- und Regelungstechnik für Ingenieure; München, Wien: Oldenbourg, 2005
[2]Tröster, F.: Steuerungs- und Regelungstechnik für Ingenieure; München, Wien: Oldenbourg, 2005

3.2.5 Stetige Regler

3.2.5.1 P-Regler



Proportionalbeiwert

$$K_{PR} = \frac{\text{Stellbereich } Y_h}{\text{Proportionalbereich } X_P}$$

Je größer die Regelabweichung, desto größer die Gegenreaktion

$$y(t) = K_{PR} e(t)$$

Definition: Regelbereich

Der Regelbereich X_h eines Reglers beschreibt den maximalen Aussteuerbereich eines Reglers.

Definition: Proportionalbereich

Der Proportionalbereich X_P gibt denjenigen Wertebereich der Regeldifferenz e an, innerhalb dessen ein P-Regler den Stellbereich Y_h einer Stelleinrichtung proportional ansteuern kann.

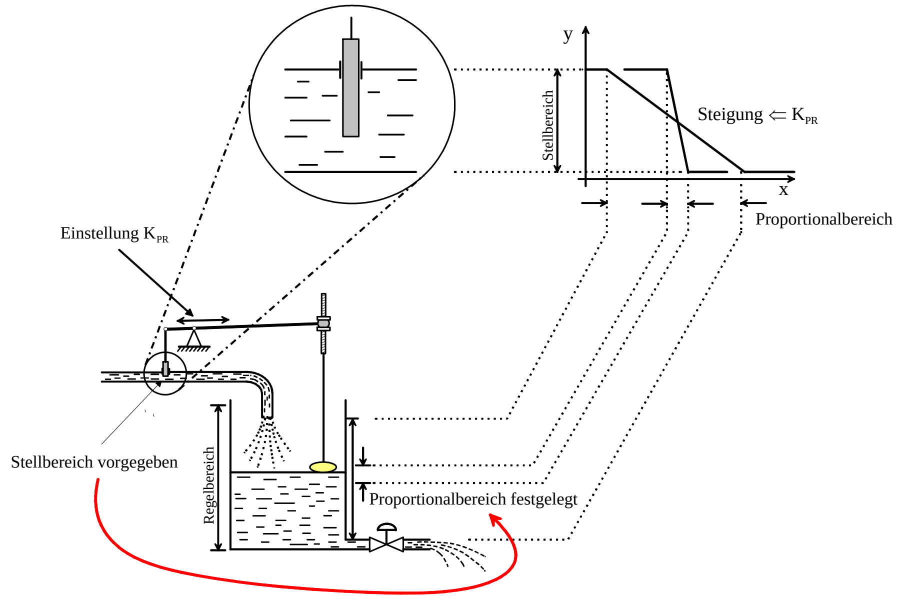


Abbildung 3-22: Festlegung des Proportionalbereiches bei der Füllstandsregelung[1]

Arbeitsweise eines P-Reglers

Ein kleiner Verstärkungsfaktor K_{PR} ergibt einen großen Proportionalbereich, so dass in unserem Fall die gesamte Füllhöhe des Behälters zur Regelung nutzbar ist.

Ein großer Proportionalbeiwert K_{PR} verursacht große Ventilhübe, so dass jeder Wasserabfluss sofort ausgeglichen wird.

[1]Tröster, F.: Steuerungs- und Regelungstechnik für Ingenieure; München, Wien: Oldenbourg, 2005

Bei der Einrichtung von Regelungen müssen immer Kompromisse gesucht werden.

Eigenschaften

Der P-Regler kann Störungen der Regelstrecke nicht ausregeln. Er ist deshalb ungenau und hinterlässt eine bleibende Regeldifferenz.

Der P-Regler reagiert aber unmittelbar und schnell auf jede Veränderung der Regelgröße.

Ergebnis: Der P-Regler arbeitet ungenau!

Beispiel: Plötzliche Zunahme des Wasserabflusses (Störung)

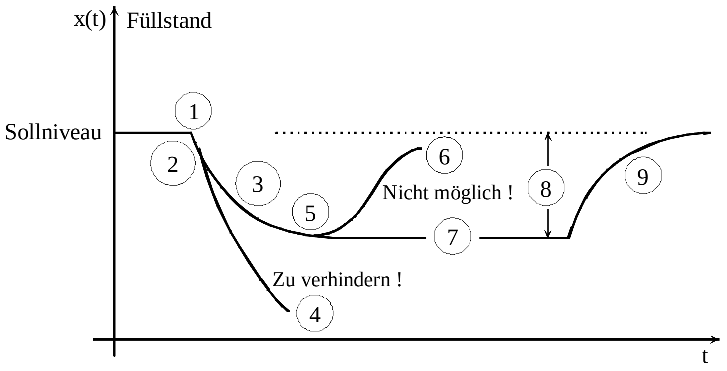


Abbildung 3-23: Störverhalten des P-Reglers[1]

1 Die Wasserhöhe sinkt.

2 Es tritt eine Differenz zwischen Führungs- und Regelgröße auf, die über den Schwimmer festgestellt wird.

3 Der P-Regler (Hebel) öffnet das Ventil, so dass frisches Wasser nachfließen kann.

4 Wird mehr Flüssigkeit entnommen, als nachfließen kann, entleert sich der Behälter. Dieses muss verhindert werden.

5 Je weiter das Niveau sinkt um so mehr Frischwasser fließt nach, um wieder den alten Stand zu bekommen.

[1]Tröster, F.: Steuerungs- und Regelungstechnik für Ingenieure; München, Wien: Oldenbourg, 2005

Fachhochschule Jena
University of Applied Sciences Jena
Fachbereich Elektrotechnik / Informationstechnik
Regelungstechnik (Grundlagen) für WI
Zusammenstellung
Prof. Dr. Jörg Müller

6 Das vorherige Sollniveau wird aber nicht wieder erreicht, da sonst das Ventil wieder soweit geschlossen wäre und deshalb zu wenig Frischwasser nachfließen könnte, um die immer noch vorhandene starke Entnahme auszugleichen.

7 Das Wasserniveau pendelt sich deshalb auf einem neuen Gleichgewichtszustand ein, bei dem die Regelgröße nicht der Sollgröße entspricht.

8 Es tritt eine konstante Differenz zwischen Soll- und Istgröße ein, die als bleibende Regeldifferenz bezeichnet wird. Der P-Regler benötigt sie zum Ausgleich der Störung.

9 Nur die Aufhebung der Wasserentnahme lässt den Füllstand erneut auf das alte Niveau anwachsen.

3.2.5.2 I-Regler

Je länger die Regelabweichung vorliegt, desto größer die Gegenreaktion

$$y(t) = K_{IR} \int e(t)dt$$

Integrierbeiwert K_{IR}

$$K_{IR} = \frac{\text{Maximale Stellgeschwindigkeit } \dot{y}_{max}}{\text{Proportionalbereich } X_P}$$

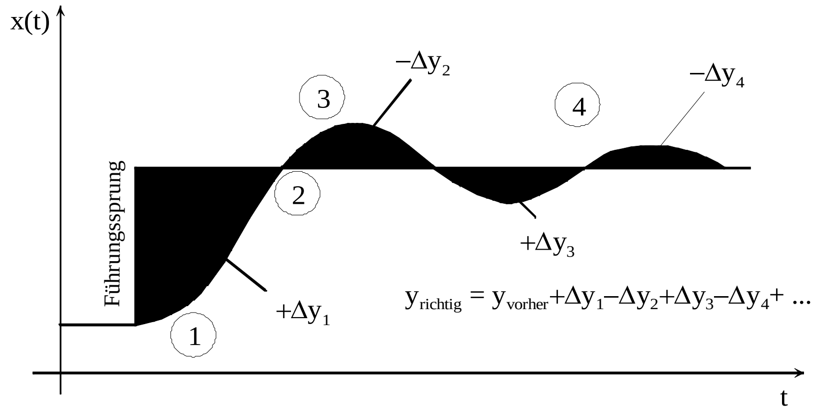


Abbildung 3-24: Führungsverhalten des I-Reglers

1 Die durch den Führungssprung auftretende Regeldifferenz summiert der I-Regler über die Zeit zu einer positiven Stellgrößenänderung + ΔY_1 auf. Dieses Integral fällt vorerst willkürlich aus, da dem I-Regler die Streckeneigenschaften unbekannt sind.

2 Das Stellsignal schießt über den exakten Stellwert zur Einstellung der Regelgröße hinaus, weshalb diese ebenfalls ihr Ziel verfehlt.

3 Der Regler hat die Stellgröße um -ΔY_2 zu korrigieren.

4 Da der Regelalgorithmus zwingend eine verschwindende Regeldifferenz verlangt, schwingt die Regelgröße eine längere Zeit bis zur endgültigen Übereinstimmung um den Sollwert.

Eigenschaften

Der I-Regler stellt die Regelgröße exakt auf die Führungsgröße ein.

Im Gegensatz zu einem P-Regler benötigt der I-Regler um die Integrierzeit T_{IR} länger für den Regelvorgang.

Zur exakten Erreichung der Führungsgröße neigt ein I-Regler zu Schwingungen.

Integrierzeit $T_{IR} = \frac{Y_h}{K_{IR} \cdot X_h}$

Kurz notiert:

Der I-Regler regelt präzise, aber langsam und neigt zum Schwingen!

3.2.5.3 D-Regler

Je größer die Änderung der Regelabweichung, desto größer die Gegenreaktion

$$y(t) = K_{DR} \frac{de(t)}{dt}$$

Eigenschaften

Der D-Regler regelt zeitlich konstante Regeldifferenzen nicht aus, gleich, wie groß diese auch ausfallen. (Die 1. Ableitung ist dann Null)

Für ihn gilt deshalb:

Der D-Regler ist für sich alleine nicht zu gebrauchen!

	Vorteil	**Nachteil**
P-Regler	Reagiert unmittelbar auf eine Regeldifferenz	Regelt ungenau
I-Regler (bei Strecken mit Ausgleich)	Regelt genau	Regelt sehr langsam und neigt zu Schwingungen
D-Regler	Antwortet nur auf zeitliche Änderungen der Regeldifferenz	Nicht zu gebrauchen, da konstante Regeldifferenzen nicht ausgeregelt werden

3.2.5.4 PI-Regler

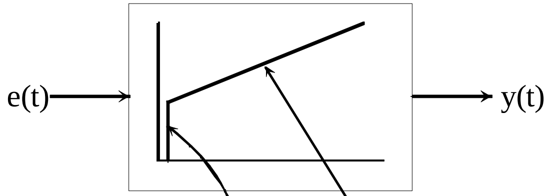
Definition: PI-Regler

Im PI-Regler überlagern sich die Wirkungen von P- und I-Reglern durch Parallelschaltung. Seine Systemgleichung lautet:

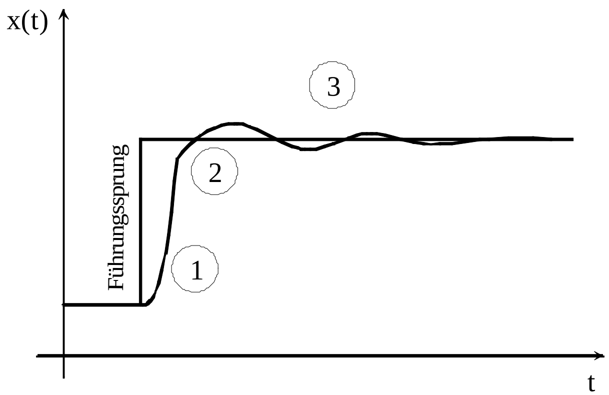
$$y(t) = K_{PR} e(t) + K_{IR} \int e(t)dt = K_{PR} \left(e(t) + \frac{1}{T_N} \int e(t)dt \right)$$

mit den Kenngrößen Proportionalbeiwert K_{PR} und der Nachlaufzeit

$$T_N = \frac{K_{PR}}{K_{IR}}$$



P-Wirkung:	I-Wirkung:
Kurzfristig	Langfristig
Schnell	Langsam
Ungenau	Genau



1 Zu Beginn des Führungssprungs wirkt der P-Regler und versucht die Regelgröße in die Nähe des neuen Sollwerts zu drängen.

2 Dort beginnt dann der I-Regler seinen Einfluss auszuüben. Er integriert fortlaufend die bis dato anfallende Regelfläche aufund fiigt sie dem Stellsignal hinzu.

3 Durch die Nähe zum neuen Sollwert benötigt der Regler weniger Zeit, sich exakt auf die Führungsgröße einzuschwipgen.

Die Vorzüge von PI-Regler liegen somit auf der Hand:

1. Der P-Reglerteil versucht eine auftretende Regeldifferenz schnell abzufangen, ohne dass er sie vollständig eliminiert.

2. Anschließend beseitigt die I-Reglerkomponente die restliche Regeldifferenz.

Kurz notiert: Der PI-Regler arbeitet schnell und präzise!

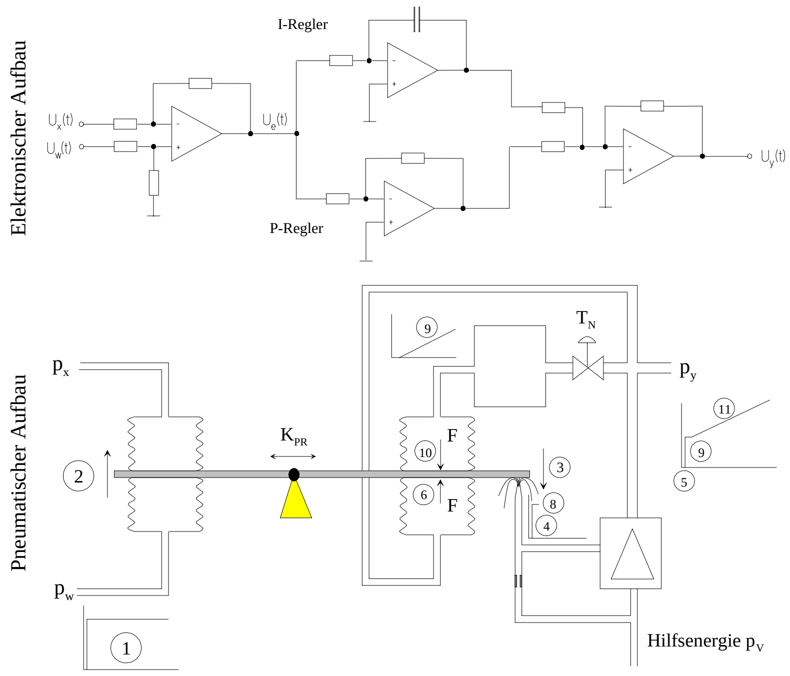


Abbildung 3-25: Analogtechnische Realisierungsmöglichkeiten eines PI-Reglers

3.2.5.5 PD-Regler

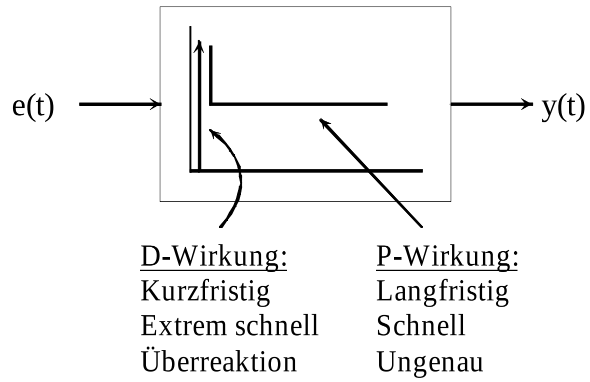
Definition: PD-Regler

Der ideale PD-Regler addiert die Wirkungen von P- und D-Reglern. Seine Systemgleichung lautet:

$$y(t) = K_{PR} e(t) + K_{DR} \frac{de(t)}{dt} = K_{PR}\left(e(t) + T_V \cdot \frac{de(t)}{dt} \right)$$

mit den Kenngrößen Proportionalbeiwert K_{PR} und der Vorlaufzeit

$$T_V = \frac{K_{DR}}{K_{PR}}$$



Eigenschaften

Der D-Anteil wendet durch Vorhalt die "größte Gefahr" von der Regelstrecke ab.

Der P-Regleranteil bestimmt sein langfristiges Verhalten, weshalb er ungenau arbeitet.

Kurz notiert:

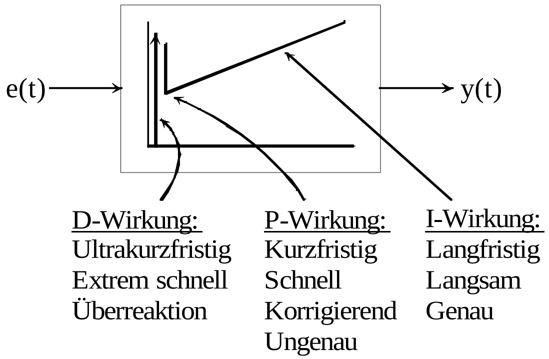
Der PD-Regler reagiert sehr schnell, aber ungenau!

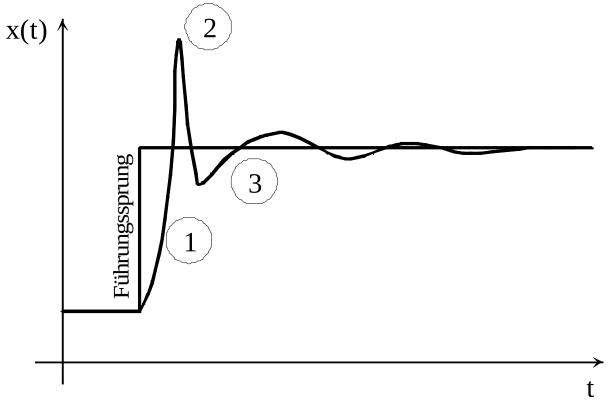
3.2.5.6 PID-Regler

Definition: PID-Regler

Der PID-Regler kombiniert alle drei Basisregler zu einem universellen Regler durch Parallelschaltung von P- I- und D-Reglern. Seine Systemgleichung lautet:

$$y(t) = K_{PR}e(t) + K_{IR}\int e(t)dt + K_{DR}\frac{de(t)}{dt} = K_{PR}\left(e(t) + \frac{1}{T_N}\int e(t)dt + T_V \cdot \frac{de(t)}{dt}\right)$$



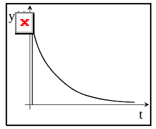
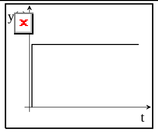
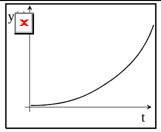


1 Der D-Regler steuert die Regelgröße so schnell es geht in Richtung veränderter Führungsgröße, wobei er über das Ziel hinaus schießt.

2 Der P-Regler korrigiert die Regelgröße in Richtung Sollgröße. Er hinterlässt eine Regeldifferenz, da er bekanntlich ungenau arbeitet.

3 Nun beginnt der I-Regler zu wirken. Da keine große Abweichung mehr vorliegt, hat er leichtes Spiel, die Regeldifferenz schnell zu beseitigen.

Der differenzierende Wirkanteil des PID-Reglers bietet den Vorteil, die Regelgröße sehr schnell der Führungsgröße nachzuführen. Man verwendet ihn deshalb, um Gefahrensituationen für Mensch und Maschine abzuwehren. (Voraussetzung: große Stellreserve, Energie)

<table>
<tr><td></td><td>D-Verhalten
Schnell Vorhalten</td><td>P-Regler
Ungefähres Anpassen</td><td>I-Regler
Präzises Ausregeln</td></tr>
<tr><td>Dynamik:</td><td>
Vorhalten
Nachgeben</td><td>
"Stur" bleiben</td><td>
Verzögern
Ausgleichen</td></tr>
<tr><td>PD-Regler:</td><td colspan="2">Schnell Vorhalten,
annäherndes Anpassen an die Sollgröße</td><td></td></tr>
<tr><td>PI-Regler:</td><td></td><td colspan="2">Ungefähres Anpassen,
genaues Einregeln auf die Sollgröße</td></tr>
<tr><td>PID-Regler:</td><td colspan="3">Schnell Vorhalten,
ungefähres Anpassen an den Sollwert,
exaktes Einstellen der Sollgröße</td></tr>
</table>