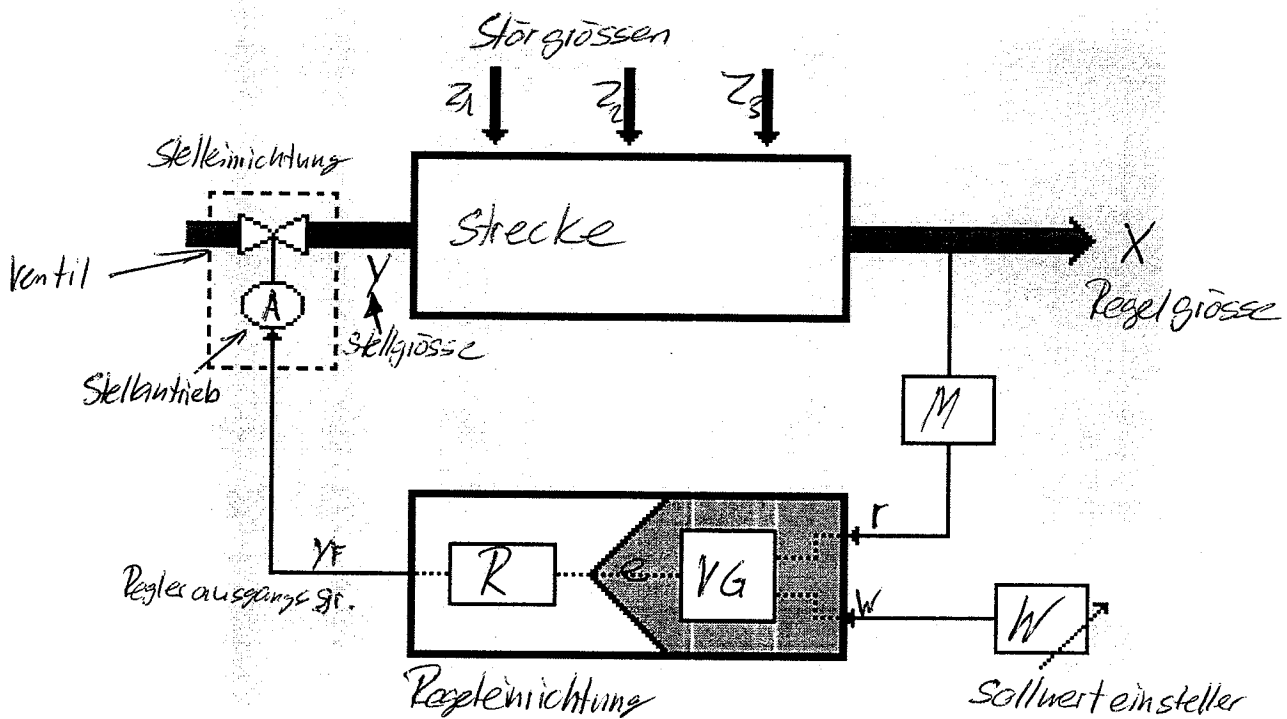


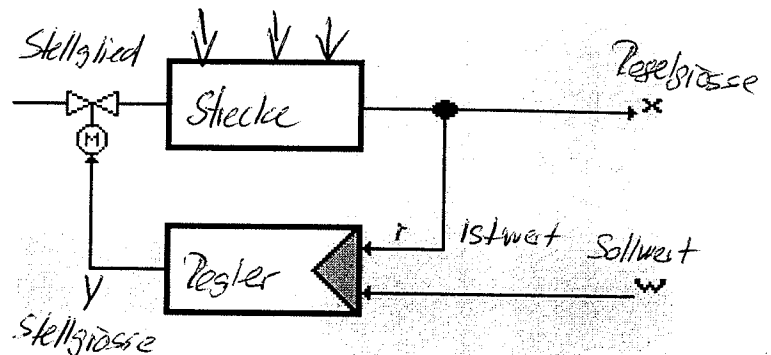
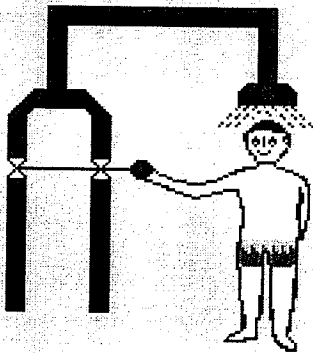
Regelkreis



- Eine Regleinrichtung besteht aus einer Messeinrichtung M zur Erfassung der Regelgröße X und einem Sollwert-einsteller W.
- Die Regelgröße X wird dem Regler als Rückführgröße r eingespeist.
- Im Vergleicher VG werden Sollwert w und Istwert r verglichen.
- Die Regeldifferenz $e = w - r$ wirkt dann auf den eigentl. (Regler R). Dieser gibt in Abhängigkeit vom Regel-typ und der Reglerdifferenz e die Reglerausgangsgröße yF an die Stelleinrichtung weiter. Dieser besteht aus einem Antrieb und einem Ventil (im Bsp.)
- Die Stelleinrichtung beeinflusst die eigentliche Stellgröße Y. Dies bedeutet meist eine Änderung der Energiezufuhr für die Strecke.
- Auf eine Strecke können verschiedene Störgrößen z_1, z_2, z_3 ein-wirken.

Dusche

Regelkreis (Blockschaltbild)



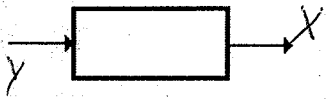
Beispiel: Die typischen Elemente eines Regelkreises anhand der Duschregelung aufzeigen

Strecke: Warm- und Kaltwasserzuleitung, Duschkopf, Luftstrecke

Stellglied: Wasserhahn

Regler (inkl. Messumformer, Sollwert-einsteller, Vergleich):
„Mensch“

Störgrößen: Wasserdruk,



Blockstruktur Steuerung

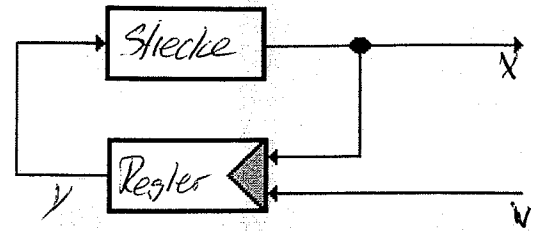
- ist durch einen offenen Wirkungsablauf gekennzeichnet

DIN 19226 Steuern

Das Steuern ist der Vorgang in einem System bei dem eine oder mehrere Eingangsgößen ~~und~~ die Ausgangsgößen aufgrund der Systemeigenschaften beeinflussen

Vorteil:

- günstig
- einfach



Blockstruktur Regelung

- zeigt eindeutig die Rückwirkung der Regelgröße x über den Regler wieder auf die Regelstrecke

DIN 19226 Regeln

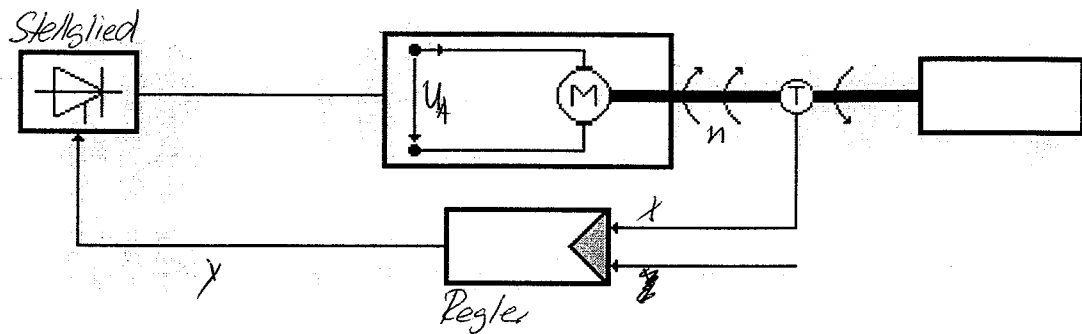
Das Regeln ist ein Vorgang, bei dem eine Größe (zu regelnde = Regelgröße) fortlaufend erfasst mit der Führungsgröße verglichen und abhängig vom Ergebnis (dieses Vergleichs) im Sinne einer Angleichung an die Führungsgröße beeinflusst wird

Vorteil:

- komfortabler
-

Nachteil:

- höherer technischer Aufwand
- Stabilitätsprobleme



Drehzahlregelung Gleichstrommotor

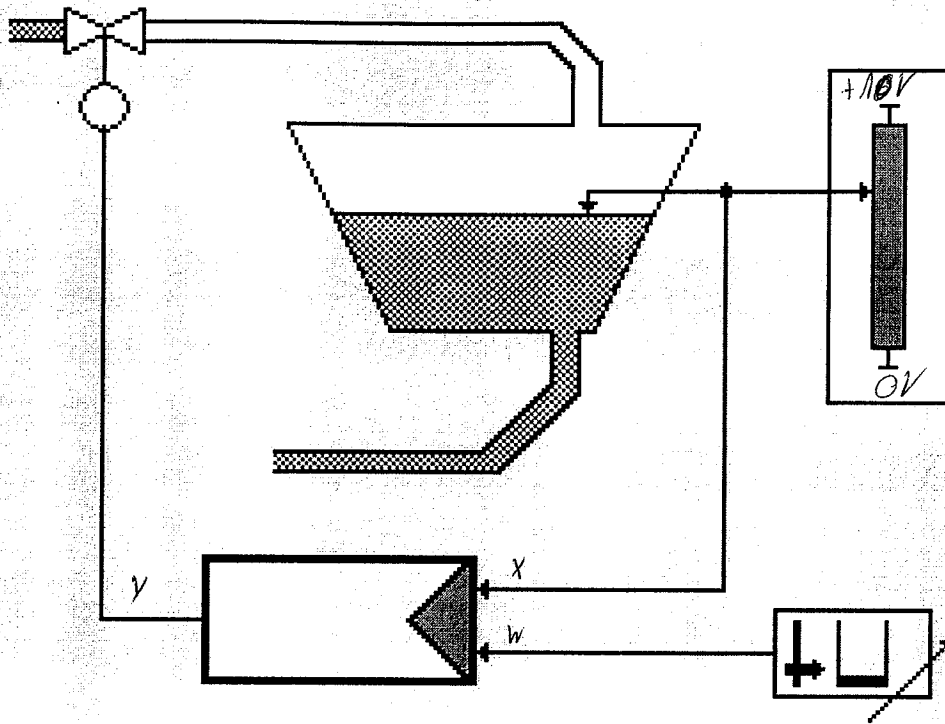
Die Abbildung zeigt das Blockschaltbild einer üblichen Drehzahlregelung für Gleichstrommotoren.

Regelgröße - Drehzahl n wird mit einem Gleichspannungstachogenerator T erfasst. Dieser liefert eine zur Drehzahl proportionale Spannung als Istwert ist an den Regler.

Der Regler greift über seine Stellgröße y auf ein Leistungstellglied ein.

Die Drehzahl kann durch Ändern der Ankerspannung U_A beeinflusst werden.

Die Störgröße ist die schwankende Belastung durch die Maschine.



Füllstandsregelung

Bei dieser Regelung ist der Füllstand im Behälter die Regelgröße.

Die Stellgröße y greift über das Stellventil auf die Strecke ein.

Als Störgröße wirkt der Abfluss.

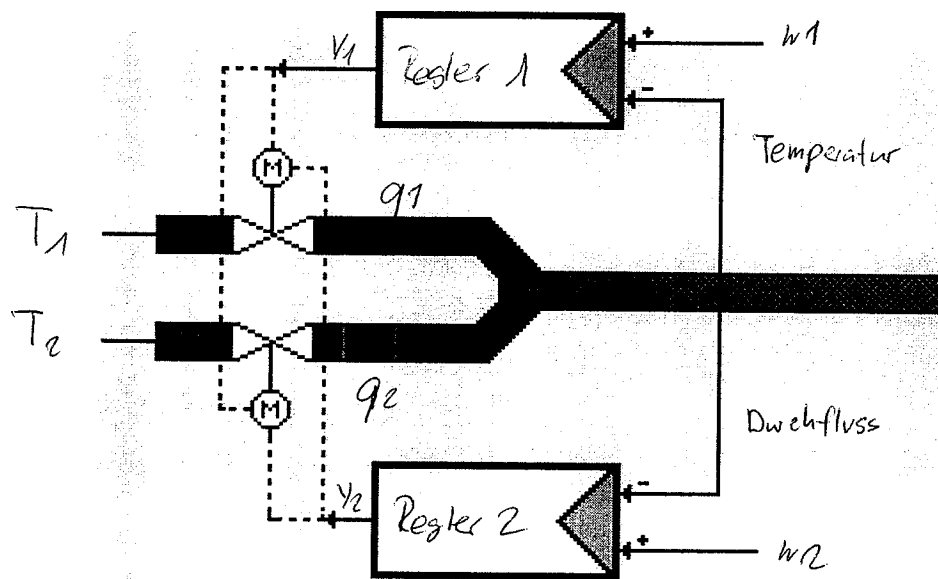
Komplexe Regler

Häufig treten in komplexen Anlagen mehrere Größen auf, die voneinander abhängig sind und beeinflusst werden sollen.

Diese Regelungen bezeichnet man als Mehrfachregelungen.

Dazu einige Beispiele:

- Generator: Die Regelgrößen sind Ausgangsspannung und Frequenz
- Klimaanlage: Die Regelgrößen sind Temperatur und Luftfeuchtigkeit



Mehrfachregelung

- In der abgebildeten Mehrfachregelung sollen zwei Komponenten gemischt werden um eine vorgegebene Temperatur und einen bestimmten Durchfluss der vermischten Flüssigkeit zu erreichen.
- Die Flüssigkeit haben die Temperatur T_1 und T_2 .
- Um die gewünschte Temperatur bei vorgegebenem Durchfluss zu erreichen, müssen über die Stellventile die Zuflussmengen q_1 und q_2 geregelt werden.

Festwertregelung

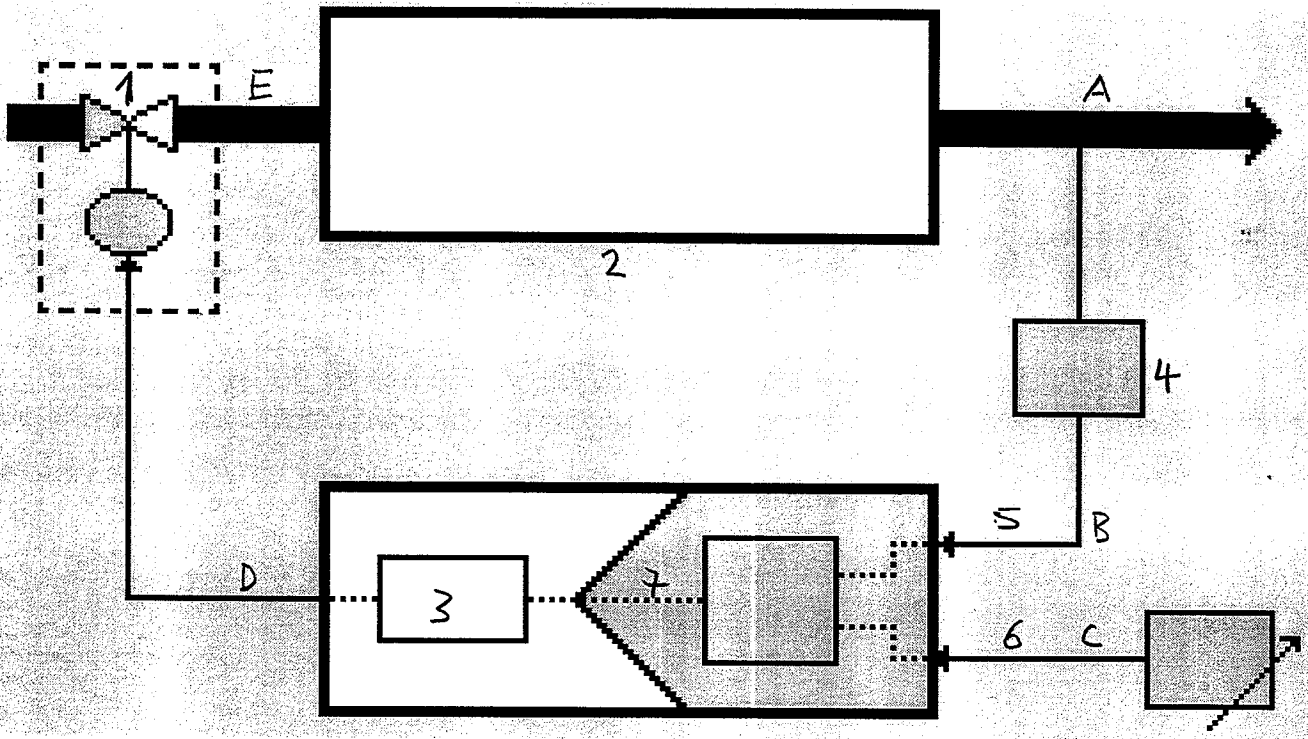
Folgerregelung

Je nach Art der Führungsgrösse unterscheidet man zwei Typen von Regelungen:

In den meisten Fällen ist die Führungsgrösse als fester Wert vorgegeben
⇒ Festwertregelung

Soll die Führungsgrösse häufig verändert werden, oder einem zeitlichen Verlauf folgen, dann spricht man von einer Folgerregelung
⇒ Folgerregelung

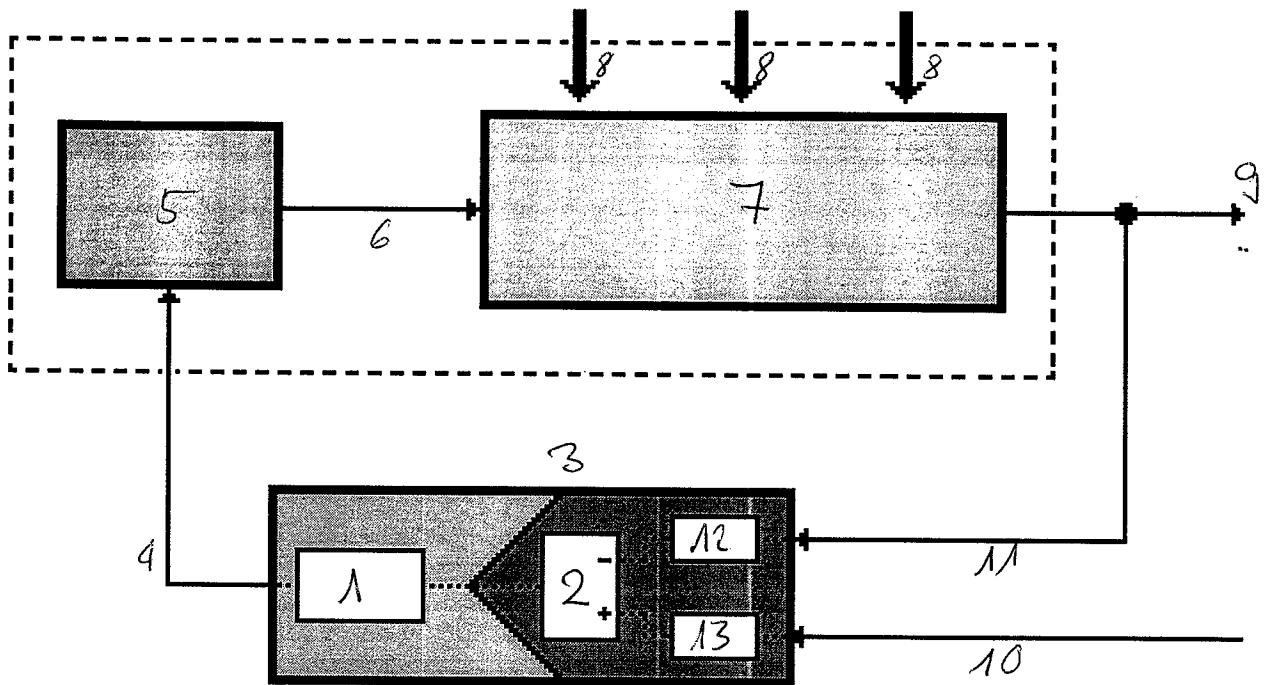
Zu Fragen: Die Abbildung zeigt die Blockstruktur eines Regelkreises.



- Bestimmen Sie die Position des Regelgliedes! *B.*
- An welcher Stelle in der Blockstruktur eines Regelkreises kann die Regel-differenz gemessen werden? *A.*
- Wie wird der Block bezeichnet, der sich zwischen dem Ausgang des Regelgliedes und dem Eingang der Strecke befindet? *Stellglied*
- Welche Fakten über einen geschlossenen Regelkreis sind richtig?
 - A) Offener Wirkungsablauf und Gegenkopplung
 - B) Geschlossener Wirkungsablauf und Mitkopplung
 - C) Geschlossener Wirkungsablauf und Gegenkopplung
 - D) Offener Wirkungsablauf und Mitkopplung
- Trifft die folgende Aussage auf eine Steuerung oder eine Regelung zu?
 "Es besteht keine Rückwirkung der Ausgangsgröße auf die Eingangsgröße."
 Die Aussage ist zutreffend für eine *Rechtungs- Steuerung*
- Welche Aussage über die Strecke ist richtig?
 - A) Die Strecke besteht aus Stell- und Regelglied.
 - B) Die Strecke besteht aus dem Messumformer mit Vergleicher.
 - C) Die Strecke ist das System oder der Prozess, der beeinflusst werden soll.
 - D) Die Eingangsgröße der Strecke ist die Regelgröße.

- 7) An welcher Position tritt die Regelgröße x bzw. der Istwert auf?
- 8) An welcher Position tritt die "wahre" Stellgröße y auf?
- 9) An welcher Position tritt die Führungsgröße w bzw. der Sollwert auf?
- 10) An welcher Position tritt die Rückführgröße r auf?

Zusammenfassung: Beschriften und benennen Sie alle Größen bzw. Komponenten in der Blockstruktur eines Regelkreises



1 Regelglied

2 Regeldifferenzvergleicher

3 Regeleinrichtung

4 Regelausgangsgröße y_R

5 Stelleinrichtung

6 Stellgröße y

7 Strecke

8 Störtgrößen

9 Regelgröße x

10 Sollwert w

11 Istwert r

12 Messwertumformer

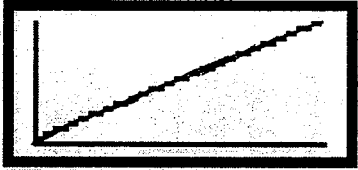
13 Sollwerteinsteller

Übertragungsglieder: Übertragungsverhalten

Sprung (z.B. Δu)



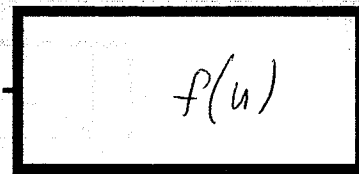
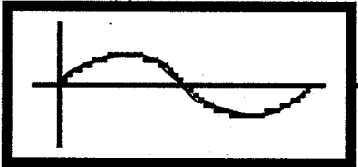
Anstiegsfunktion



Modelimpuls (Dirac-Stoß)

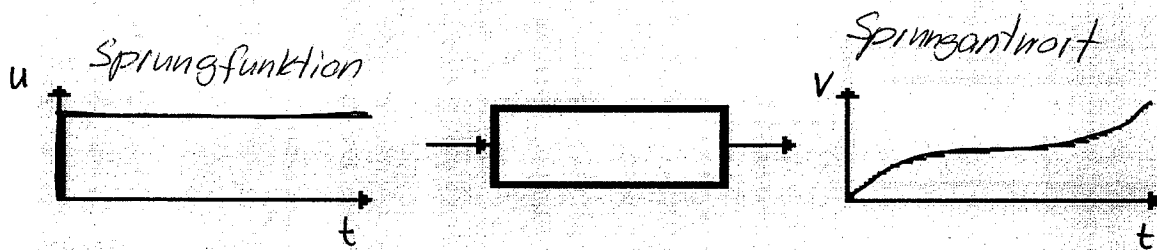


Sinussignal



Antwort

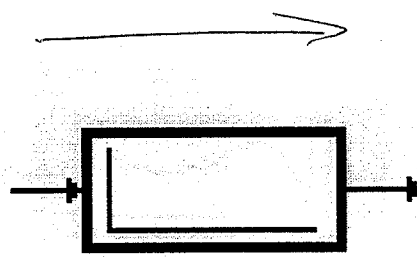
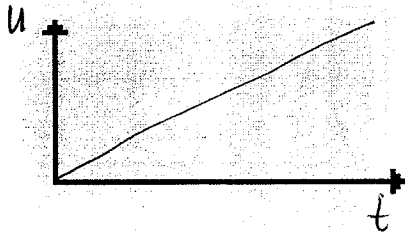
Übertragungsglieder: Übertragungsverhalten - Sprungantwort



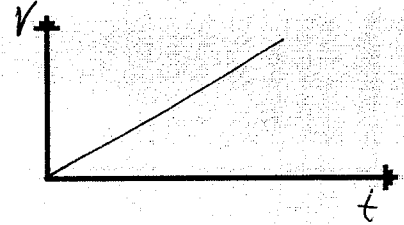
Die Übertragungsfunktion wird in der Blockdarstellung in das Übertragungsglied eingetragen.

Übertragungsglieder: Übertragungsverhalten - Anstiegsantwort

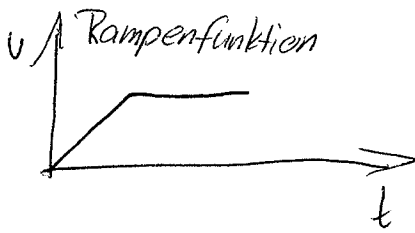
Anstiegsfunktion



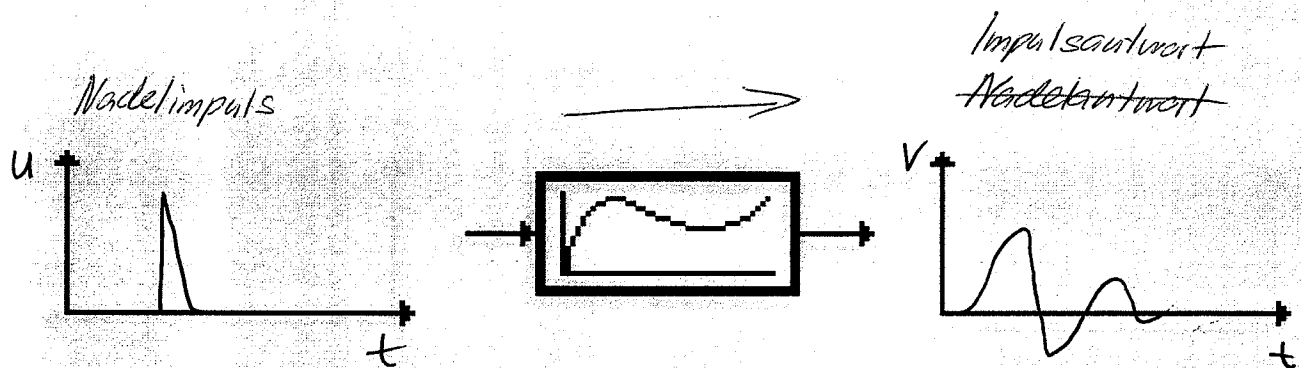
Anstiegantwort



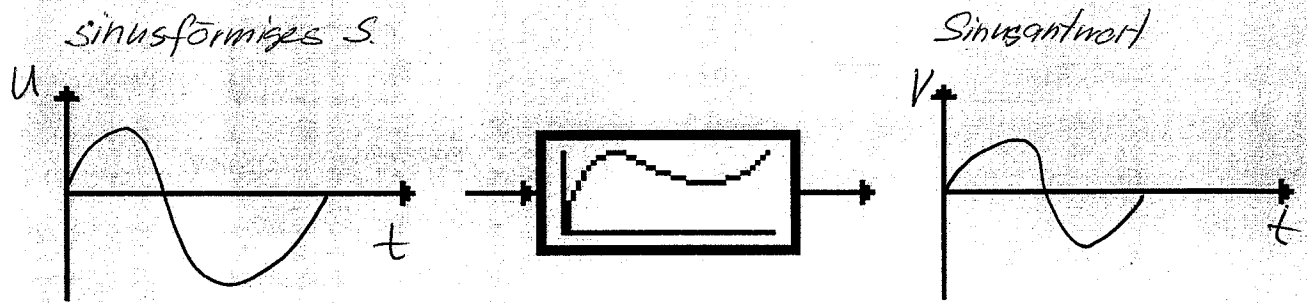
v Rampenfunktion



Übertragungsglieder: Übertragungsverhalten - Impulsantwort



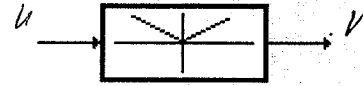
Übertragungsglieder: Übertragungsverhalten - Sinusantwort



Übertragungsglieder: zeitabhängig oder zeitunabhängig?



Zeitabhängige
Übertragungsglieder

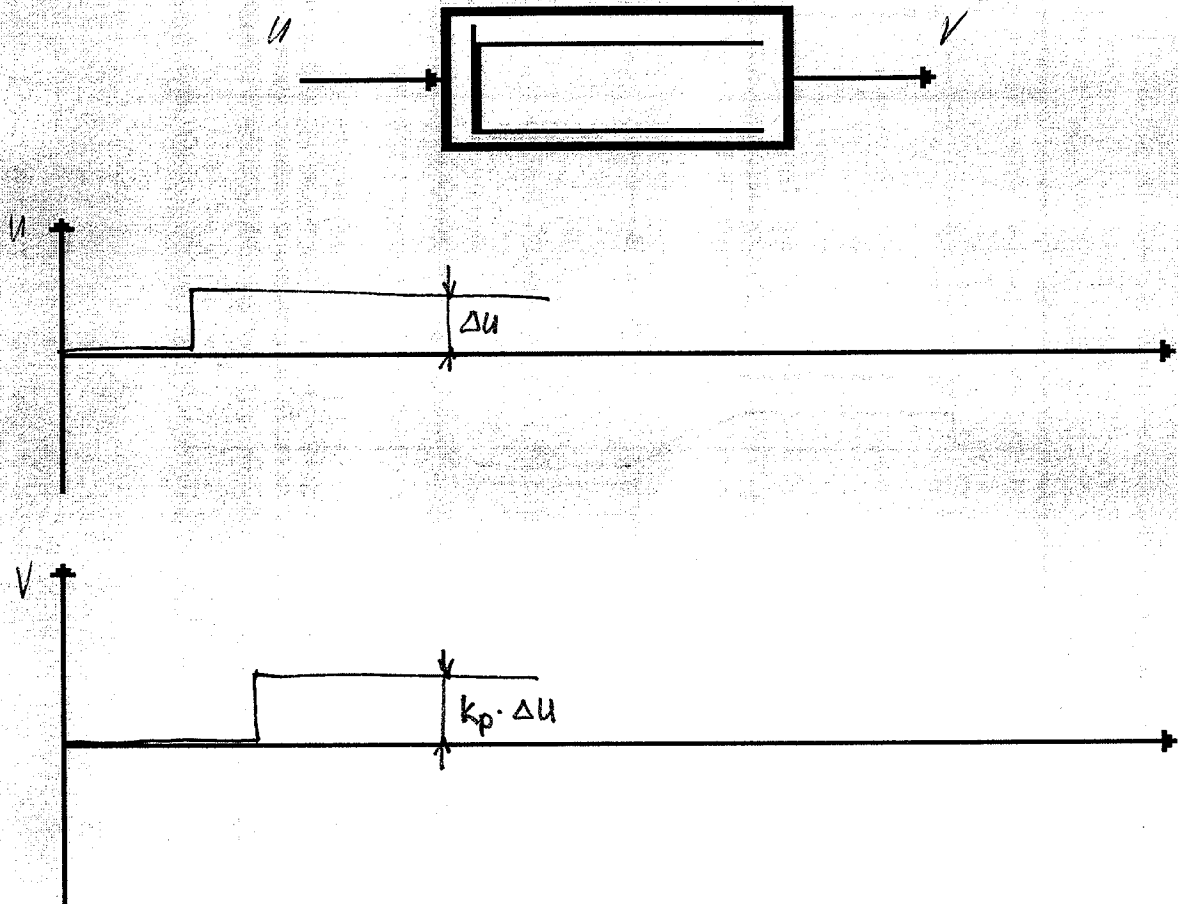


Beharrungszustand
Zeitunabhängige
Übertragungsglieder

x-Achse: Eingangssignal
y-Achse: Ausgangssignal

Der Beharrungszustand
zeigt das statische Verhalten
zwischen Eingangs- und Ausgangs-
~~signal~~größen.

Übertragungsglieder: zeitabhängig - Proportionalglied



Die Ausgangsgröße v ist zu jeder Zeit der Eingangsgröße u proportional.

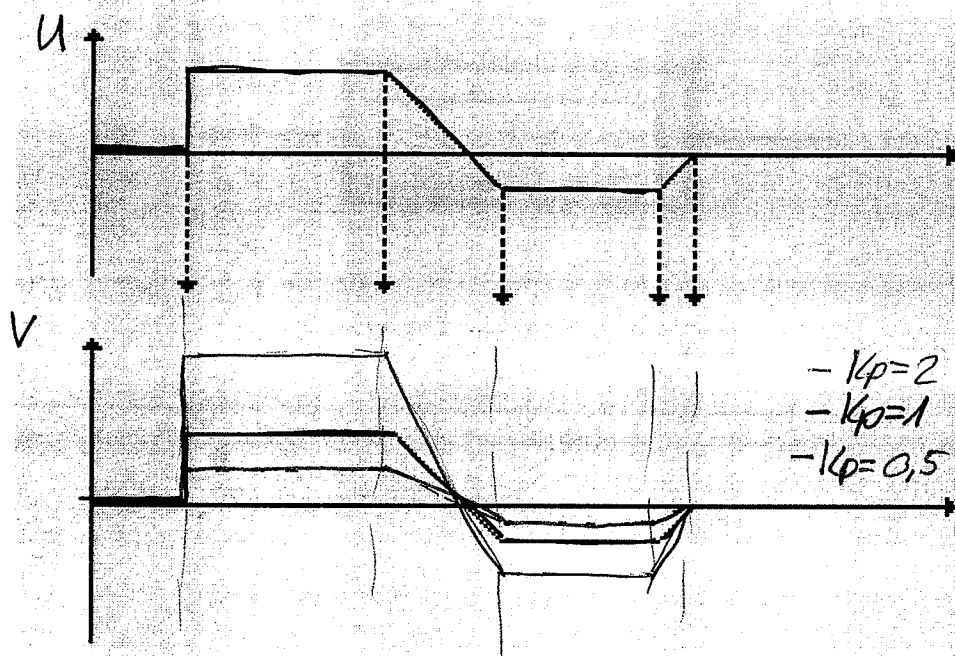
Es gilt:

$$v(t) = k_p \cdot u(t)$$

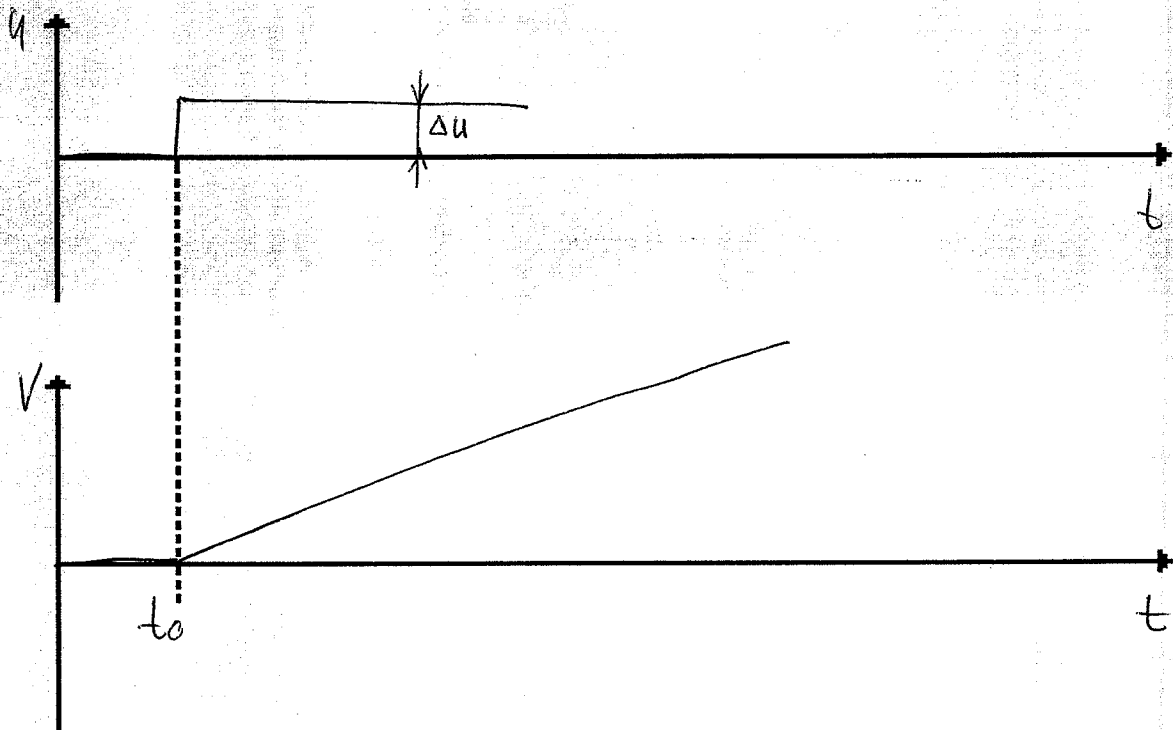
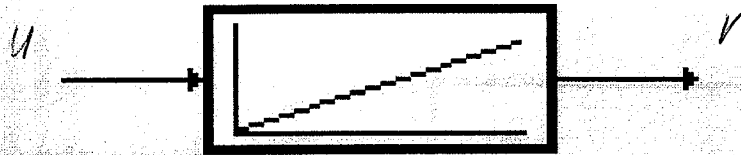
k_p : Proportionalkoeffizient
Proportionalbeiwert
Verstärkungsfaktor

P-Glied: Abkürzung für das Proportionalglied

Übertragungsglieder: zeitabhängig - Proportionalglied



Übertragungsglieder: zeitabhängig - Integrierglied



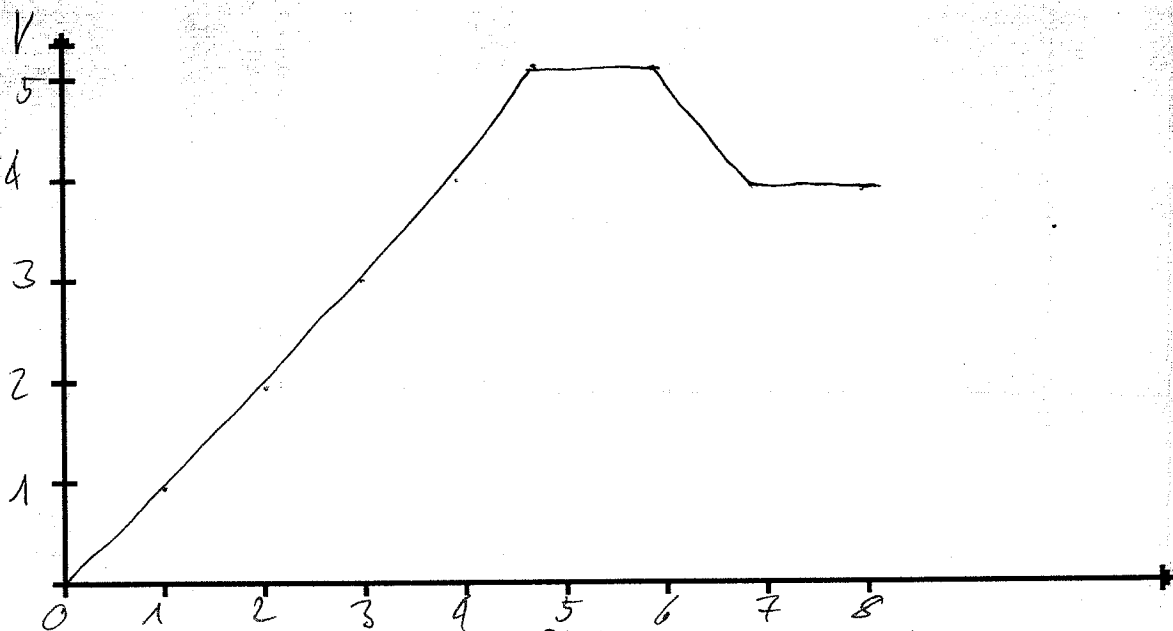
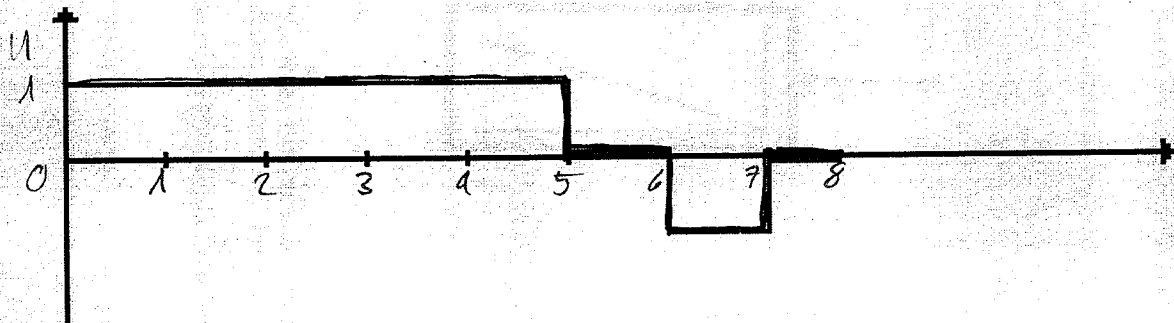
Das integrale Verhalten ist dadurch gekennzeichnet, dass bei einem konstanten Wert der Eingangsgröße u (Sprungfunktion) die Ausgangsgröße v kontinuierlich ansteigt.

$$v(t) = v(0) + k_i \int_0^t u(\tau) d\tau$$

Für obiges Beispiel gilt:

$$v(t) = 0 + k_i \cdot \Delta u \cdot (t - t_0)$$

Übertragungsglieder: zeitabhängig - Integrierglied



Grafisches Verfahren zur Bildung der Antwort eines

Integrators:

$$v(t) = K_i \cdot \Delta u \cdot t$$

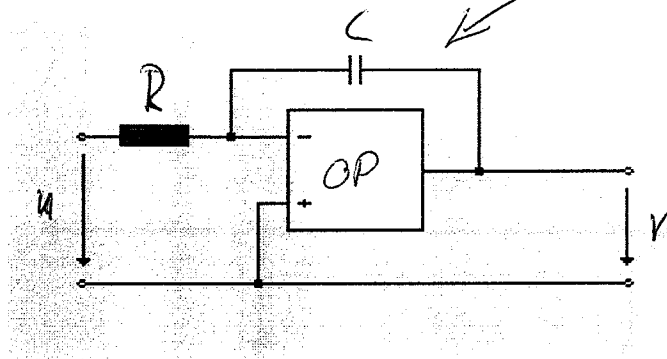
Annahme:

$$K_i = 1$$

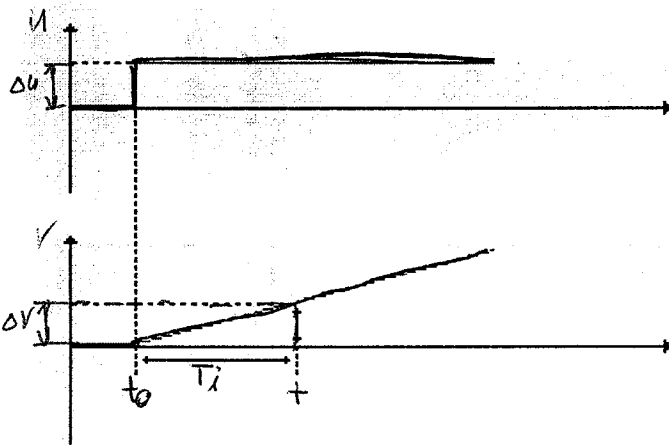
$$\Delta u = 1$$

$t = 0$	$v = 0$
$t = 1$	$v = 1$
$t = 2$	$v = 2$

Übertragungsglieder: zeitabhängig - Integrierglied



$$K_i = \frac{1}{RC}$$



$$T_i = \frac{1}{K_i}$$

$$K_i = \frac{1}{T_i}$$

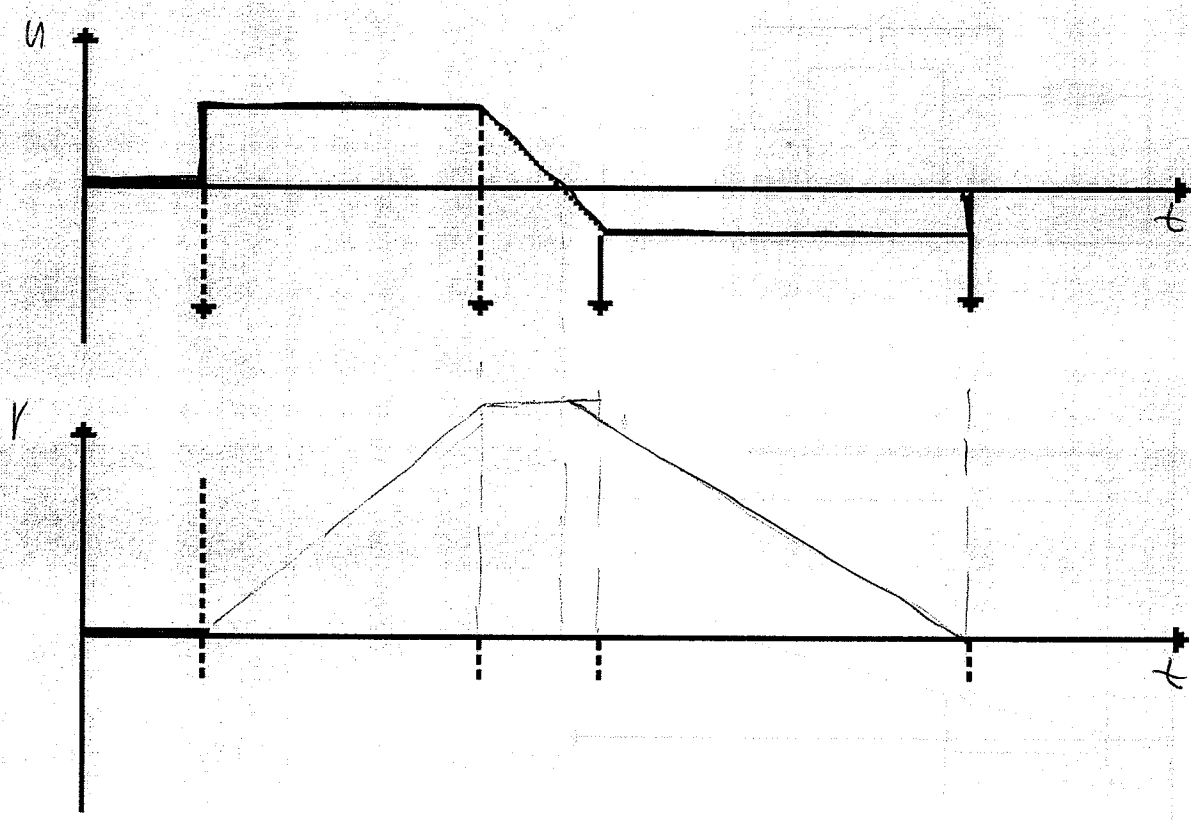
Grafische Bestimmung des Integrierwertes K_i :

⇒ man ermittelt den Zeitpunkt, zu dem die Ausgangsgröße den gleichen Wert wie die Eingangsgröße annimmt (Sprungantwort vorausgesetzt)

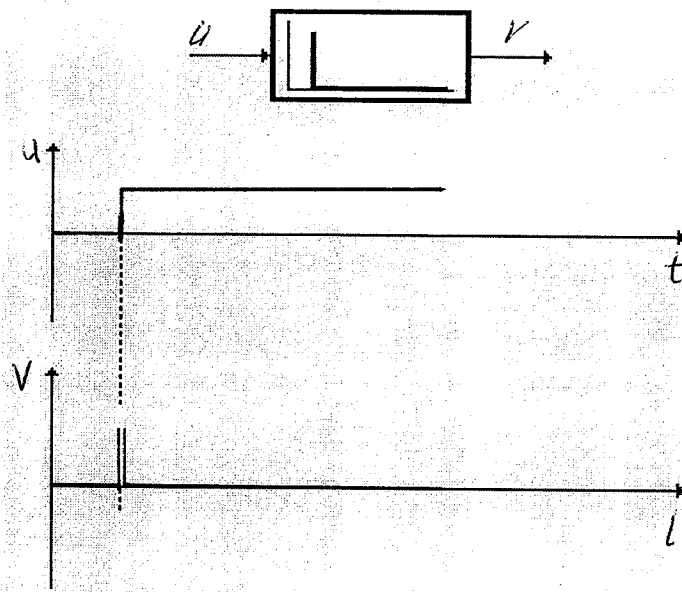
⇒ der Zeitpunkt zu dem u und v gleich sind legt die Integrierzeit T_i fest.

⇒ die Integrierzeit T_i ist der Kehrwert des Integrierwertes.

Übertragungsglieder: zeitabhängig - Integrierglied



Übertragungsglieder: zeitabhängig - Differenzierglied **D-Glied**



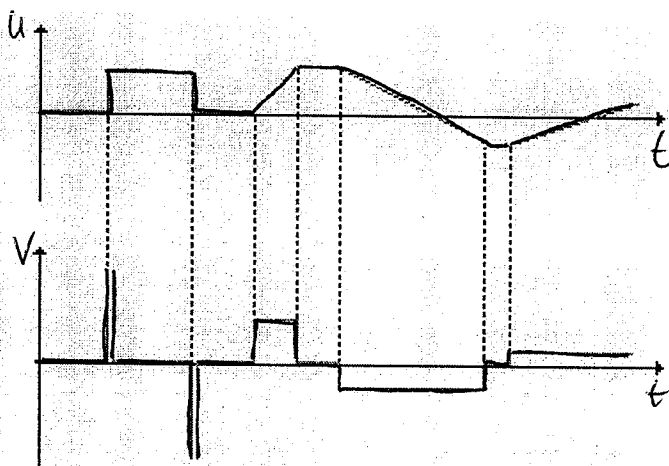
Das differenzielle Verhalten ist gekennzeichnet, dass es die Steigung des Eingangssignals zu jedem Zeitpunkt als einen Wert des Ausgangssignals darstellt.

Formel für D-Glied:

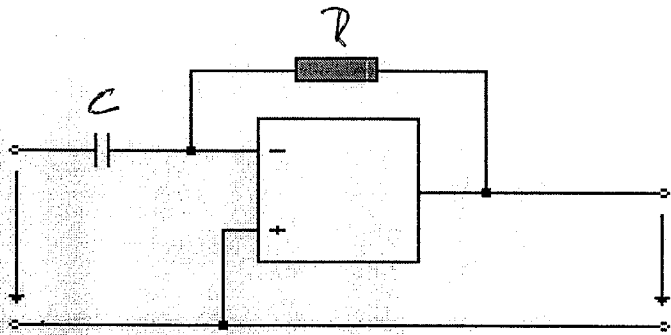
$$v(t) = K_d \cdot \left[\frac{du(t)}{dt} \right]$$

K_d : Differenzierbeiwert

$[\]$: beschreibt die Ableitung des Eingangssignals.



Übertragungsglieder: zeitabhängig - Differenzierglied

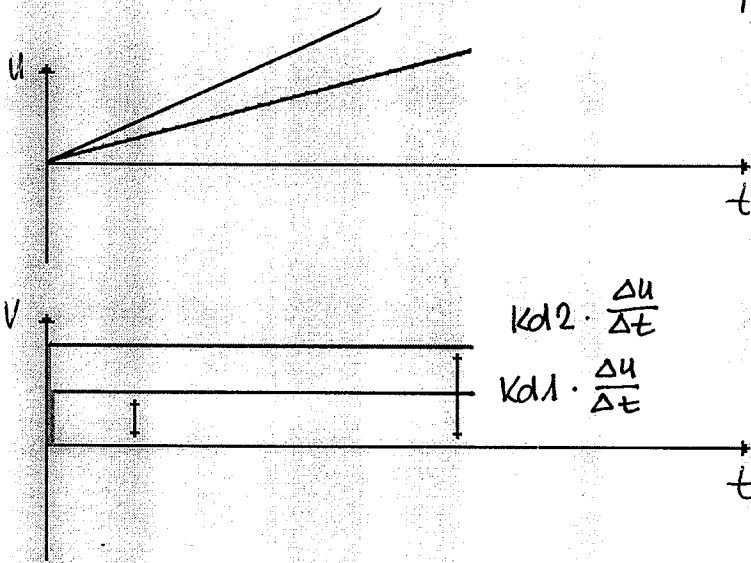


Differenzierschaltung:

In Abhängigkeit von C und R
ergeben sich unterschiedliche
Differenzierbeiwerte

$$K_d = R \cdot C$$

$$T_1 = K_d$$

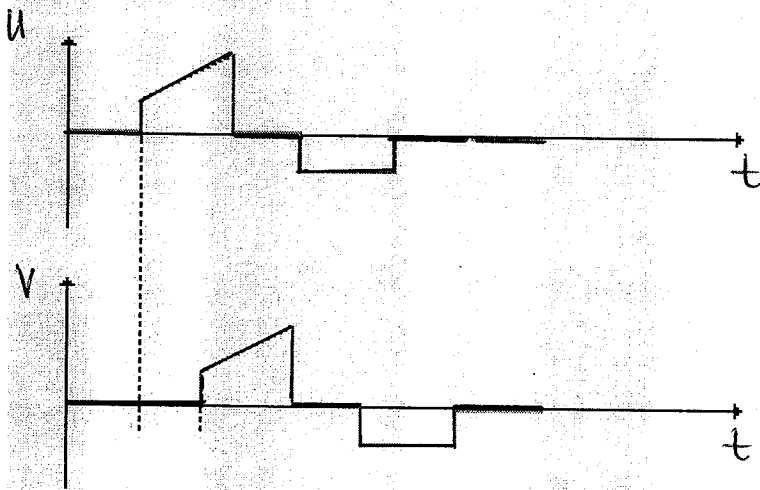
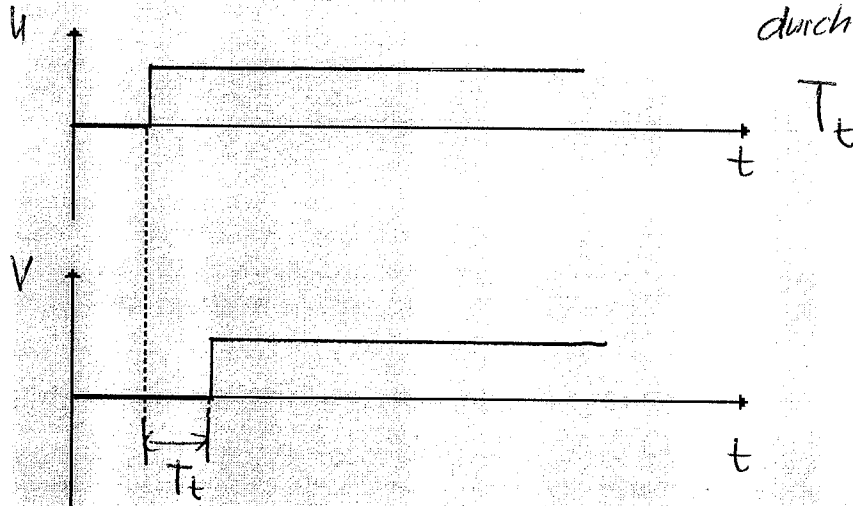


- je niedriger die Differenzierzeit, desto niedriger K_d und
umgekehrt.

Übertragungsglieder: zeitabhängig - Totzeitglied

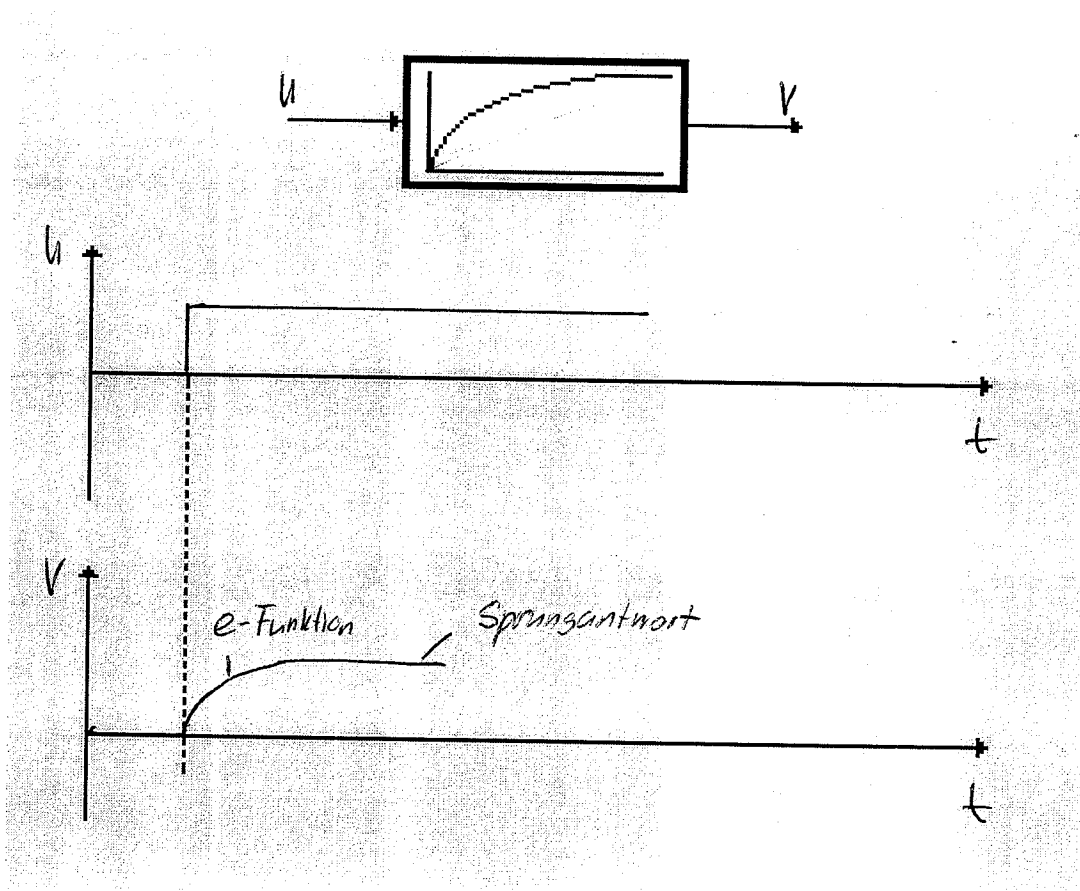


Das Totzeitverhalten eines \bar{u} -Gliedes ist gekennzeichnet durch eine Zeitverzögerung



Die Sprungantwort entspricht einem um die Totzeit verzögerten Proportionalverhalten mit einem (möglichen) Verstärkungsfaktor K_p .

Übertragungsglieder: zeitabhängig - P-T1-Glied



P-T1-Glied: U-Glied mit Verzögerungsverhalten

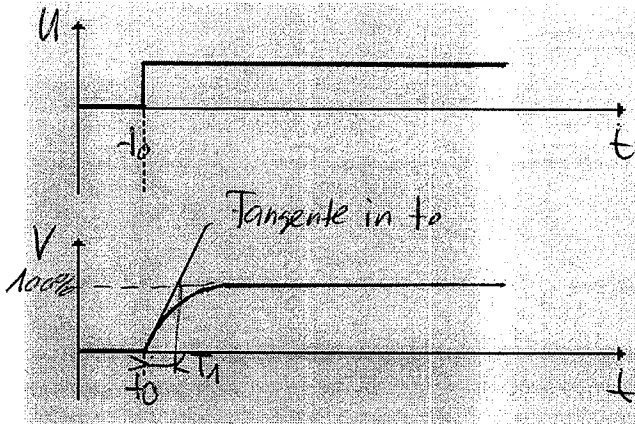
Das Verzögerungsverhalten wird durch zwei Parameter bestimmt:

- a) dem ~~Proportional~~ Proportionalbeiwert K_p
- b) der Verzögerungszeitkonstante T_1

Die Sprungantwort enthält eine e-Funktion:

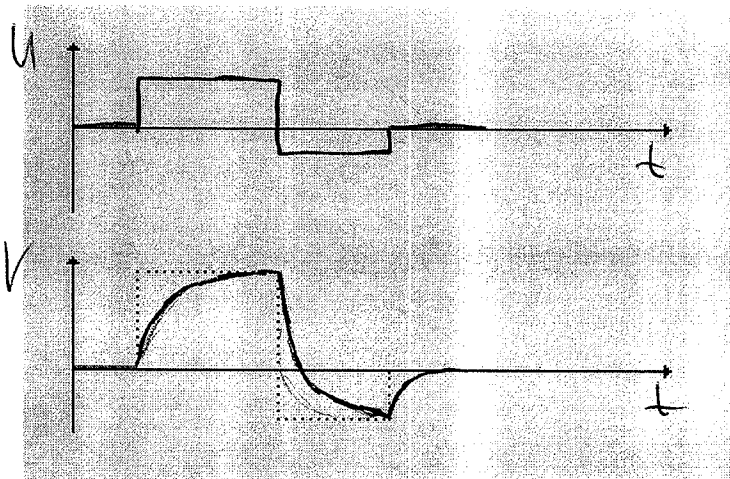
$$v(t) = K_p \left(1 - e^{-\frac{t}{T_1}} \right) \cdot \Delta u$$

Übertragungsglieder: zeitabhängig - P-T1-Glied

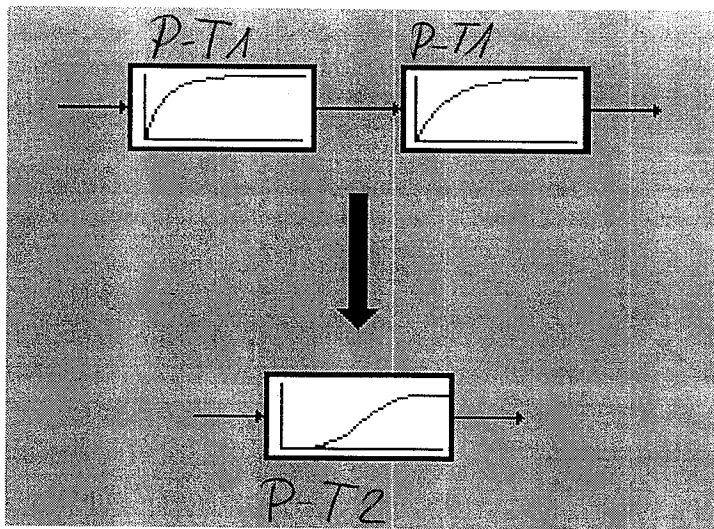


T_1 lässt sich grafisch aus der Sprungantwort ermitteln.

- ① Endwert V_E sei 100%
- ② Lot von Schnittpunkt der Tangente in t_0 mit 100%-Linie entspricht Verzögerungszeitkonstante T_1 .
- ③ Der Schnittpunkt des Lotes mit der Sprungantwort liegt bei 63%.



Übertragungsglieder: zeitabhängig - P-Tn-Glied



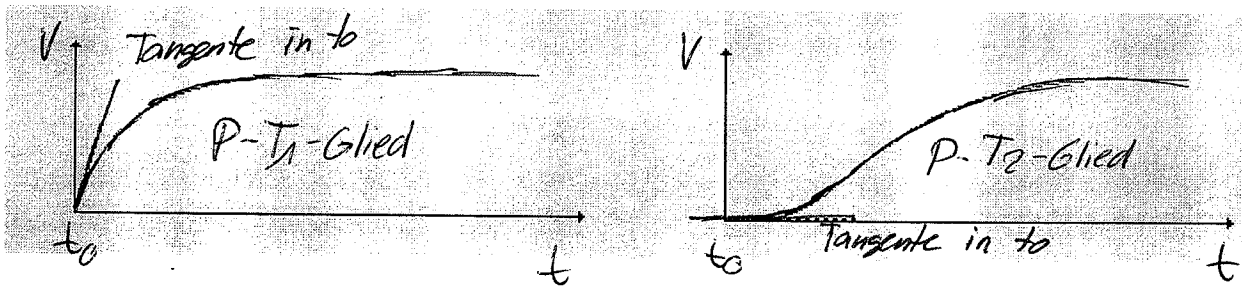
Werden zwei oder mehr Verzögerungsglieder hintereinander geschaltet, so entsteht ein neues Übertragungsglied.

Sind P-T₁-Glieder in Reihe verknüpft, so spricht man von einer P-T_n-Verzögerung.

2 P-T₁-Glieder \Rightarrow P-T₂-Glied

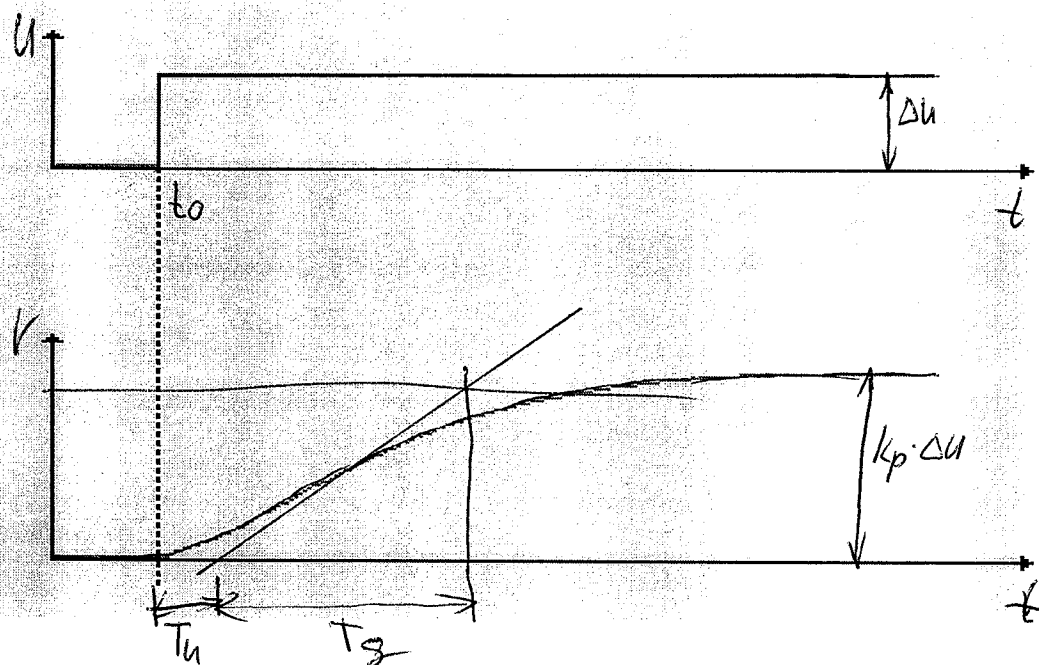
\Rightarrow Verzögerungsverhalten 2. Ordnung

Um zwischen Verzögerungsgliedern 1. und n-ter Ordnung zu unterscheiden können, werden die Sprungantworten beider Systeme betrachtet.



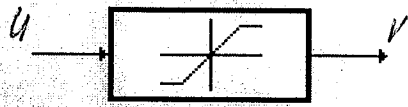
- Bei Verzögerung 1. Ordnung erhalten wir einen „Knick“ ~~oder der Sprungantwort~~ Sprungantwort bei t_0 .
- Typisch für ein P-T_n-Glied ist, dass die Sprungantwort bei t_0 keine Steigung aufweist.

Übertragungsglieder: zeitabhängig - P-Tn-Glieder

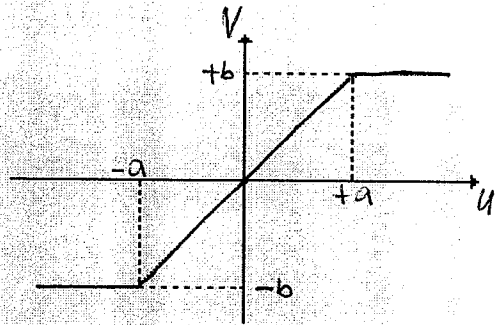


- Parameter des P-Tn-Gliedes sind Verzugszeit T_u und Ausgleichzeit T_g .
Beide können grafisch aus der Sprungantwort ermittelt werden.
- Verzugszeit T_u : ist die Zeit zwischen dem Aufschalten der Sprungfunktion und dem Schnittpunkt der Wendetangente mit der Zeitachse.
- Ausgleichzeit T_g : ist die Zeit zwischen dem Schnittpunkt der Wendetangente mit der Zeitachse und dem Lot des Schnittpunktes mit der Grenzwertlinie auf die Zeitachse.
- Ein Proportionalanteil (Verstärkung) ergibt sich aus dem Grenzwert des Beharrungszustandes bezogen auf die Amplitude der Eingangsfunktion.

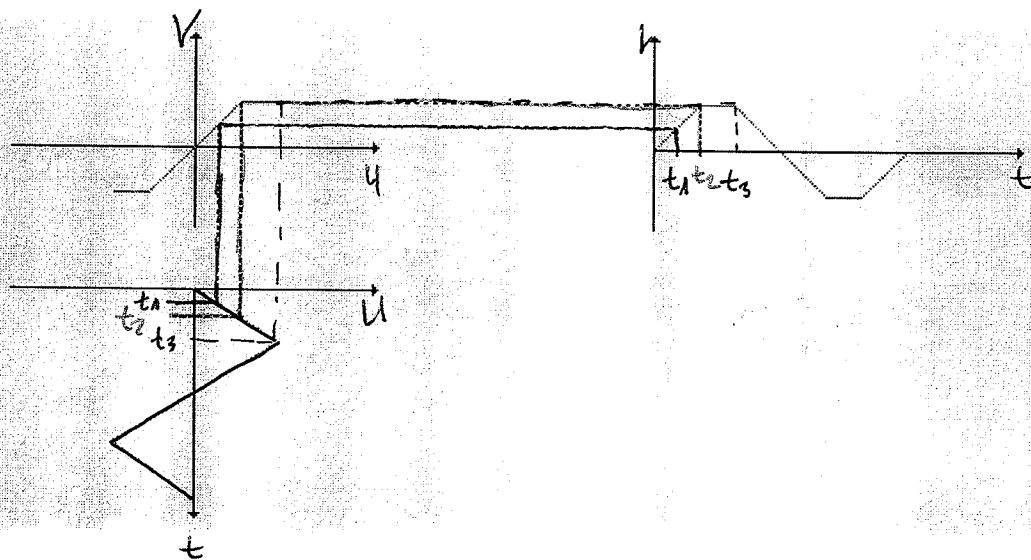
Zeitunabhängige Übertragungsglieder: z.B. Begrenzer



Ein Begrenzer gibt das Eingangssignal zwischen $-a$ und $+a$ unverändert an den Ausgang weiter.

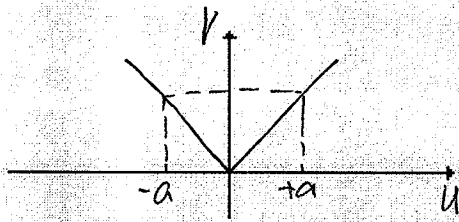
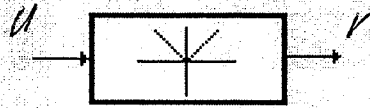


Über-/unterschreitet das Eingangssignal den Wert $+a$ ($-a$), so wird das Ausgangssignal auf $+b$ bzw. $-b$ begrenzt.



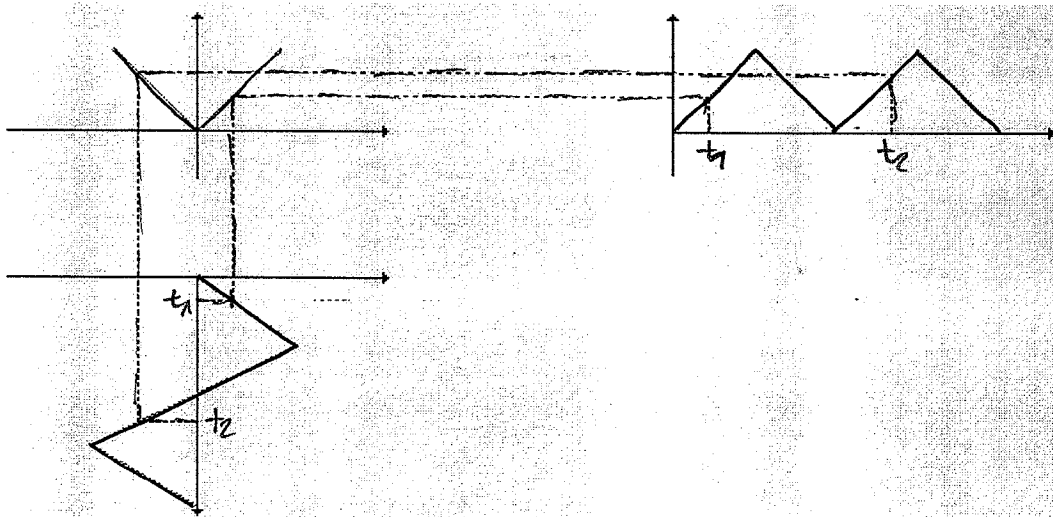
Für jeden Zeitpunkt des Eingangssignals u kann Punkt für Punkt das Ausgangssignal v über die Begrenzerkennlinie grafisch ermittelt werden.

Zeitunabhängige Übertragungsglieder: z.B. Betragsbilder



Der Betragsbilder gibt als Eingangssignal unverändert an den Ausgang weiter, solange das Eingangssignal positiv ist.

Bei negativen Eingangswerten zeigt das Ausgangssignal den gleichen Kurvenverlauf - jedoch mit positiver Amplitude

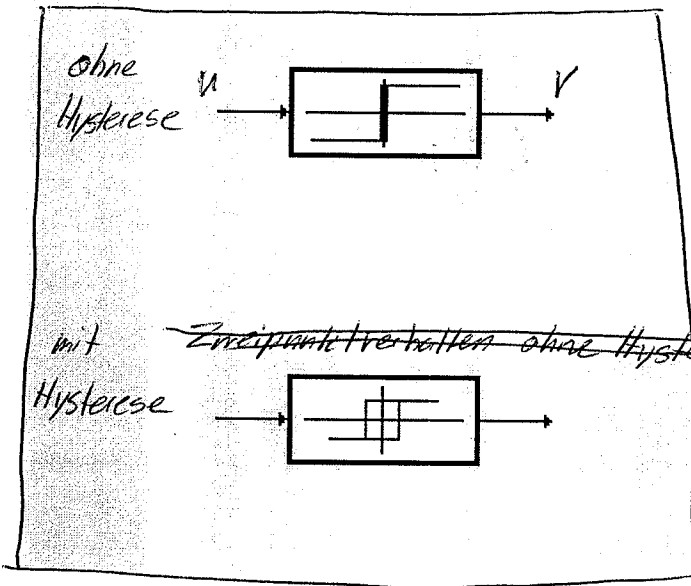


Eingangssignal

Ausgangssignal

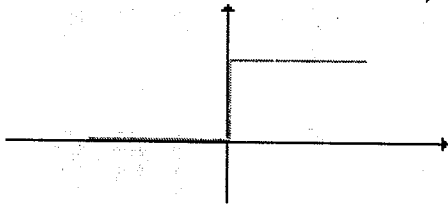
Zeitunabhängige Übertragungsglieder: z.B. Zweipunktglied

Blockschaltbilder

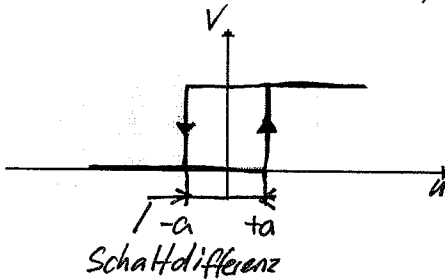


z.B. Lichtschalter: hat Zweipunktverhalten (Ein/Aus)

Zweipunktverhalten ohne Hysterese

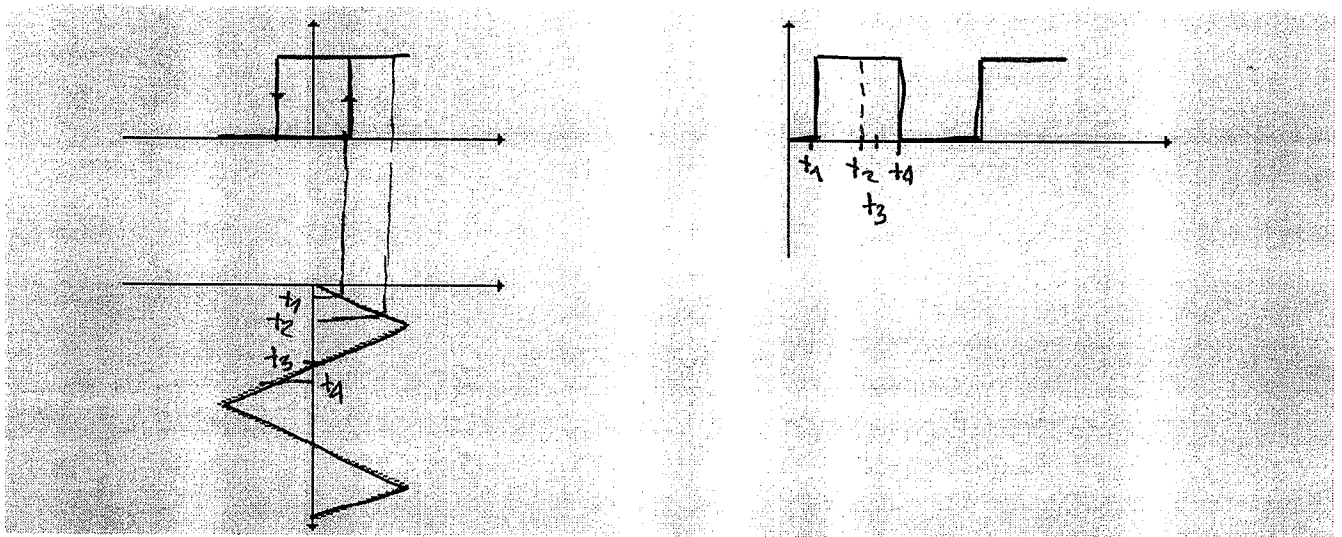


Zweipunktverhalten mit Hysterese



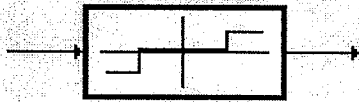
Die Hysterese ist eine Schalt-differenz zwischen Ein- und Aus.

Zeitunabhängige Übertragungsglieder: z.B. Zweipunktglied



Beispiel: Zweipunktverhalten mit Hysterese bei dreieckförmigen Eingangssignal

Zeitunabhängige Übertragungsglieder: z.B. Dreipunktglied



Blockschaltbild eines Dreipunkt-
gliedes ohne Hysterese



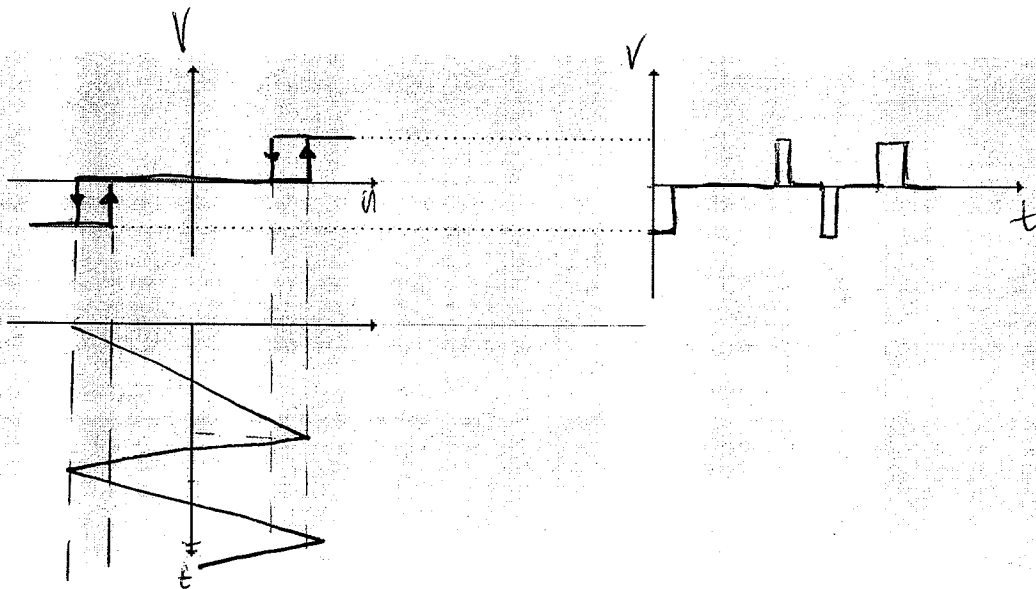
Blockschaltbild eines Dreipunkt-
gliedes mit Hysterese

Solange das Eingangssignal kleiner als $-b$ ist, ist das Ausgangssignal negativ oder ein Motor z.B. im Linkslauf.

Wird u grösser und befindet sich zwischen $-b$ und $+b$, so ist das Ausgangssignal 0 oder der Motor ist abgeschaltet.

Wird das Eingangssignal grösser als $+b$, so erhalten wir ein positives Ausgangssignal oder der Motor befindet sich im Rechtslauf.

Um hier das Flattern um die Schaltpunkte zu verhindern, wurde ebenfalls eine Hysterese vorgesehen.



Aufgabe: Zeichnen sie in dieser Abbildung das Verhalten eines Dreipunktgliedes mit Hysterese bei einem

Übertragungsglieder: Zusammenfassung

Antwort:

Sprungantwort:

Übergangsfunktion:

Blockdarstellung zeitabhängig:

Beharrungszustand:

Blockdarstellung zeitunabhängig:

Übertragungsglieder: Zusammenfassung

- Antwort: Das Ausgangssignal eines \ddot{U} -Gliedes als Reaktion auf ein Eingangssignal.
- Sprungantwort: Die Antwort auf eine Sprungfunktion.
- Übergangsfunktion: Die Sprungantwort auf den Einheitssprung (1-Sprung), bezogen auf das Eingangssignal.
- Blockdarstellung zeitabhängig: Die Blockdarstellung zeitabhängiger \ddot{U} -Glieder erfolgt mit der Übergangsfunktion als Schaltsymbol im Block.
- Beharrungszustand: Der Beharrungszustand ist gegeben, wenn sich das Ausgangssignal bei konstantem Eingangssignal nicht mehr oder nur sehr wenig ändert..
- Blockdarstellung zeitunabhängig: Die Blockdarstellung zeitunabhängiger \ddot{U} -Glieder erfolgt mit der Kennlinie des Beharrungszustandes als Schaltsymbol im Block.

Bezeichnung	Blockdarstellung	Sprungantwort	Parameter
Proportional-glied			$K_p = \text{Verstärkung}$
Integrierglied			$T_i = \text{Integrierzeit}$
Differenzier-glied			$T_d = \text{Differenzierzeit}$
Totzeitglied			$T_T = \text{Totzeit}$
P-T1-Glied			$K_p = \text{Proportionalbeiwert}$ $T_1 = \text{Verzögerungszeitkonstante}$
P-T2-Glied			$K_p = \text{Verstärkung}$ $T_r = \text{Verzögerungszeit}$ $T_a = \text{Ausgleichszeit}$

Brengrenzer			Begrenzwert
Betragsbilder			$v = u $
Zweipunktglied mit Hysterese			Einschalt-Schwellwert Aus Schalt-Schwellwert (Schaltdifferenz)
Dreipunktglied mit Hysterese			Einschalt-Schwellwert Aus Schalt-Schwellwert (Schaltdifferenz)

Übertragungsglieder: Übung

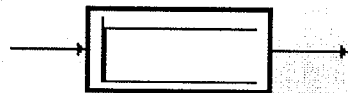
1. Welche Kurve wird bei zeitabhängigen Übertragungsgliedern in das Schaltsymbol gezeichnet?

- a) Sinusantwort
- b) Anstiegsantwort
- c) Übergangsfunktion
- d) Beharrungszustand



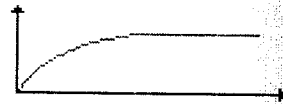
2. Die Abbildung zeigt das Blockschildbild eines Übertragungsgliedes. Welches Verhalten hat es?

- a) Proportionalverhalten
- b) Integralverhalten
- c) Differentialverhalten
- d) Verzögerungsverhalten



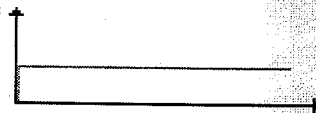
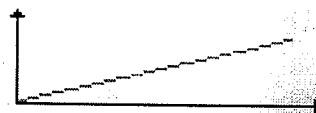
3. Die Kennlinie zeigt die Sprungantwort eines Übertragungsgliedes. Um welches Übertragungsglied handelt es sich dabei?

- a) I-Glied
- b) P-T1-Glied
- c) Totzeitglied
- d) P-Glied

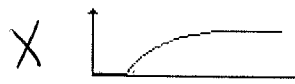


4. Die Kennlinie zeigt die Anstiegsantwort eines Übertragungsgliedes. Welches Verhalten hat das Übertragungsglied?

- a) Proportionalverhalten
- b) Differenzierverhalten
- c) Verzögerungsverhalten 1. Ordnung
- d) Integralverhalten



5. Sie sehen nebenan eine Auswahl von Sprungantworten. Welche Antwort entspricht der Sprungantwort eines Verzögerungsgliedes n-ter Ordnung.

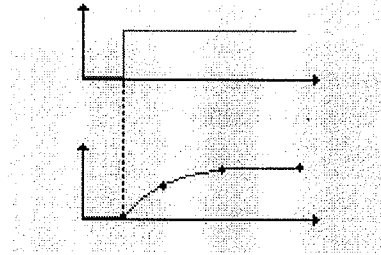


Übertragungsglieder: Übung

6. Durch welche Parameter wird die Sprungantwort eines P-Tn-Gliedes beschrieben?
- a) Proportionalbeiwert K_p , Verzögerungszeit T_u und Integrierzeit T_i
 - b) Proportionalbeiwert K_p und Integrierbeiwert K_i
 - c) Proportionalbeiwert K_p und Verzögerungszeit T_1
 - d) Ausgleichszeit T_g , Verzugszeit T_u und Proportionalbeiwert K_p

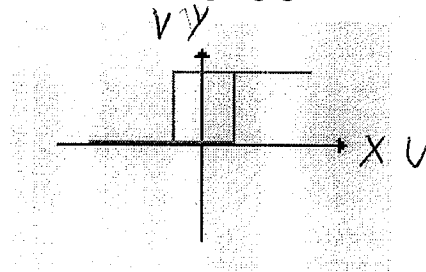
7. Zur Bestimmung der Verzögerungszeit eines Verzögerungsgliedes 1. Ordnung wird eine Tangente an die Sprungantwort angelegt. An welchem Punkt der Kennlinie wird die Tangente angelegt?

- a) Punkt 1
- b) Punkt 2
- c) Punkt 3
- d) Punkt 4



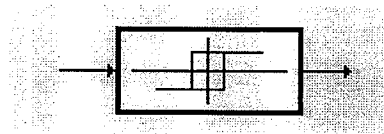
8. Die Abbildung zeigt die Kennlinie eines zeitunabhängigen Übertragungsgliedes. Welche Achsenbeschriftung müssen Sie wählen?

- a) X: Zeit t Y: Ausgangssignal v
- b) X: Zeit t Y: Eingangssignal u
- c) X: Eingangssignal u
Y: Ausgangssignal v
- d) X: Ausgangssignal v
Y: Eingangssignal u

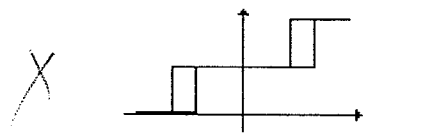
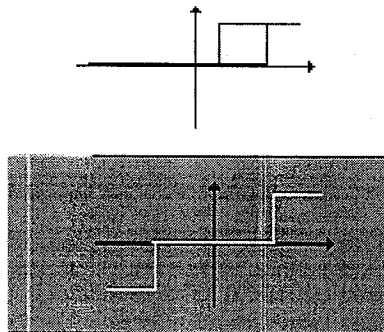


9. Bei dem abgebildeten Übertragungsglied handelt es sich um ein Übertragungsglied mit

- a) Dreipunktverhalten
- b) Begrenzerverhalten
- c) Betragbilderverhalten
- d) Zweipunktverhalten



10. Welche Abbildung zeigt die Übertragungskennlinie eines Dreipunktgliedes mit Hysterese?



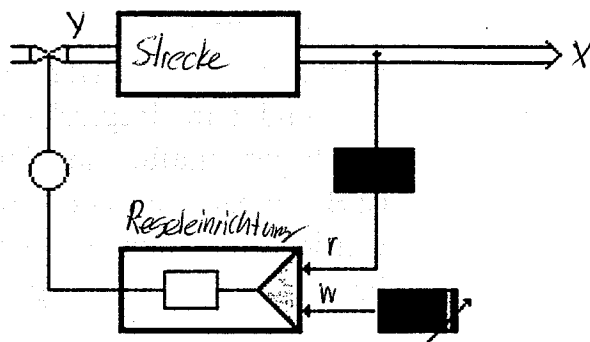
Regelstrecken:

1. Aufbau von Regelstrecken
2. Parameter einer Regelstrecke
3. Beispiele für Regelstrecken
4. Erfolgskontrolle

1. Aufbau einer Regelstrecke

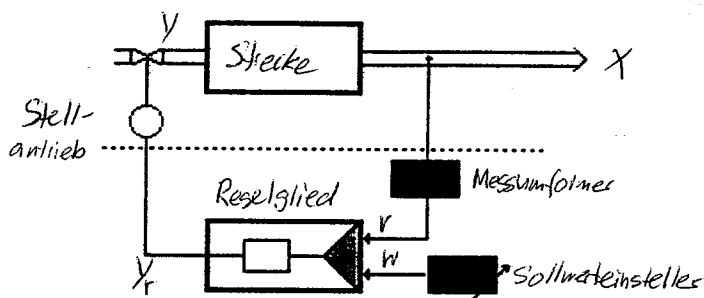
- um ein Verständnis für das Verhalten einer Regelstrecke zu gewinnen, sollte man sich ein Abbild der Prozesse und Maschinen verschaffen.
- dieses Strukturabbild wird in die Blockdarstellung umgesetzt.
- als Ergebnis erhält ^{man}er eine Darstellung der Regelstrecke mit Übertragungsgliedern.

Die Regelstrecke eines Regelkreises ist vorgegeben. Sie setzt sich zusammen aus allen physikalischen Eigenschaften des Systems. Die zu regelnde Maschine oder der zu regelnde Prozess legt diese Eigenschaften fest.



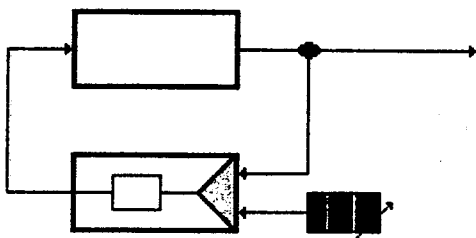
Regelstrecken: Aufbau einer Regelstrecke

In der Praxis ergibt sich häufig eine Darstellung oder ein Sprachgebrauch, der von der DIN Norm abweicht. Hier wird nicht mehr exakt nach den Elementen getrennt:



- die Eigenschaften des Stellgliedes werden der Strecke zugeordnet und
- der Messumformer wird stillschweigend in die Regeleinrichtung integriert. Es wird dann häufig vom Regler gesprochen und gemeint ist die Regeleinrichtung.

Dadurch ergibt sich eine vereinfachte Blockstruktur.

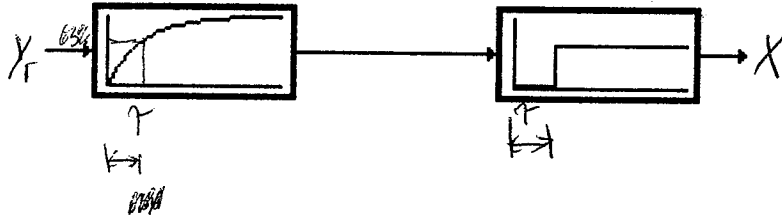


Die Strecke besteht aus dem Stellglied und der eigentlichen Strecke. Über das Signal y_r aus dem "Regler" wird die Strecke beeinflusst.

Die physikalische Regelgröße x wird mit einem Sensor aufgenommen und zum "Regler" geliefert. Die Eigenschaften des Sensors (z.B. Linearisierung der Kennlinie) werden durch den Messumformer im Regler berücksichtigt.

Regelstrecken: Aufbau einer Regelstrecke

Eine Regelstrecke kann für theoretische Untersuchungen in eine Schaltung mit verschiedenen Übertragungsgliedern zerlegt werden. Die Stellgröße y_r wirkt direkt auf die Strecke (da die Eigenschaften des Stellgliedes der Strecke zugeteilt werden).



- Die Veränderung der Eingangsgröße y_r bewirkt eine Änderung der Ausgangsgröße (des 1. Ü-Gliedes = Eingangsgröße des 2. Ü-Gliedes) x .
- Als elektrisches Signal wird jedoch die umgeformte Regelgröße, die Rückführgröße r an die Regeleinrichtung zurückgeführt.
- Da in den meisten Fällen r proportional der Regelgröße x ist, wird nicht exakt zwischen beiden unterschieden.

Sprechweise:

- Auf den folgenden Seiten werden zur Untersuchung von Regelstrecken immer die Regelgröße x als Ausgangsgröße und die Stellgröße y als Eingangsgröße bezeichnet.
- Aus der Sicht der Einheitengleichheit von Eingangs- und Ausgangsgröße müssten eigentlich als Eingangsgröße y_r und als Ausgangsgröße r betrachtet werden.

1. The first part of the document is a letter from the author to the editor, dated 10/10/1964. The letter discusses the author's interest in the subject of the journal and the author's previous work in the field. The author mentions that the work was done during the author's stay at the University of Cambridge, and that the author is grateful to the University for providing the facilities and the opportunity to work in the field.



2. The second part of the document is a letter from the editor to the author, dated 10/15/1964. The editor thanks the author for the letter and the work, and expresses interest in the subject. The editor mentions that the work is of high quality and that the author's previous work in the field is well known. The editor asks the author to provide a short summary of the work and to indicate the author's interest in publishing the work in the journal.

3. The third part of the document is a letter from the author to the editor, dated 10/20/1964. The author thanks the editor for the letter and the interest in the work. The author mentions that the work is of high quality and that the author is interested in publishing the work in the journal. The author provides a short summary of the work and indicates the author's interest in publishing the work in the journal.

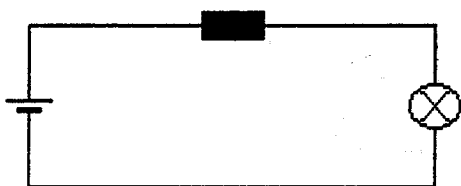
4. The fourth part of the document is a letter from the editor to the author, dated 10/25/1964. The editor thanks the author for the letter and the work, and expresses interest in the subject. The editor mentions that the work is of high quality and that the author's previous work in the field is well known. The editor asks the author to provide a short summary of the work and to indicate the author's interest in publishing the work in the journal.

Regelstrecken: Aufbau einer Regelstrecke

Typische Regelgrößen

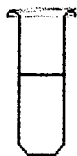
Der Begriff Regelgröße umfasst eine grosse Anzahl von physikalischen Größen die geregelt werden können.

Beispiele aus verschiedenen Bereichen:



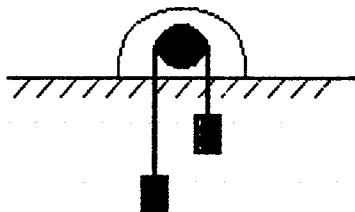
Elektrotechnik:

- Spannung
- Strom
- Leistung
- Licht



Chemie:

- Durchfluss
- Nachmischverhältnis
- Temperatur



Mechanik:

- Drehmoment
- Drehzahl
- Kraft
- Geschwindigkeit



Kraftfahrzeugtechnik:

- Drehzahl
- Geschwindigkeit
- Gaspedal
- Zündzeitpunkt

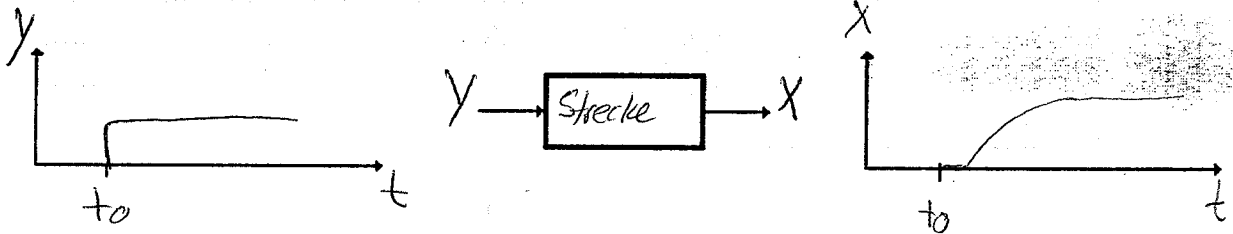
Regelstrecken: Arten von Regelstrecken

2. Arten von Regelstrecken

Bezüglich des Verhaltens von Regelstrecken müssen zwei Arten von Strecken unterschieden werden:

- Strecken mit Ausgleich
- " ohne "

Regelstrecken mit Ausgleich



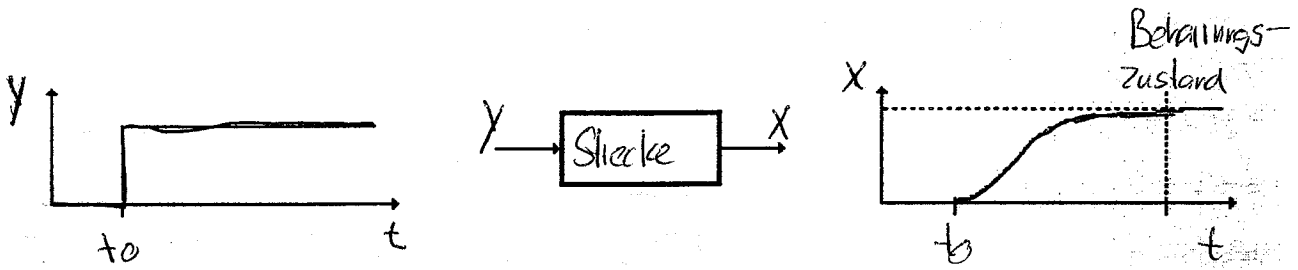
Konstante Eingangsgröße!
⇒ fest zugeordnete Ausgangsgröße!
Immer ein endlicher Endwert!
(Temperatur, Motor-Drehzahl)

Beispiele:

- Heizofen ⇒ konstante Temp.
- Motorantrieb ⇒ konst. Drehzahl in Abhängigkeit von Belastung.

Regelstrecken: Arten von Regelstrecken

Beharrungszustand:

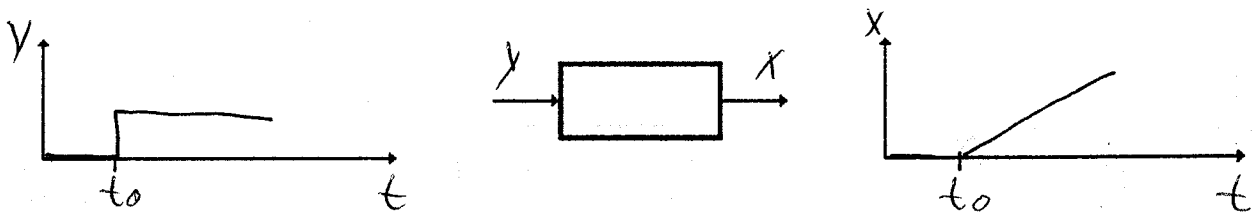


Der Beharrungszustand ist nur bei Strecken mit Ausgleich vorhanden.

Vom Beharrungszustand einer Strecke wird dann gesprochen, wenn sich bei konstanter Eingangsgröße y die Ausgangsgröße nicht mehr oder nur sehr gering verändert.

⇒ Die Strecke befindet sich im stationären Zustand.

Strecken ohne Ausgleich:



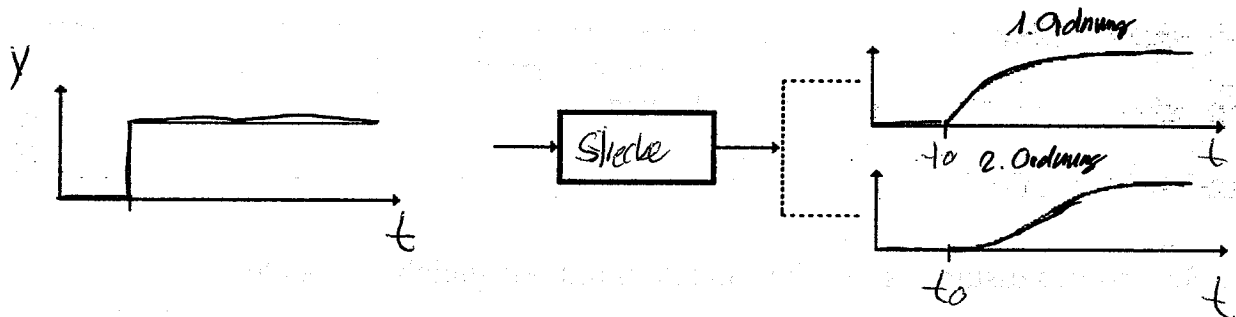
Bei diesen Strecken steigt die Ausgangsgröße bei einer konstanten Eingangsgröße ständig weiter an.

Der Anstieg erfolgt solange, bis die physikalische Grenze der Strecke erreicht ist oder es zur Zerstörung kommt.

Beispiel: Flüssigkeitsbehälter mit Zu- und Ablauf

Regelstrecken: Parameter einer Regelstrecke

Antwort einer Strecke: Als Grundlage für die Untersuchung von Regelstrecken soll immer die Sprungantwort betrachtet werden.

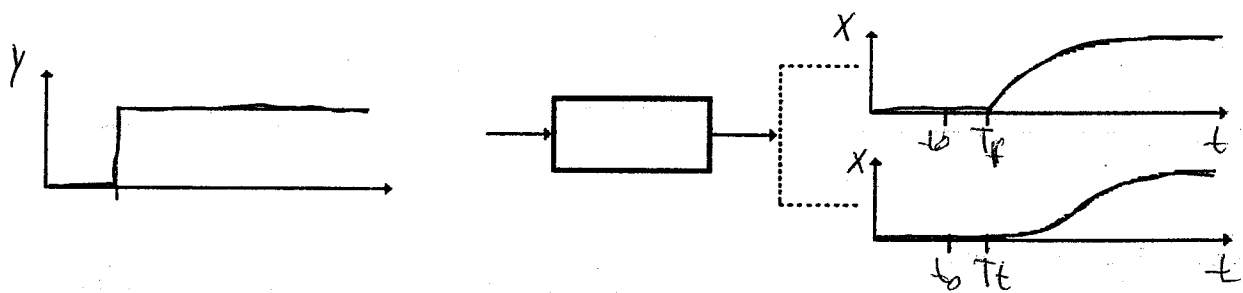


Sprungantwort der Strecke:

Die in der Praxis am häufigsten vorkommenden Strecken sind Regelstrecken 1. Ordnung sowie 2. und höherer Ordnung.

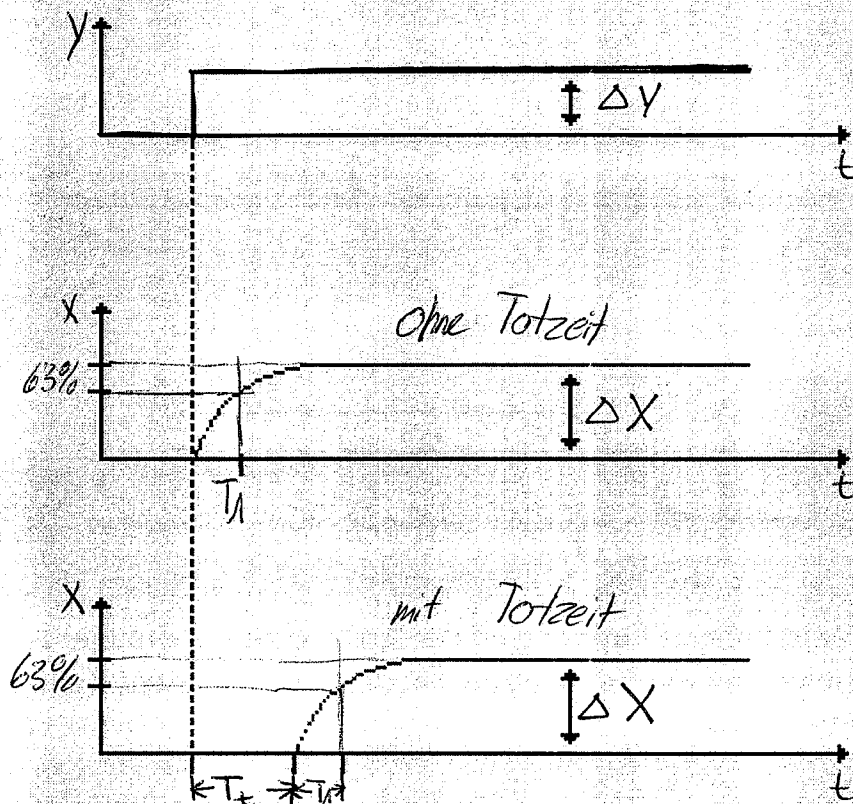
Ebenso finden Sie in der Praxis oft Strecken mit Totzeitverhalten.

Die Abbildung zeigt die Sprungantworten von Strecken 1. sowie 2. und höherer Ordnung mit Totzeit.



Zur Bestimmung der Regelbarkeit und zum Abschätzen des Aufwandes für den Regler müssen die Parameter "Zeitkonstante" und "Übertragungsbeiwert" ermittelt werden. Beachten Sie dazu das Kapitel "Übertragungsglieder".

Regelstrecken: Parameter einer Regelstrecke



Strecken 1. und höherer Ordnung können Sie am Anstieg der Sprungantwort unterscheiden. Strecken 1. Ordnung haben einen positiven Anstieg der Sprungantwort zum Zeitpunkt t_0 bzw. bei Strecken mit Totzeit verschiebt sich der Anstiegspunkt um die Totzeit T_t .

Zeitkonstante T_1 :

Innerhalb dieser Zeitkonstante hat die Regelgröße x nach einem Sprung 63% des Endwertes erreicht. Die Totzeit T_t ist in T_1 nicht enthalten!

Totzeit T_t :

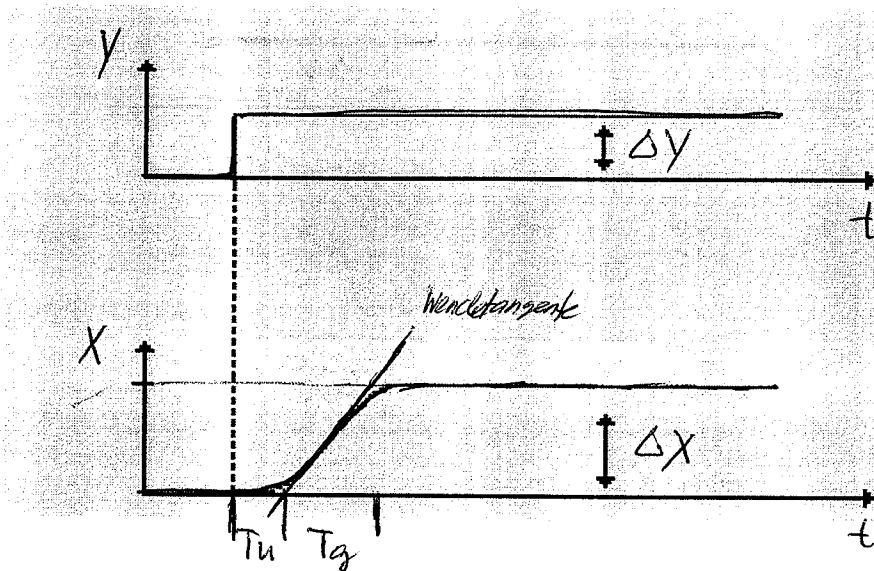
Sie ergibt sich aus der Zeitdifferenz zwischen dem Umschalten der Sprungfunktion und der ersten Reaktion am Ausgang.

Übertragungsbeiwert K_{ps} :

K_{ps} ist der Streckenverstärkungsfaktor. Er errechnet sich aus dem Endwert Δx (100%) der Sprungantwort dividiert durch den Eingangssprung Δy .

$$K_{ps} = \frac{\Delta x}{\Delta y}$$

Regelstrecken: Parameter einer Regelstrecke



Bei Strecken 2. und höherer Ordnung ist der Anstieg zum Zeitpunkt t_0 gleich Null. Die Parameter sind die Verzugszeit T_u , die Ausgleichszeit T_g und der Übertragungsbeiwert K_{ps} .

Legen Sie eine Tangente im Wendepunkt der Sprungantwort an!

Verzugszeit T_u :

Der Zeitpunkt vom Auftreten des Sprunges t_0 bis zum Schnittpunkt der Wendetangente mit der Zeitachse.

Ausgleichszeit T_g :

Der Zeitabschnitt vom Schnittpunkt der Wendetangente mit der Zeitachse bis zum Schnittpunkt der Wendetangente mit dem Endwert der Regelgröße.

Übertragungsbeiwert K_{ps} :

Der Endwert Δx (100%) der Sprungantwort dividiert durch den Eingangssprung Δy .

$$K_{ps} = \frac{\Delta x}{\Delta y}$$

Regelstrecken: Parameter einer Regelstrecke

Regelbarkeit der Strecke:

$$\frac{T_u}{T_g} = \frac{\text{Verzugszeit}}{\text{Ausgleichszeit}} \Rightarrow \text{Regelbarkeit}$$

Aus dem Verhältnis Verzugszeit zu Ausgleichszeit kann eine ungefähre Abschätzung der Regelbarkeit erfolgen.

Erfahrungsgemäss gilt:

$$\begin{aligned} \frac{T_u}{T_g} < 1/10 &\Rightarrow \text{gut regelbar} \\ \frac{T_u}{T_g} < 1/6 &\Rightarrow \text{noch regelbar} \\ \frac{T_u}{T_g} > 1/3 &\Rightarrow \text{nicht regelbar} \end{aligned}$$

Wovon hängen T_u und T_g ab?

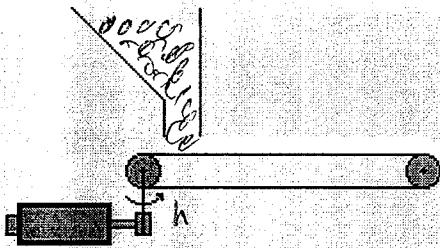
Die Ausgleichszeit T_g wird von den grossen Zeitkonstanten der Strecke bestimmt, während die Verzugszeit T_u ihre Ursache in den kleinen Zeitkonstanten hat.

Das bedeutet, dass bei vielen kleinen Verzögerungen die Verzugszeit T_u immer grösser wird und bald nicht mehr von einer echten Totzeit zu unterscheiden ist:

- T_g ist z.B. abhängig vom Behälter- oder Kesselvolumen bei einer Temperaturregelung für eine Flüssigkeit.
- T_u ist z.B. abhängig von den Übergangswiderständen zwischen Heizstäben und Flüssigkeit.

Regelstrecken: Beispiele für Regelstrecken

Proportionalstrecke

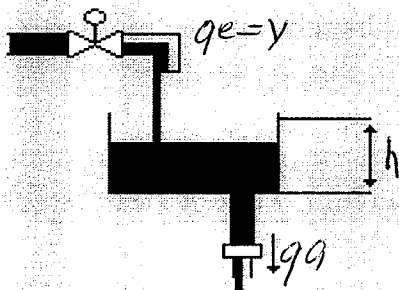


Wird als Stellgröße die Drehzahl n des Antriebes verändert, so wird sofort mehr Material vom Band geworfen.

Die Material ist die Regelgröße.

Integralstrecke

Beim Behälter mit Flüssigkeit soll die Füllhöhe h beeinflusst werden.



Die Regelgröße x ist die ~~Flüssigkeit~~ Füllhöhe h

Die Stellgröße y entspricht dem Zulauf q_e

Der Abfluss q_a ist eine Störgröße.

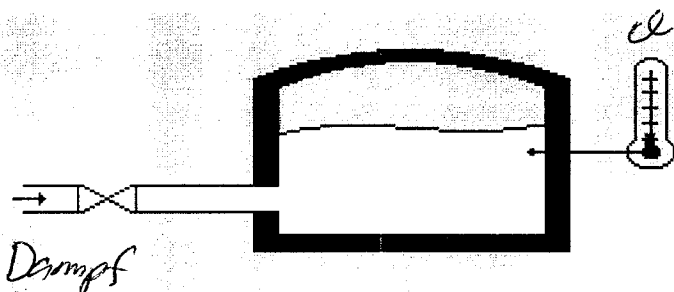
$q_e - q_a = 0$ konstant

$q_e - q_a > 0$ Füllhöhe steigt

$q_e - q_a < 0$ " sinkt

P-T_n-Temperaturstrecke

Ein Warmwasserbehälter wird mit Dampf aufgeheizt.



Nach dem Öffnen des Einlassventils steigt die Temperatur v an.

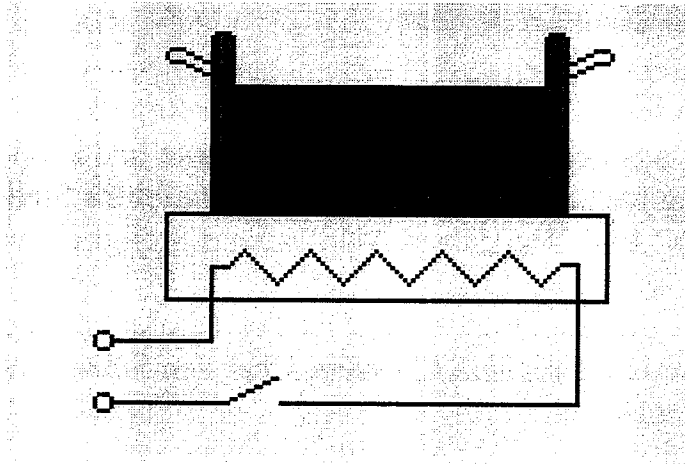
Wie schnell der Behälter aufgeheizt wird, hängt von der Zeitkonstante des Behälters ab. Bestimmt wird diese Zeitkonstante vom Volumen und der Oberfläche des Behälters.

Regelstrecken: Beispiele für Regelstrecken

P-T_n-Temperaturstrecke.....

Es soll eine Flüssigkeit in einem Topf auf einem Elektroherd erhitzt werden.

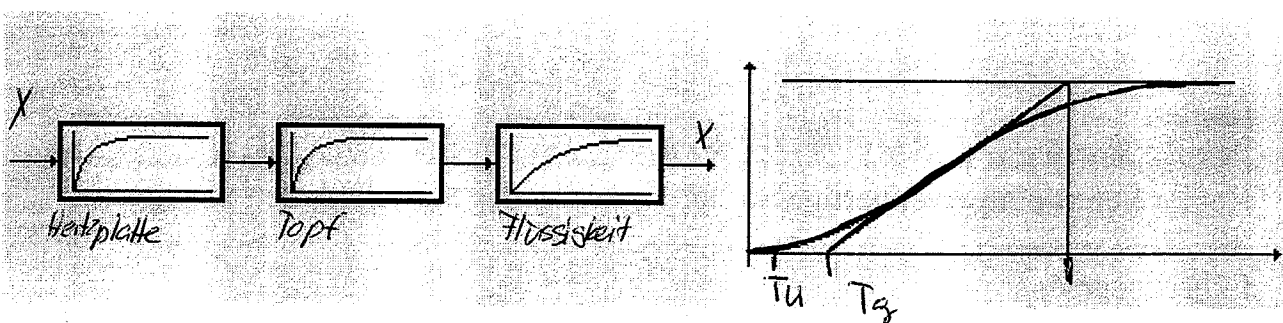
Mit dem Einschalten des Stromes wird zunächst der Energiespeicher Heizplatte erwärmt, dann der Topf und zum Schluss erst die Flüssigkeit.



Werden mehrere Verzögerungsglieder 1. Ordnung (P-T1-Glieder) rückwirkungsfrei in Reihe geschaltet, so ergeben sich, abhängig von der Anzahl der Verzögerungsglieder, Regelstrecken höherer Ordnung.

Drei Verzögerungsglieder ergeben eine P-T3-Strecke.

Die Verzögerungen können den einzelnen Energiespeichern der Regelstrecke zugeordnet werden.

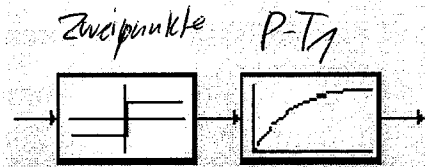
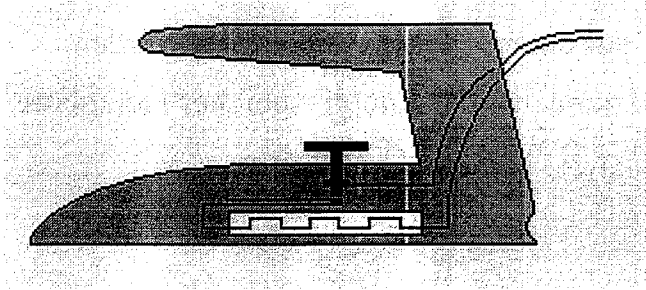


Die kleinen Zeitkonstanten der Strecke sind die Heizplatte und der Topf. Diese bestimmen die Verzugszeit T_u .

Die Ausgleichszeit wird im wesentlichen durch die Wärmespeicherfähigkeit, also durch die Menge, der Flüssigkeit bestimmt.

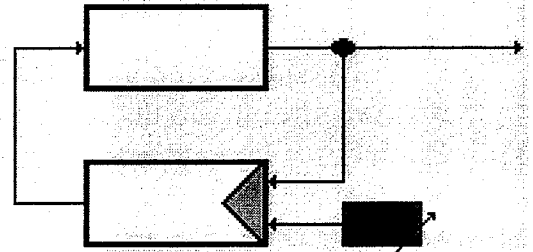
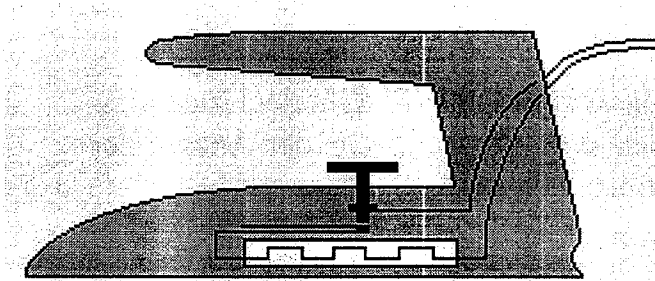
Regelstrecken: Beispiele für Regelstrecken

Zweipunktstrecke..... Bügeleisen.....



Das Bügeleisen in sich ist schon ein kompletter Regelkreis. Die eigentliche Strecke besteht aus der thermischen Zeitkonstante und kann als eine Verzögerung 1. Ordnung behandelt werden. Der Regler gibt als Stellgröße das Signal "Heizstrom EIN" und "Heizstrom AUS" an das Stellglied weiter.

Der Strom heizt die Bügelplatte auf. Die Temperatur steigt erst schnell an und nähert sich dann langsam dem Endwert. Über den Schalter wird dann der Heizstrom wieder abgeschaltet.



Strecke:

Die Strecke ist die *Bügelplatte mit Schalter*

Der Schalter ist das Stellglied.

Regler:

Der Regler ist der *Bimetallstreifen am Schalter* Der

Regler liefert eine zweiwertige Stellgröße y_r an das Stellglied, den Schalter.

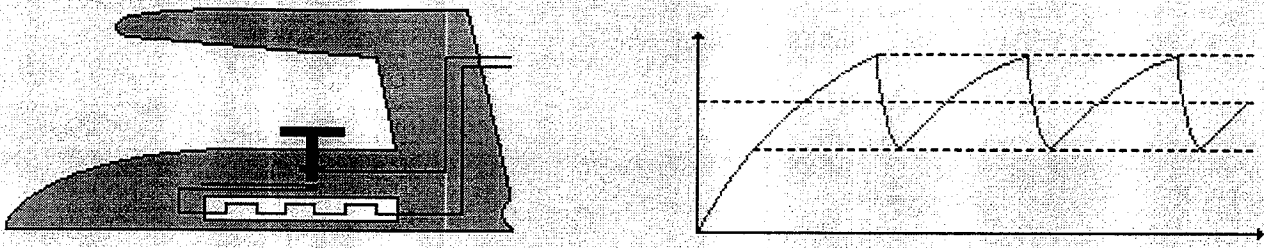
Führungsgröße:

Die Führungsgröße ist die *Sollwert - Temperatur* und wird über die Einstellschraube eingestellt.

Vergleicher:

Der Vergleicher ist die Wegänderung zwischen der Einstellschraube und Verbiegung des Bimetallstreifens.

Regelstrecken: Beispiele für Regelstrecken



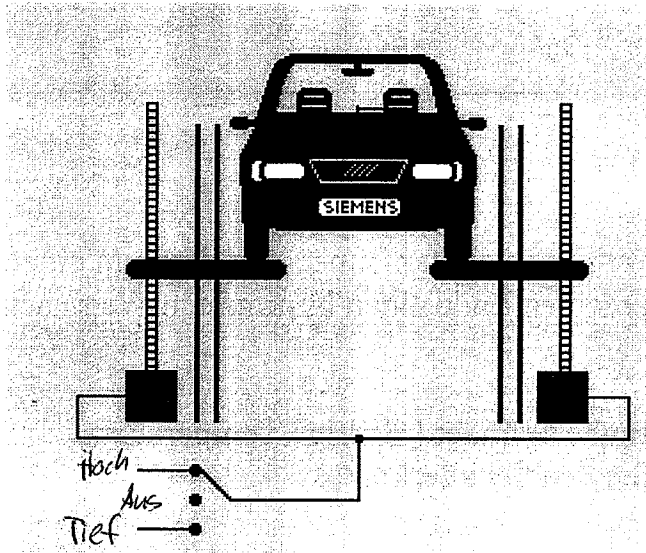
Funktionsweise:

In Abhängigkeit von der Temperatur verbiegt sich der Bimetallstreifen um einen bestimmten Winkel und legt dabei am rechten Ende einen bestimmten Weg nach unten zurück.

- Je weiter oben sich die Einstellschraube befindet (niedrige Temperatur), desto eher öffnet der Bimetallstreifen den Schalterkontakt.
- Je weiter die Einstellschraube eingedreht ist, desto später öffnet der Schalterkontakt, da eine höhere Temperatur zum Verbiegen des Streifens erforderlich ist.

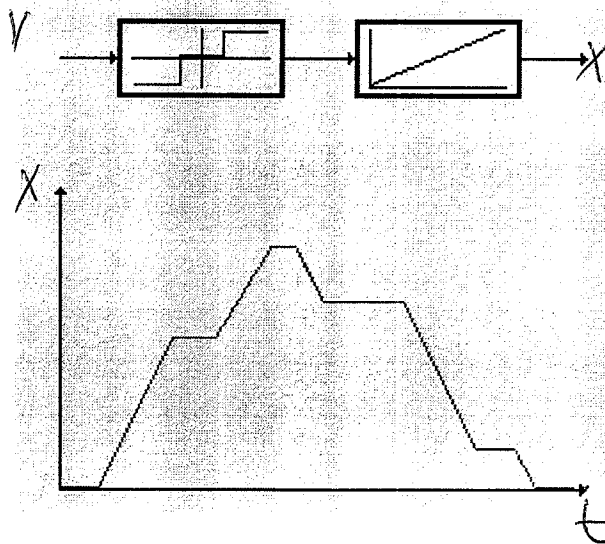
Die Kennlinie zeigt den Verlauf der Temperatur an der Bügelplatte. Dieser Verlauf ist typisch für Strecken, die nur mit einer zweiwertigen Stellgröße beeinflusst werden können.

Dreipunktstrecke Hebebühne



Die Hebebühne in einer Autowerkstatt zeigt das Dreipunktverhalten. Der Schalter S hat drei Positionen. Die Verstellgeschwindigkeit lässt sich nicht vom Schalter aus verändern.

Die Endschalter überwachen die minimale und maximale Position der Bühne ($h = 0$ und $h = \max$) und schalten die Motoren ggf. ab.





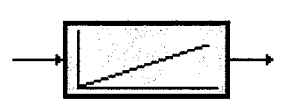
Aus regeltechnischer Sicht liegt ein dreiwertiges Stellglied vor.

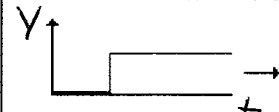
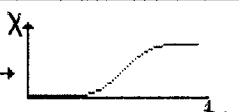
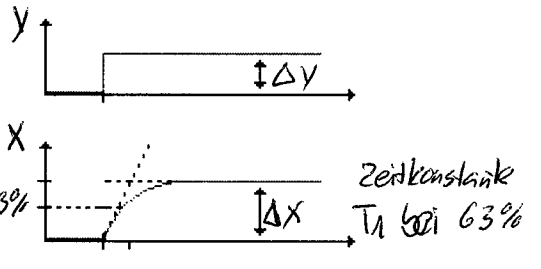
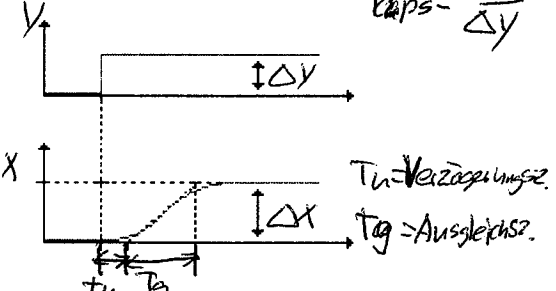
Die Regelgröße x bzw. ... h ... verändert sich linear mit der Zeit.

Es handelt sich um ein *integrales*... Verhalten zwischen Geschwindigkeit und Höhe der eigentlichen Strecke.

Dieser Strecke wurde ein Dreipunktglied vorgeschaltet.

Regelstrecken: Zusammenfassung

Darstellungsform	Regelstrecken werden mit Übertragungsgliedern dargestellt.	
Strecken mit Ausgleich	Bei konstanter Stellgrösse y strebt die Regelgrösse x einem festen Endwert zu.	
Strecken ohne Ausgleich	Die Ausgangsgrösse steigt bei konstanter Eingangsgrösse ständig weiter an, bis die physikalische Grenze erreicht wird.	

Sprungantwort	 <p>Die Sprungantwort ist die Grundlage für die Untersuchung von Strecken</p>	
Sprungantwort P-T1-Glied	 <p>Zeitkonstante T_1 bei 63%</p>	 <p>$K_{aps} = \frac{\Delta X}{\Delta Y}$ $T_u = \text{Verzögerungszeit}$ $T_g = \text{Ausgleichszeit}$</p>

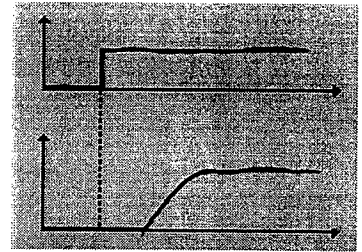
Regelbarkeit	$\frac{T_u}{T_g} < \frac{1}{10}$ gut regelbar $\sim \frac{1}{3}$ noch regelbar $> \frac{1}{3}$ schlecht regelbar	
Verzugszeit T_u	Abhängig von den kleinen Zeitkonstanten einer Strecke (z.B. Übertragungswiderstände Heizstab / Heizplatte)	
Ausgleichszeit T_g	Abhängig von den grossen Zeitkonstanten einer Strecke (z.B. Kesselvolumen, Behältervolumen)	

Regelstrecken: Übung

1. Die Abbildung zeigt die Sprungantwort einer Strecke.

Um welche Strecke handelt es sich?

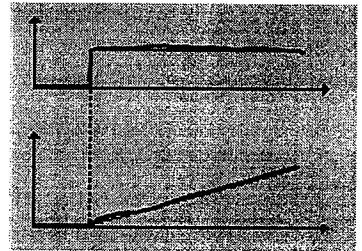
- a) Proportionalstrecke mit Totzeit
- b) P-T1-Strecke mit Totzeit
- c) Strecke ohne Ausgleich
- d) P-Tn-Strecke ohne Totzeit



2. Die Abbildung zeigt die Sprungantwort einer Strecke.

Um welchen Typ von Strecke handelt es sich?

- a) Strecke ohne Ausgleich
- b) Strecke mit Ausgleich
- c) Strecke mit Totzeit
- d) Strecke 1. Ordnung



3. Welche Aussage über die Strecke mit Ausgleich ist richtig, wenn die Eingangsgrösse, die Stellgrösse, konstant ist?

- a) Ein konstanter Endwert ist immer ohne Zeitverzögerung erreicht.
- b) Die Strecke zeigt integrales Verhalten.
- c) Die Regelgrösse strebt innerhalb gewisser Zeit dem Endwert zu.
- d) Die Regelgrösse steigt weiter an.

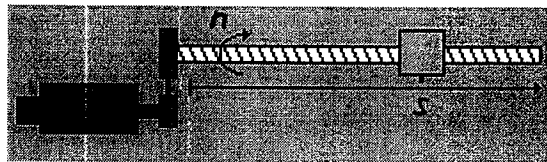
4. Welches Verhalten ist typisch für eine Regelstrecke ohne Ausgleich?

- a) Zweipunktverhalten
- b) Verzögerungsverhalten n-ter Ordnung
- c) Proportionalverhalten
- d) Integralverhalten

5. Die Abbildung zeigt eine Strecke für eine Positioniereinrichtung. Die Regelgrösse ist die Position s und die Stellgrösse die Drehzal n . n kann jeden beliebigen Wert zwischen 0 und 100 annehmen.

Welches Übertragungsglied beschreibt das Verhalten der Strecke?

- a) P-Glied
- b) I-Glied
- c) P-T1 Glied
- d) Totzeitglied

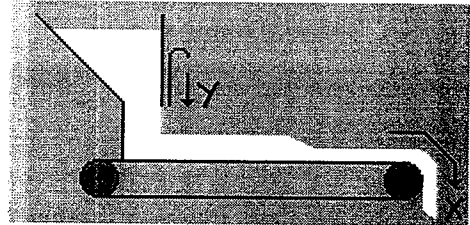


Regelstrecken: Übung

6. Die Abbildung zeigt ein Förderband, auf dem das Fördergut transportiert wird. Die Regelgröße ist die Menge des Fördergutes x . Die Geschwindigkeit des Förderbandes ist konstant und nicht verstellbar. Mit der Stellung des Schiebers y wird die Fördermenge beeinflusst.

Um welche Strecke handelt es sich?

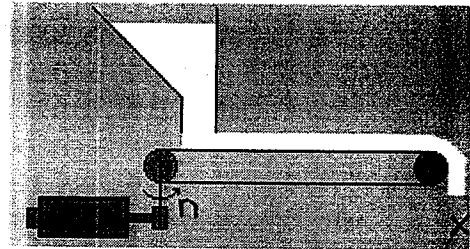
- a) Proportionalstrecke ohne Totzeit
- b) Proportionalstrecke mit Totzeit
- c) P-T1 Strecke ohne Totzeit
- d) P-Tn-Strecke mit Totzeit



7. Die Abbildung zeigt wiederum ein Förderband. Die Regelgröße x ist die Menge des Fördergutes. Mit der Drehzahl (Stellgröße) kann die Menge des Fördergutes beeinflusst werden.

Um welchen Streckentyp handelt es sich?

- a) Proportionalstrecke ohne Totzeit
- b) Proportionalstrecke mit Totzeit
- c) P-T1 Strecke ohne Totzeit
- d) P-T1 Strecke mit Totzeit



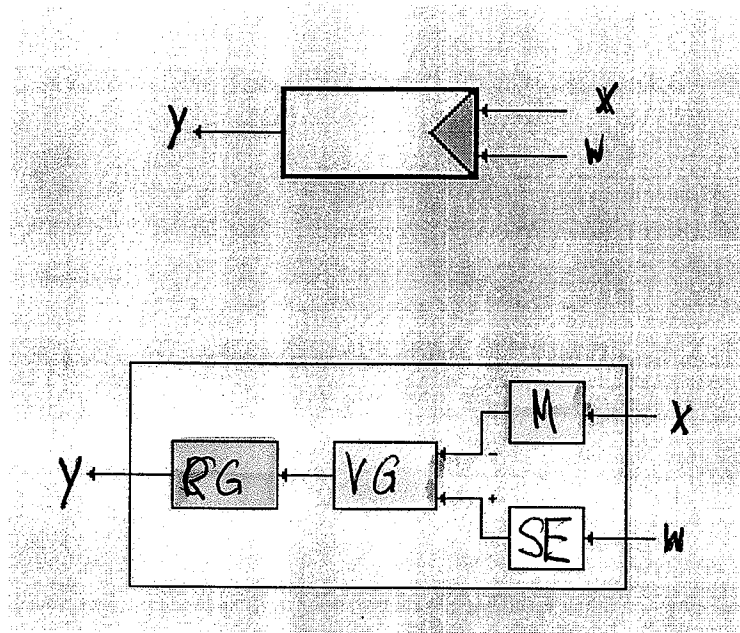
8. Der Kühlschrank in Ihrer Wohnung schaltet zur Kühlung das Kühlaggregat ein. Ist die Temperatur erreicht, so wird das Aggregat wieder abgeschaltet.

Um welche Art von Regelstrecke handelt es sich?

- a) Proportionalstrecke
- b) Integralstrecke
- c) Totzeitstrecke
- d) Zweipunktstrecke

Regler: Aufgabe des Reglers

Das Regeln, die Regelung, ist ein Vorgang, bei dem die zu regelnde Grösse (Regelgrösse), fortlaufend erfasst, mit einer anderen Grösse, der Führungsgrösse, verglichen und im Sinne einer Angleichung an die Führungsgrösse beeinflusst wird.



Der Regler wird im Signalflussplan durch einen Block dargestellt, an dem die Grössen Istwert x und Sollwert w angreifen und von dem die Stellgrösse y ausgeht.

Der Messumformer kann im Regler oder auch in der Anlage untergebracht sein. Ferner beinhaltet der Regler einen Sollwerteinsteller SE zur Vorgabe des Sollwertes w . Da der Istwert x und der Sollwert w verglichen werden müssen, ist ein Vergleichsblock VG vorhanden. Die Gegenkopplung bzw. Vorzeichenumkehr wird im Vergleichsblock vorgenommen.

Stetige Regler:

Bei stetigen Reglern wird die Stellgrösse in bezug auf die Regeldifferenz stetig, d.h. ununterbrochen beeinflusst. Im einfachsten Fall ist die Stellgrösse proportional zur Regelabweichung.

Unstetige Regler:

Bei diesen Reglern schaltet die Stellgrösse y zwischen zwei oder drei Werten um. Das bedeutet z.B., dass ein Magnetventil je nach Grösse der Regeldifferenz unterschiedlich lang ein- bzw. ausgeschaltet wird.

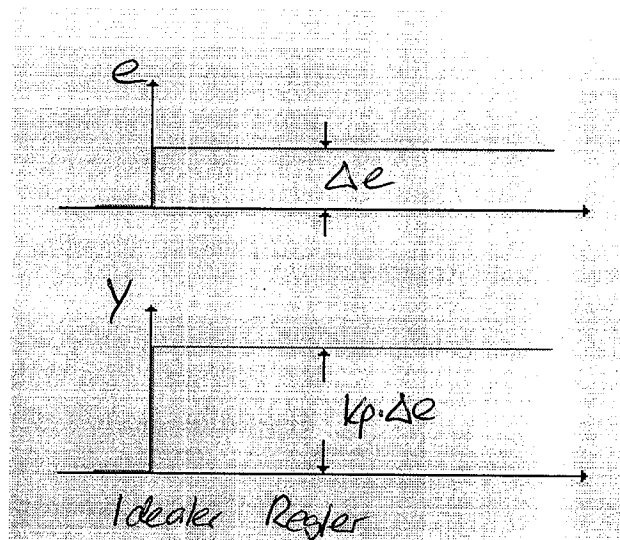
Digitale Regler:

Wird die Reglerfunktion $y = f(e)$ von einem Mikroprozessor bearbeitet, so liegt grundsätzlich ein unstetiger Regler vor, aber die einzelnen diskreten Wertestufen vom Stellsignal liegen sehr dicht beieinander. Auch wird die Stellgrösse im Vergleich zu den Zeitkonstanten der Regelstrecke sehr oft aktualisiert.

Ein digitaler Regler wirkt daher in den meisten Fällen auf die Regelstrecke wie ein werte- und zeitkontinuierlicher Regler ein.

Regler: Stetige Regler

P-Regler



Der einfachste stetige Regler ist der Proportionalregler (P-Regler). Die Stellgrösse ist proportional der Regeldifferenz e , also

$$y = k_p \cdot e$$

k_p ist der Übertragungsbeiwert - bei technischen Ausführungen in weiten Grenzen einstellbar.

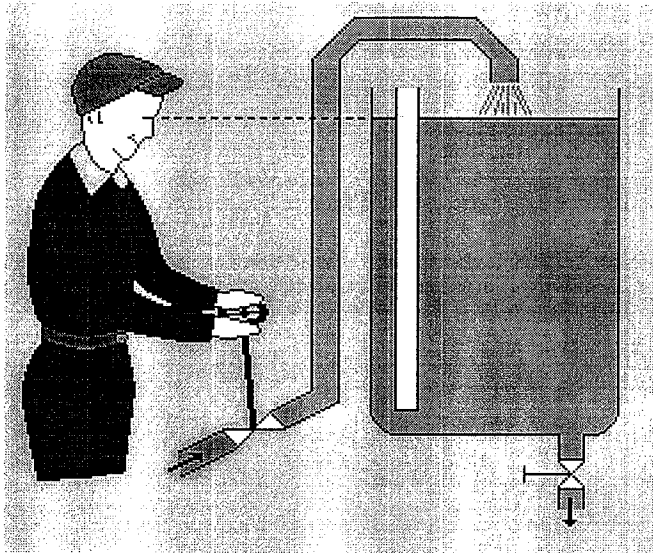
Ein P-Regler nimmt demnach nur dann eine Verstellung des Stellgliedes vor, wenn eine Regeldifferenz e vorliegt.

Der P-Regler ist nicht in der Lage, eine Regeldifferenz vollständig auszuregeln.

Die anhaltende Regelabweichung wird umso kleiner, je grösser k_p gewählt ist, da hierdurch der Eingriff des Reglers auf die Regelstrecke entsprechend gross ist. k_p darf jedoch bei vielen Strecken nicht beliebig gross gewählt werden, da sonst Schwingungen der Regelgrösse auftreten können.

Regler: Stetige Regler

Beispiel zum P-Regler:



In einem Behälter soll der Füllstand bei variablem Abflussstrom konstant gehalten werden. Die Aufgabe soll vom Bediener von Hand erfüllt werden.

Der Bediener beobachtet ständig den Füllstand im Behälter und vergleicht ihn mit dem vorgegebenen Sollwert. Tritt eine Differenz auf, so verändert er mittels Handrad den Zuflussstrom.

Der Bediener könnte das Ventil proportional zur auftretenden Regeldifferenz verstellen. Diese Arbeitsweise des Bediener entspricht der eines P-Reglers.

Bei einer Regeldifferenz von $e = 5$ cm könnte er das Ventil um eine Umdrehung öffnen. Bei $e = 10$ cm demzufolge dann um zwei Umdrehungen.

Vorteil:

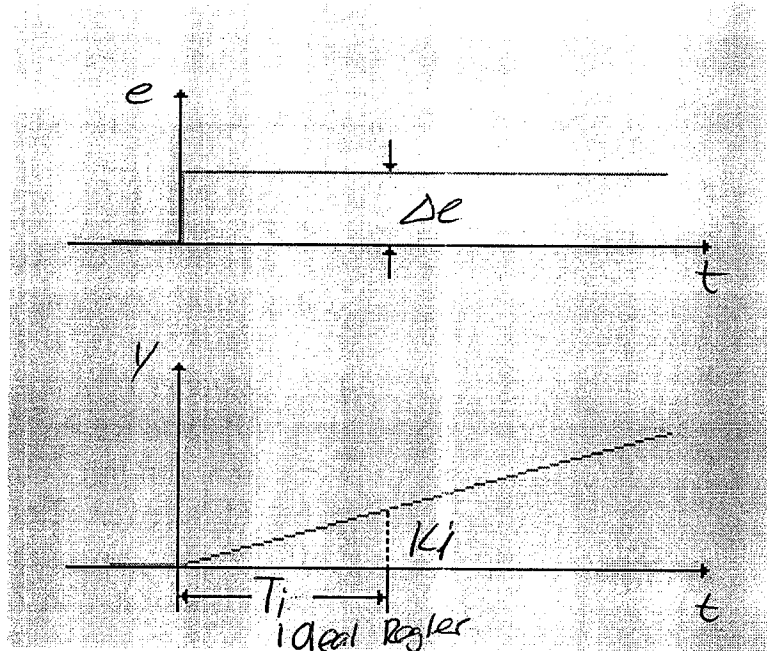
Sehr schnelle Reaktion auf Regeldifferenz.

Nachteil:

Der vorgegebene Sollwert wird, solange die Störung wirkt, nicht mehr erreicht; es tritt eine bleibende Regeldifferenz oder Regelabweichung auf.

Regler: Stetige Regler

I-Regler



Beim Integralregler (I-Regler) erfolgt eine Verstellung des Stellgliedes so lange wie eine Regeldifferenz e vorliegt. Nach dem Ablauf des Regelvorganges ist die Regelabweichung gleich Null.

Die Sprungantwort auf einen Einheitssprung lässt sich durch folgende Gleichung beschreiben:

$$y = K_i \cdot \Delta e \cdot t$$

K_i ist der Übertragungsbeiwert; ist ein Maß für die Steigung der Sprungantwort und ist ein dimensionsbehafteter Wert (z.B. $K_i = 0,1 \frac{1}{s}$).

Als Einstellparameter für den I-Regler wird jedoch meist die Einstellzeit $T_i = 1/K_i$ verwendet.

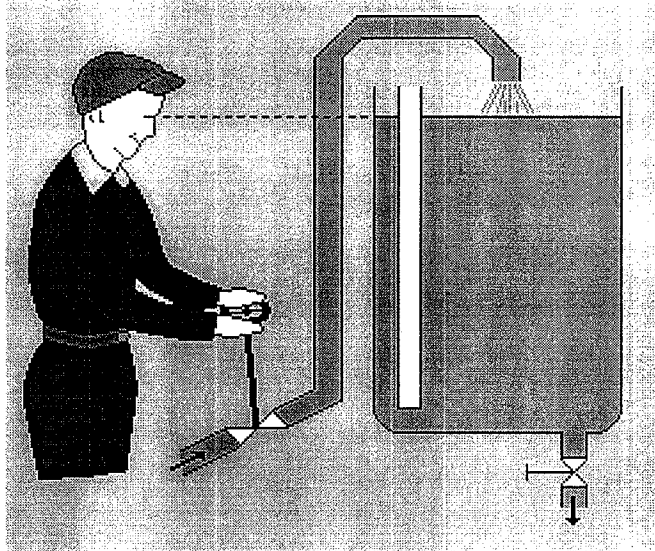
Beispiel:

Aus $K_i = 0,1 \frac{1}{s}$ folgt für die Einstellzeit $1/K_i = 10 \text{ s}$.

Da die Stellgröße sich erst allmählich aufbaut, ist der Eingriff wesentlich langsamer als beim P-Regler.

Regler: Stetige Regler

Beispiel zum I-Regler:



In einem Behälter soll der Füllstand bei variablem Abflussstrom konstant gehalten werden. Die Aufgabe soll vom Bediener von Hand erfüllt werden.

Der Bediener beobachtet ständig den Füllstand im Behälter und vergleicht ihn mit dem vorgegebenen Sollwert. Tritt eine Differenz auf, so verändert er mittels Handrad den Zuflussstrom.

Der Bediener dreht beim Auftreten einer Regeldifferenz das Ventil so lange in Richtung "öffnen" oder "schliessen", bis die Regeldifferenz den Wert Null annimmt.

Je grösser die Regeldifferenz ist, desto schneller wird das Ventil zu- bzw. aufgedreht. Diese Arbeitsweise des Bedieners entspricht der eines Integralreglers (I-Regler).

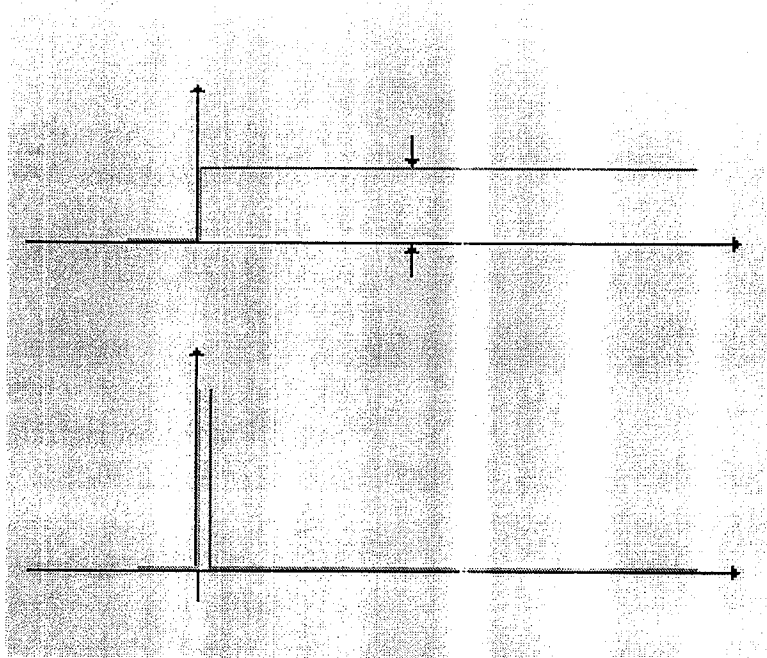
Vorteil:

Keine bleibende Regeldifferenz oder Regelabweichung.

Nachteil:

Langsamere Reaktion auf eine Regeldifferenz als beim P-Regler.

Regler: Stetige Regler

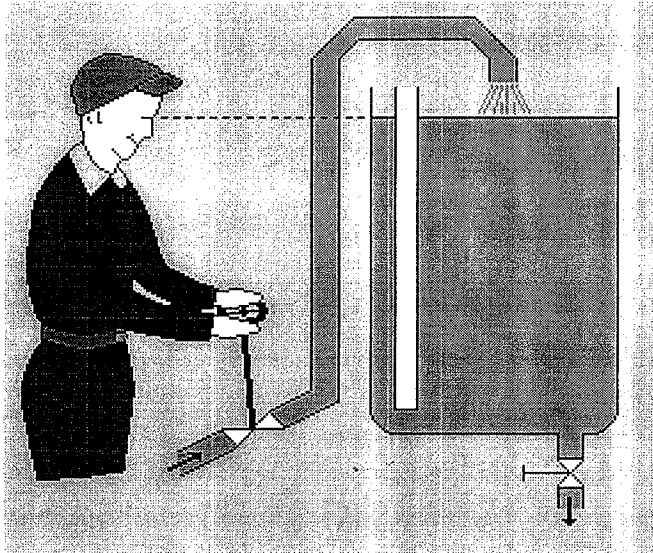


Einen Regler, bei dem die Stellgröße durch die Änderungsgeschwindigkeit der Regeldifferenz e bestimmt wird, bezeichnet man als differentieller Regler (D-Regler).

Ein D-Regler kommt in der Praxis allein als Regler nicht in Frage.

Regler: Stetige Regler

Beispiel zum D-Regler:



In einem Behälter soll der Füllstand bei variablem Abflussstrom konstant gehalten werden. Die Aufgabe soll vom Bediener von Hand erfüllt werden.

Der Bediener beobachtet ständig den Füllstand im Behälter und vergleicht ihn mit dem vorgegebenen Sollwert. Je nach der Änderungsgeschwindigkeit der Regeldifferenz e verändert er mittels Handrad den Zuflussstrom.

Der Bediener beobachtet, wie schnell der Füllstand steigt oder fällt. Abhängig von der Schnelligkeit der Änderung verstellt er das Stellventil.

Bleibt eine Regeldifferenz e bestehen und ändert sie sich nicht mehr, so wird der D-Regler auch nicht mehr reagieren.

Folgerung:

Der D-Regler ist schnell - aber falsch!

Regler: Stetige Regler

Gegenüberstellung:

P-Regler:

P: schnelle reaktion

N: bleibende Differenz

I-Regler:

P: keine Regeldifferenz

N: langsam

D-Regler:

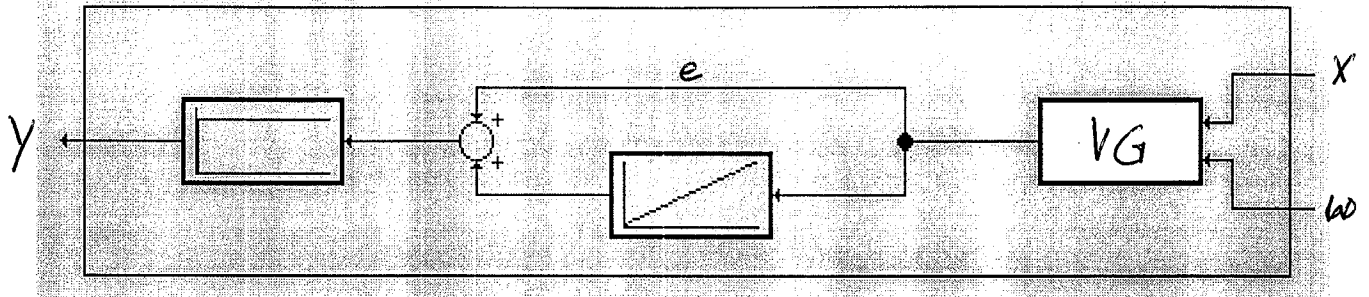
P: Schnell

N: Bleibende Regelabweichung

N: allein nicht brauchbar

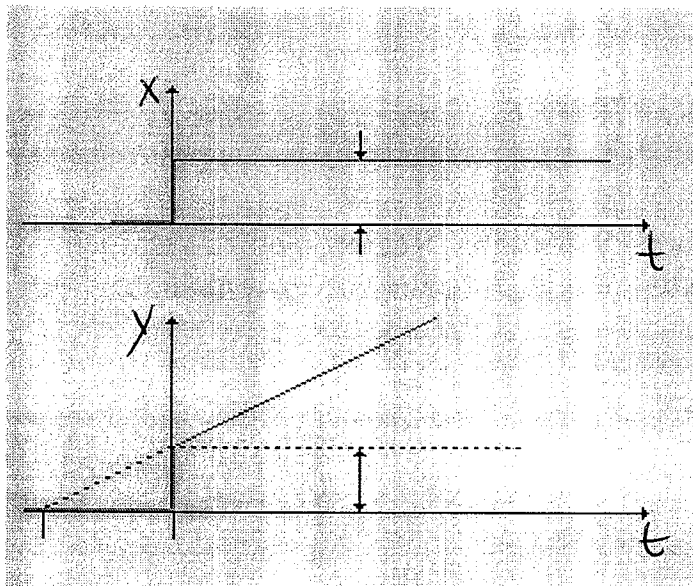
Es liegt nahe, die Vorteile der einzelnen elementaren Reglertypen zu vereinen und Zusammenschaltungen wie PI-, PD- und PID-Regler zu verwenden.

Regler: Stetige Regler



PI-Regler:

PI-Regler entstehen im Prinzip durch Addition der Verstärkungen eines P- und eines I-Reglers, die beide mit demselben Vergleichs VG arbeiten.



Sprungantwort:

Die Sprungantwort des PI-Reglers setzt sich aus der Überlagerung der Sprungantworten eines P- und eines I-Reglers zusammen.

Nachstellzeit T_n :

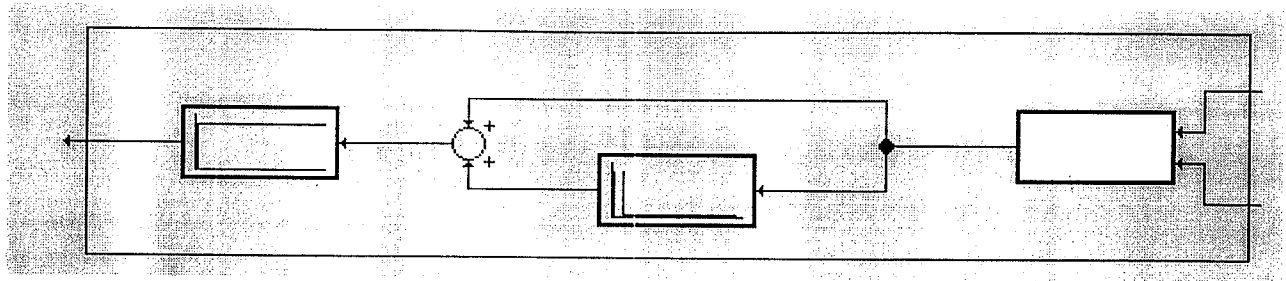
Wird die ansteigende Gerade des I-Anteils bis zum Schnittpunkt mit der Zeitachse verlängert, so schneidet sie dort ein "Zeitstück" ab, das als Nachstellzeit T_n bezeichnet wird.

Diese Größe wird auch anstelle des Parameters K_i als Einstellparameter des PI-Reglers verwendet.

Übertragungsbeiwert K_p :

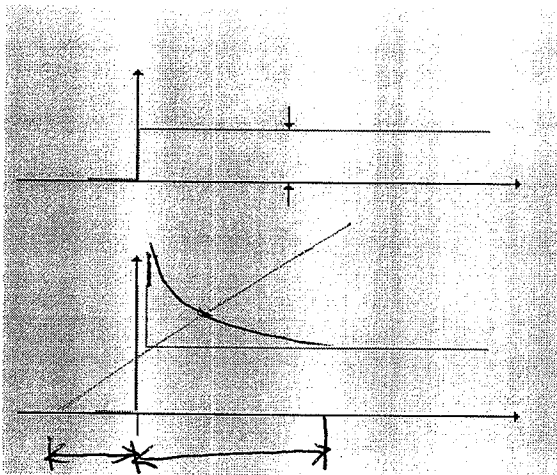
Der Übertragungsbeiwert K_p kann leicht aus der Sprungantwort ermittelt werden (siehe Bild oben).

Regler: Stetige Regler



PD-Regler:

Der PD-Regler besteht aus einem P-Regler mit zusätzlicher D-Aufschaltung. Durch den D-Anteil wird erreicht, dass bei einer schnellen Änderung der Regeldifferenz die Stellgröße gleich am Anfang für eine kurze Zeit kräftig verstellt wird.



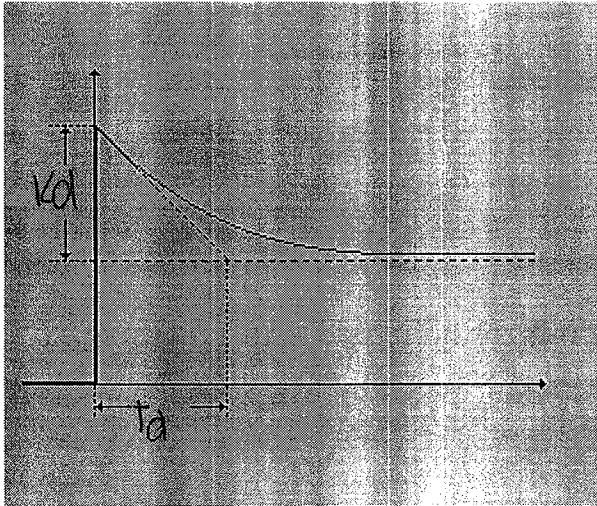
Sprungantwort:

Beim idealen PD-Regler ergibt sich als Sprungantwort eine Nadelfunktion.

Für den praktischen Einsatz muss der D-Anteil auf einen maximalen Wert begrenzt werden.

Regler: Stetige Regler

PD-Regler:



Verzögerungszeit Td:

Die Verzögerungszeitkonstante T_d des D-Anteils begrenzt und verzögert vor allem den Wert des D-Anteils. Sie kann damit als Verstellparameter des Reglers auch zur Beruhigung des Regelkreises verwendet werden.

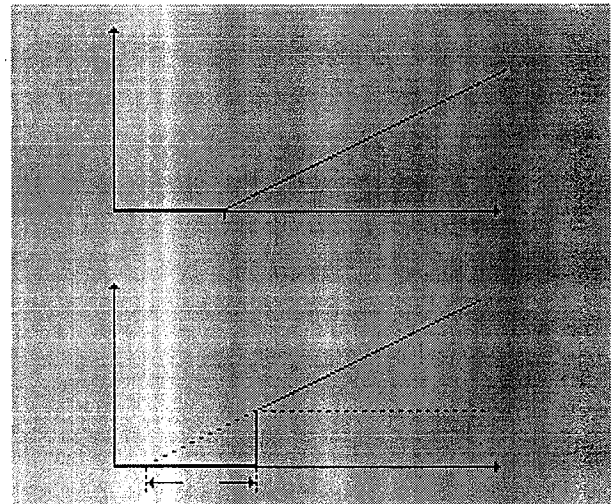
Vorhaltverstärkung Kd:

Als Vorhaltverstärkung K_d wird der Faktor $K_p \cdot T_v/T_d$ bezeichnet. Wird die Sprunghöhe mit K_d multipliziert, so ergibt sich die Höhe des D-Sprungs.

Vorhaltezeit Tv:

Betrachtet man die Anstiegsantwort, so stellt man fest, dass die Vorhaltezeit T_v einen Zeitwert angibt, der auf einen P-Regler bezogen ist.

Die Vorhaltezeit T_v gibt an, wie lange ein P-Regler bei konstanter Änderungsgeschwindigkeit braucht, um die gleiche Stellgrößenänderung zu bewirken, die ein PD-Regler infolge des D-Anteils sofort bewirkt.



Schlussfolgerung:

.....

.....

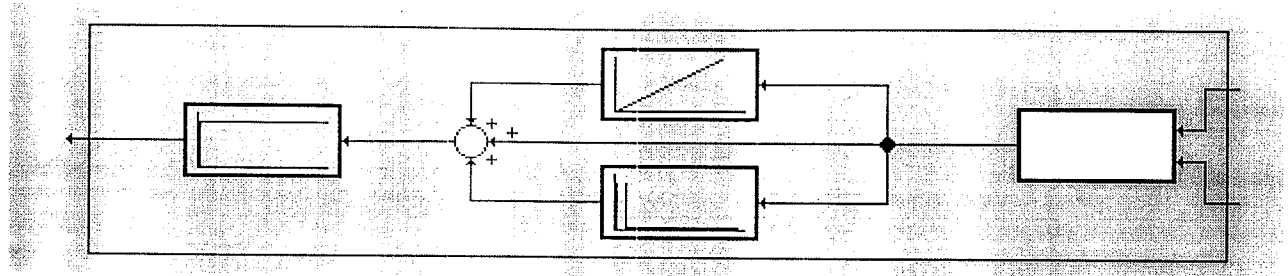
.....

.....

.....

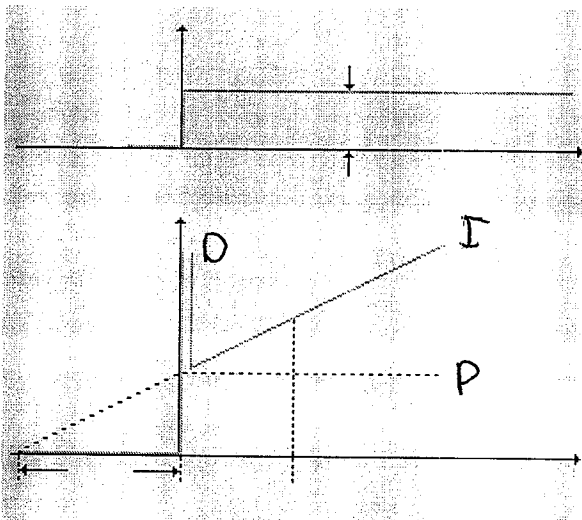
.....

Regler: Stetige Regler



PID-Regler:

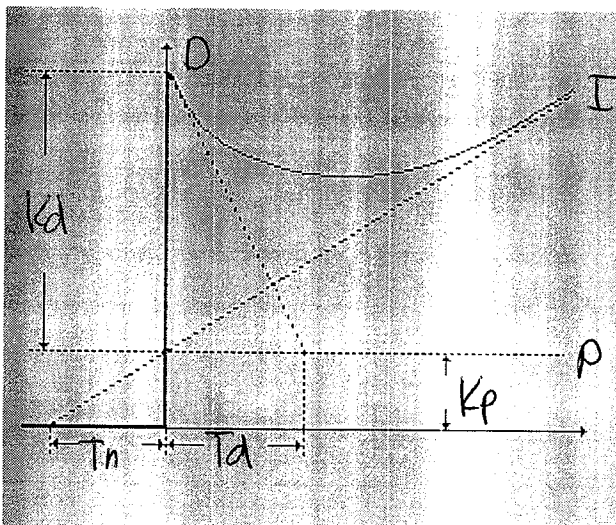
Werden P-, I- und D-Regler zu einem Regler zusammengefasst, so erhält man einen PID-Regler. PID-Regler entstehen durch Addition der P-, I- und D-Verhalten, die alle mit demselben Vergleicher arbeiten.



Sprungantwort:

Die Sprungantwort eines PID-Reglers ergibt sich aus der Überlagerung der Sprungantworten der einzelnen Regler.

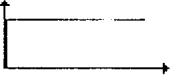
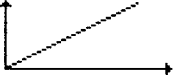
Die Abbildung zeigt die Übergangsfunktion eines idealen PID-Reglers.


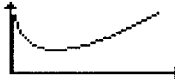


Die nebenstehende Abbildung zeigt die Übergangsfunktion eines realen PID-Reglers.

Regler: Stetige Regler

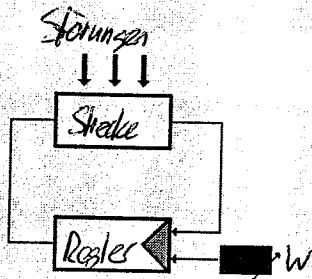
Zusammenfassung:

Reglertypen	P	I
Kennzeichn. Eigenschaften	Stellgrösse der Regelabw. proportional	Stellgrösse der Regel ab. und der Zeit proportional
Kenngrössen	K_p	K
Sprungantwort		
Vorteile	schnelle Reaktion	keine Regeldifferenz
Nachteile	bleibende Differenz	langsam

Reglertyp	PI	PID
Kennzeichn. Eigenschaft	Reagiert sofort auf Δe hält Stellgrösse y auch bei $e=0$	Reagiert bereits auf kleine Änderungen der Regeldifferenz
Kenngrössen	K_p, T_n	K_p, T_n, T_v
Sprungantwort		
Vorteile	keine bleibende Regelabweichung	- wie PI - etwas schneller
Nachteile	—	Einstellung "schwierig"

Regler: Regelkreise

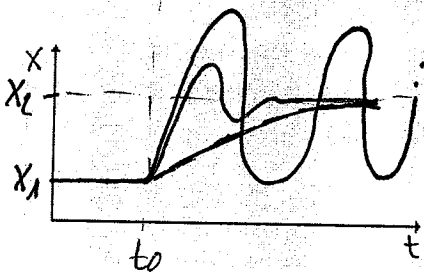
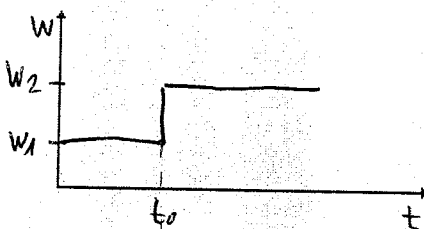
Führungs- und Störungsverhalten



Zur Untersuchung des Verhaltens eines geschlossenen Regelkreises wird die Sprungfunktion verwendet.

Um das Verhalten zu untersuchen, wird auf den eingestellten und eingeschwungenen Regelkreis ein Sollwertsprung oder ein Störgrössensprung geschaltet.

Führungsverhalten



Das Führungsverhalten wird mit einem Sprung des Sollwertes untersucht.

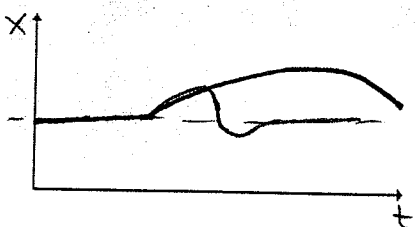
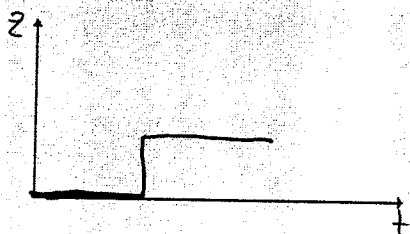
Steigt der Istwert nur sehr langsam an, so liegt ein schlechtes Führungsverhalten vor.

Starke Oszillationen der Regelgrösse müssen vermieden werden.

Gutes Führungsverhalten zeichnet sich durch einen möglichst schnellen Anstieg und durch geringes Überschwingen aus.

Bei manchen Anlagen ist jegliches Überschwingen verboten.

Störungsverhalten



Das Störungsverhalten ist schlecht, wenn Störungen gar nicht oder nur sehr langsam ausgeregelt werden.

Man spricht von einem guten Störungsverhalten, wenn auf die Strecke einwirkende Störungen schnell ausgeregelt werden.

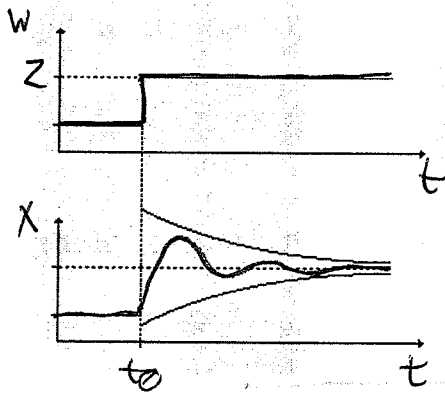
Im allgemeinen haben Regelkreise mit gutem Führungsverhalten auch ein gutes Störungsverhalten.

Regler: Regelkreise

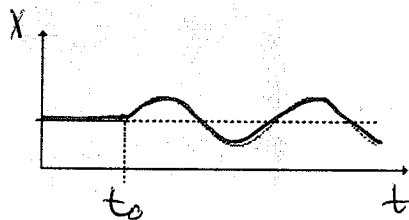
Stabilität einer Regelung

Eine sehr wichtige Eigenschaft eines Regelkreises ist dessen Stabilität.

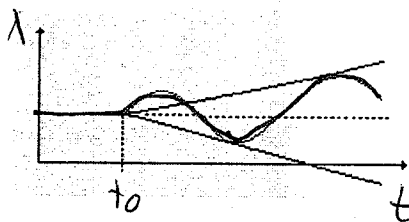
Zur Untersuchung des Stabilitätsverhaltens gibt es mehrere Methoden. Die meisten setzen jedoch höhere Mathematik voraus.



Regelkreis mit stabilem Verhalten:
Nach einer Störung oder einem Sprung der Führungsgröße kehrt der Regelkreis wieder den Beharrungszustand zurück.



Regelkreis an Stabilitätsgrenze:
Die Führungsgröße schwingt nach einer Störung oder Sprung des Sollwertes mit gleichbleibender Amplitude.



Bei instabilem Verhalten entsteht eine stark anwachsende Oszillation der Regelgröße.

Vorsicht: Dies kann zur Zerstörung der Anlage führen.

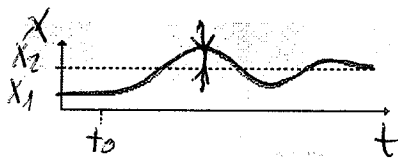
Regler: Regelkreise

Regelgüte

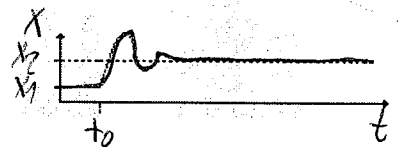
Für jeden Regelkreis gilt, dass dieser ein stabiles Verhalten haben soll. Wie jedoch dieses Ziel erreicht wird, z.B. sehr lange Zeit bis zum Endwert, dafür aber keine Überschinger oder anderes, wird von dem zu regelnden Prozess bestimmt.

Um das Verhalten eines Regelkreises bis zum Erreichen des Beharrungszustandes (Endwert) beschreiben zu können, benötigt man ein Gütekriterium.

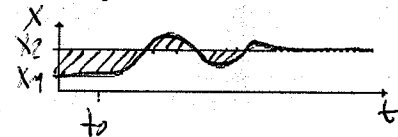
Gütekriterien sind:



Kleine Überschwingweite



Kurze Ausregelzeit

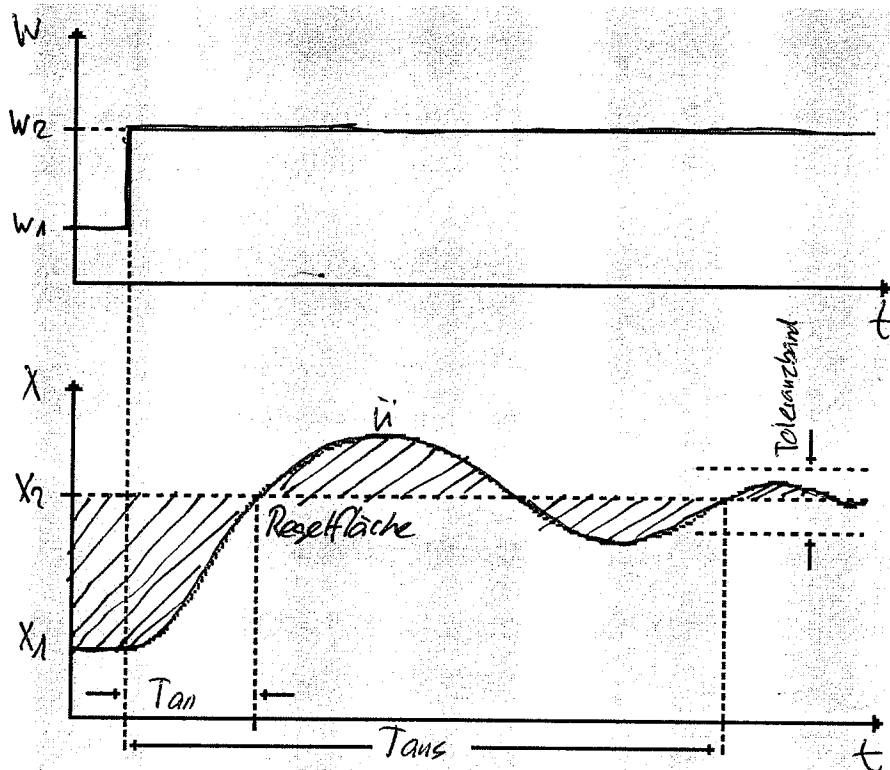


Minimale Regelfläche

Regler: Regelkreise

Regelgüte

Zur Bestimmung der Gütekriterien werden Parameter aus der Sprungantwort ermittelt.



Überschwingweite: Höhe des Überschwingens nach einem Stör- oder Führungsgrössensprung. Sie ist die höchste Amplitude X_{max} . (\dot{w})

An- und Ausregelzeit T_{an} und T_{aus} : Sie sind ein Mass für die Schnelligkeit der Regelung. T_{an} ist die Zeit vom Sprung (t_0), bis die Regelgrösse den Endwert w_2 erstmalig erreicht. T_{aus} ist die gesamte Zeit vom Sprung (t_0), bis sich die Regelgrösse innerhalb des Toleranzbandes bewegt.

Toleranzband: Ist ein vereinbarter Bereich, der in Prozent, z.B. $\pm 1\%$, vom Grenzwert der Führungsgrösse angegeben wird.

Regelfläche: Ist die Fläche, die beim Pendeln der Regelgrösse um den Endwert eingeschlossen wird.

Ein Zweipunktregler z.B regelt unstetig. Bei ihm hat die Stellgröße nur zwei Schaltzustände, $y = Y_h$ und $y = 0$. Ein Regler mit der Schaltdifferenz x_{sd} schaltet die Stellgröße y aus bzw.ein, wenn die Regelgröße x die Schaltpunkte x_o bzw. x_u erreicht (siehe Bild). Die Regelgröße x folgt der Stellgröße y in vielen Regelstrecken um die Verzugszeit T_u verspätet. Sie schwankt mit der Periodendauer T innerhalb der Schwankungsbreite ΔX um den Mittelwert \bar{x} (siehe Bild 1).

In Regelstrecken mit Ausgleich strebt die Regelgröße gegen Grenzwerte, z.B. in einer Heizung gegen die Beharrungstemperatur x_m bei $y = Y_h$ bzw. gegen die Umgebungstemperatur x_n bei $y = 0$. Die Verzugszeit T_u und die Ausgleichszeit T_g bestimmen die Regelbarkeit der Regelstrecke.

Regelbarkeit: $T_g/T_u > 10 \Rightarrow$ gut; $T_g/T_u < 3 \Rightarrow$ schlecht

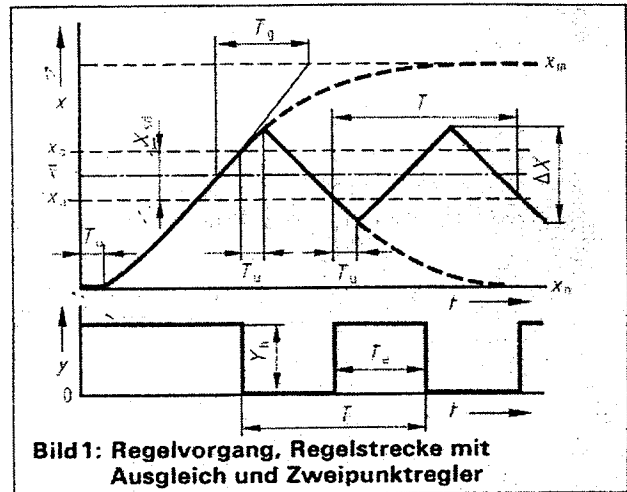


Bild 1: Regelvorgang, Regelstrecke mit Ausgleich und Zweipunktregler

1. Beispiel:

Für eine Heizung mit Zweipunktregler sind gegeben:
Verzugszeit $T_u = 1,0$ min, Ausgleichszeit $T_g = 10$ min,
Grenztemperaturen $x_n = 14^\circ\text{C}$ bei $y = 0$ und $x_m = 30^\circ\text{C}$
bei $Y_h = 10$ A, Schaltpunkte $x_o = 23^\circ\text{C}$ und $x_u = 21^\circ\text{C}$.
Gesucht sind für 100% Leistungsüberschuss

- der Übertragungsbeiwert K_s der Regelstrecke,
- die mittlere Temperatur \bar{x} ,
- die Schaltdifferenz x_{sd} ,
- der Sollwert x_s ,
- die Schwankungsbreite ΔX ,
- die Änderungsgeschwindigkeit v_x der Regelgröße,
- die Periodendauer T ,
- die Regelbarkeit und
- die Periodendauer T_o bei $x_{sd} = 0$.

2. Beispiel:

Ein elektrischer Backofen hat den Stellbereich $Y_h = 2,7$ kW, die Verzugszeit $T_u = 2,0$ min, die Ausgleichszeit $T_g = 23$ min. Bei der Umgebungstemperatur $x_n = 30^\circ\text{C}$ und dem Sollwert $x_s = 220^\circ\text{C}$ ist der Leistungsüberschuss $p_u = 100\%$. Die Schaltpunkte des Reglers liegen bei $x_o = 225^\circ\text{C}$ und $x_u = 215^\circ\text{C}$.

Ermitteln Sie: die gleichen Größen wie im 1. Beispiel von a) bis i).

Hinweis: Beim Leistungsüberschuss p_u und Übertragungsbeiwert K_s geht man vom unteren Grenzwert aus.

$$K_s = \frac{x_m - x_n}{Y_h} \quad \bar{x} = \frac{x_o + x_u}{2} \quad x_{sd} = x_o - x_u$$

Beim Leistungsüberschuss $p_u = 100\%$ gilt:

$$\bar{x} = \frac{x_m + x_n}{2} \Rightarrow x_s = \bar{x} \quad u = \frac{T}{T_e} = 2,0$$

$$\Delta X = x_{sd} + \frac{K_s \cdot Y_h}{T_g} \cdot T_u \quad K_s \cdot Y_h = x_m - x_n$$

$$T = 4 \cdot \left(\frac{x_{sd} \cdot T_g}{K_s \cdot Y_h} + T_u \right) \quad v_x = \frac{K_s \cdot Y_h}{2 \cdot T_g}$$

K_s	Übertragungsbeiwert der Regelstrecke
y	Stellgröße
Y_h	Stellbereich
x	Regelgröße, Istwert
x_s, \bar{x}	Sollwert der Regelgröße, Mittelwert
x_m	oberer Grenzwert, Beharrungswert
x_n	unterer Grenzwert, (Umgebungstemperatur)
x_o, x_u	Schaltpunkte des Reglers
x_{sd}	Schaltdifferenz des Reglers
ΔX	Schwankungsbreite der Regelgröße
v_x	Änderungsgeschwindigkeit der Regelgröße
T_g, T_u	Ausgleichszeit, Verzugszeit
T	Periodendauer
T_e	Einschaltdauer der Stellgröße
u	Tastverhältnis

3. Beispiel:

Ermitteln Sie mit Hilfe der untenstehenden Grafik:

- den Beiwert K_s ,
- die Schaltdifferenz x_{sd} ,
- die Periodendauer T beim Regelvorgang,
- den Leistungsüberschuss $p_{ü}$,
- die Verzugszeit T_v und die Ausgleichzeit T_g .
- Zeichnen Sie die $y(t)$ -Kurve (direkt und massstäblich unter die gegebene $x(t)$ -Kurve)!

Bild: Geregelte Temperatur in einem Heizelement bei $T_v = 0$ und $Y_h = 2,0 \text{ kW}$

