

## 2 Grundlagen

### 2.1 Regeln, Regelung

Vorgang im System, bei dem die Ausgangsgröße (die Regelgröße  $x$ ) fortlaufend erfasst (gemessen), mit einer vorgegebenen Führungsgröße  $w$  verglichen (Vergleichsstelle, Bildung der Regeldifferenz) und im Sinne eines Angleichs beider Größen beeinflusst wird (durch die Stellgröße  $y$ ).

Merkmale:

geschlossener Wirkungsablauf, d.h. geschlossener Wirkungsweg, bei dem die Regelgröße fortlaufend auf sich selbst wirkt (Rückkopplung, Selbstreferenz, geschlossener Kreislauf); die Wirkungen sind gerichtet (Ursache  $\Rightarrow$  Wirkung), die Systeme und Teilsysteme sind ständig betriebsbereit.

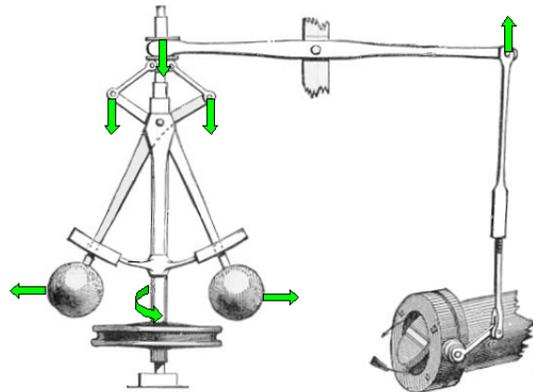


Abbildung 2-1 Fliehkraftregler von James Watt (1788)<sup>1</sup>

<sup>1</sup><http://de.wikipedia.org/wiki/Bild:Fliehkraftregler.PNG>

### Steuern / Regeln

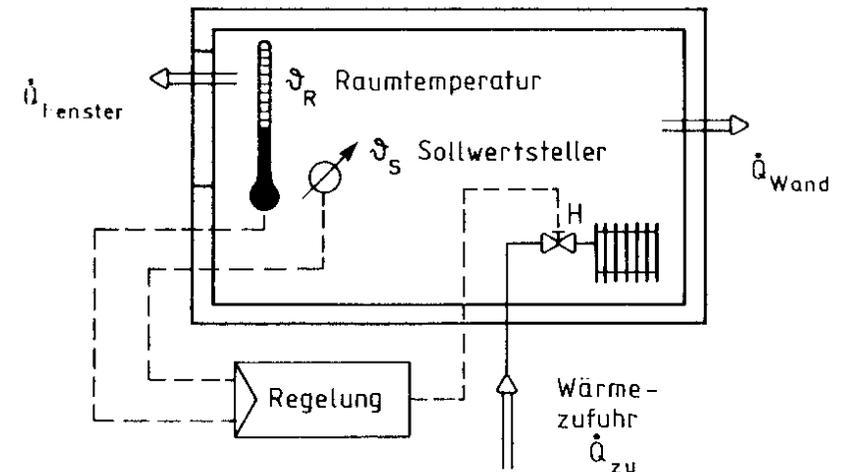
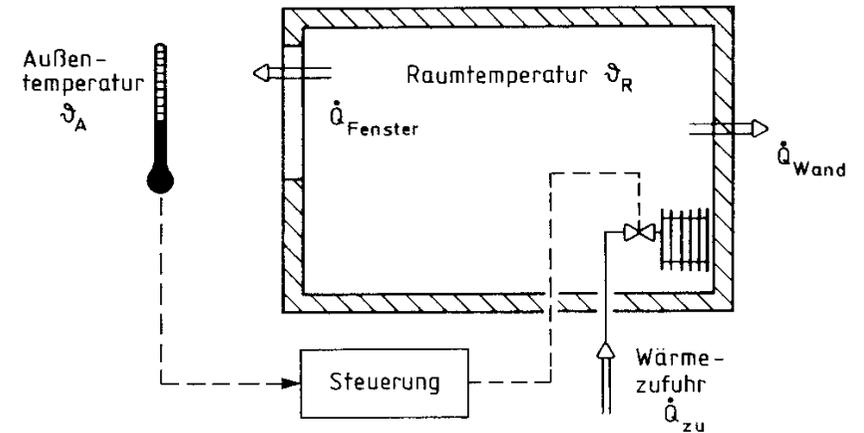


Abbildung 2-2 Steuerung (oben) / Regelung (unten) der Raumtemperatur<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Schneider, W.: Praktische Regelungstechnik; Wiesbaden: Vieweg, 2008

**Aufgaben:**

In einer Gasleitung soll die Gasmenge  $\dot{m}_G$  mit Hilfe eines Ventils dosiert und durch eine Düse in einen Behälter eingeblasen werden.

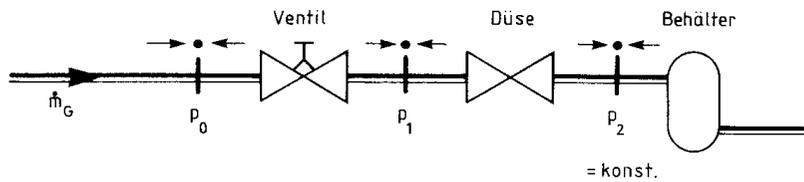


Abbildung 2-5 Gerätefließbild einer Rohrleitungsstrecke mit Armaturen<sup>1</sup>

- a) Es wird der Druck  $p_1$  hinter dem Ventil gemessen und mit einem Sollwert  $p_{1,Soll}$  verglichen. Bei Veränderung des Vordruckes  $p_0$  als Störgröße wird das (Regel-) Ventil so beeinflusst, dass der Störung entgegengewirkt wird.

**Lösung**

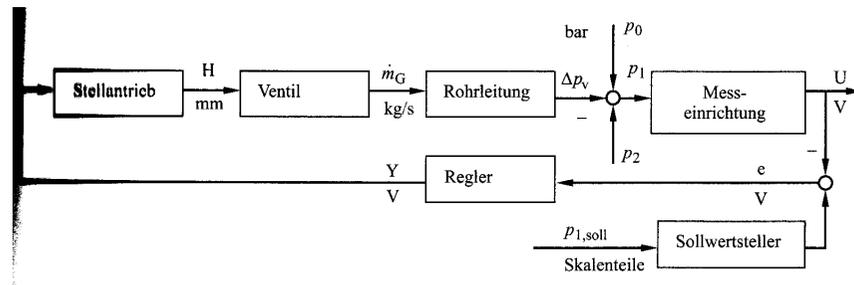


Abbildung 2-6 Wirkschluplan der Vordruckregelung<sup>2</sup>

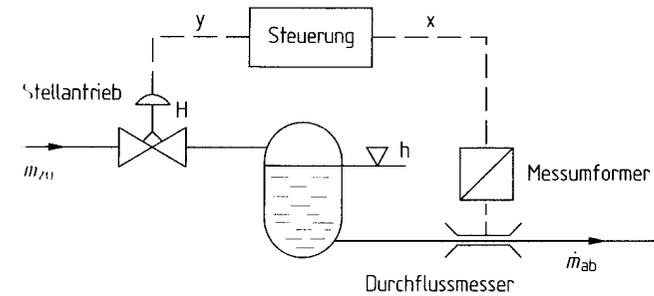
- b) Es wird der Druck  $p_0$  vor dem Ventil gemessen. Bei Abweichungen vom Sollwert  $p_{0,Soll}$  wird die Stellung des Ventils mit Hilfe einer Kennlinie so verändert, dass der Druck  $p_1$  konstant bleibt.

**Wirkschluplan zeichnen!**

<sup>1</sup>Schneider, W.: Praktische Regelungstechnik; Wiesbaden: Vieweg, 2008

<sup>2</sup>Schneider, W.: Praktische Regelungstechnik; Wiesbaden: Vieweg, 2008

In einer Trinkwasser-Versorgungsanlage soll der Wasserstand eines Vorratsbehälters durch ein Ventil im Zulauf konstant gehalten werden. Der Abfluss ist abhängig von der Entnahme der Verbraucher, kann also nicht beeinflusst werden.



- a) Der Wasserstand wird konstant gehalten, indem die Verbrauchsmenge  $\dot{m}_{ab}$  gemessen wird und das Ventil so eingestellt wird, dass immer der Massenstrom des Wassers  $\dot{m}_{zu} = \dot{m}_{ab}$  zugeführt wird.
- b) Der Wasserstand wird konstant gehalten, indem der aktuelle Wasserstand  $h$  gemessen und das Ventil so eingestellt wird, dass einer Änderung des Wasserstandes entgegengewirkt wird.

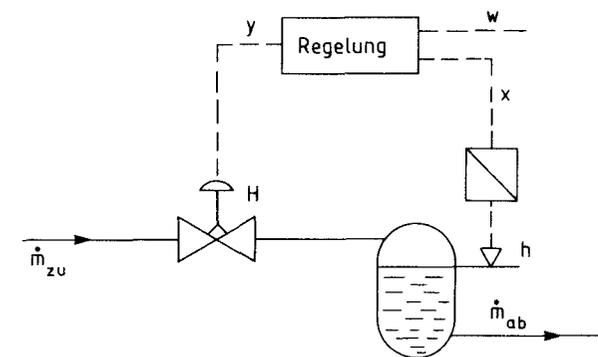
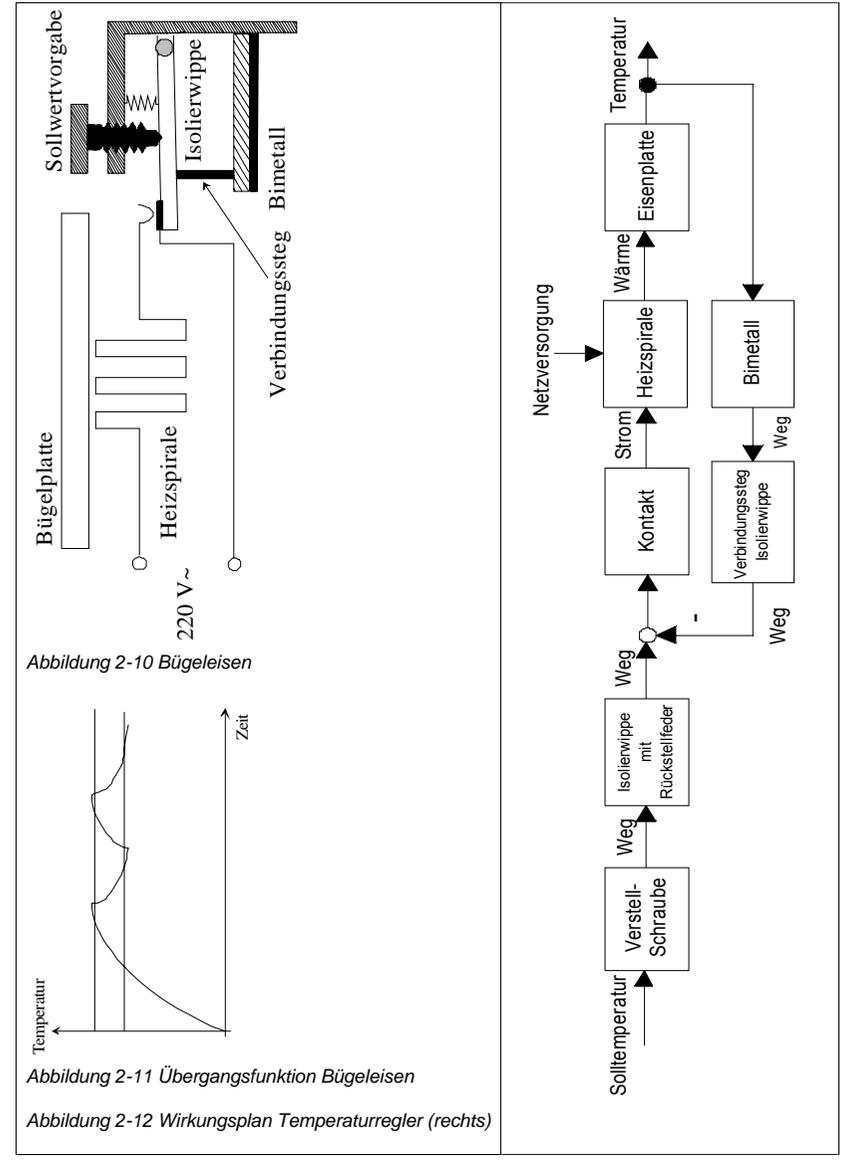
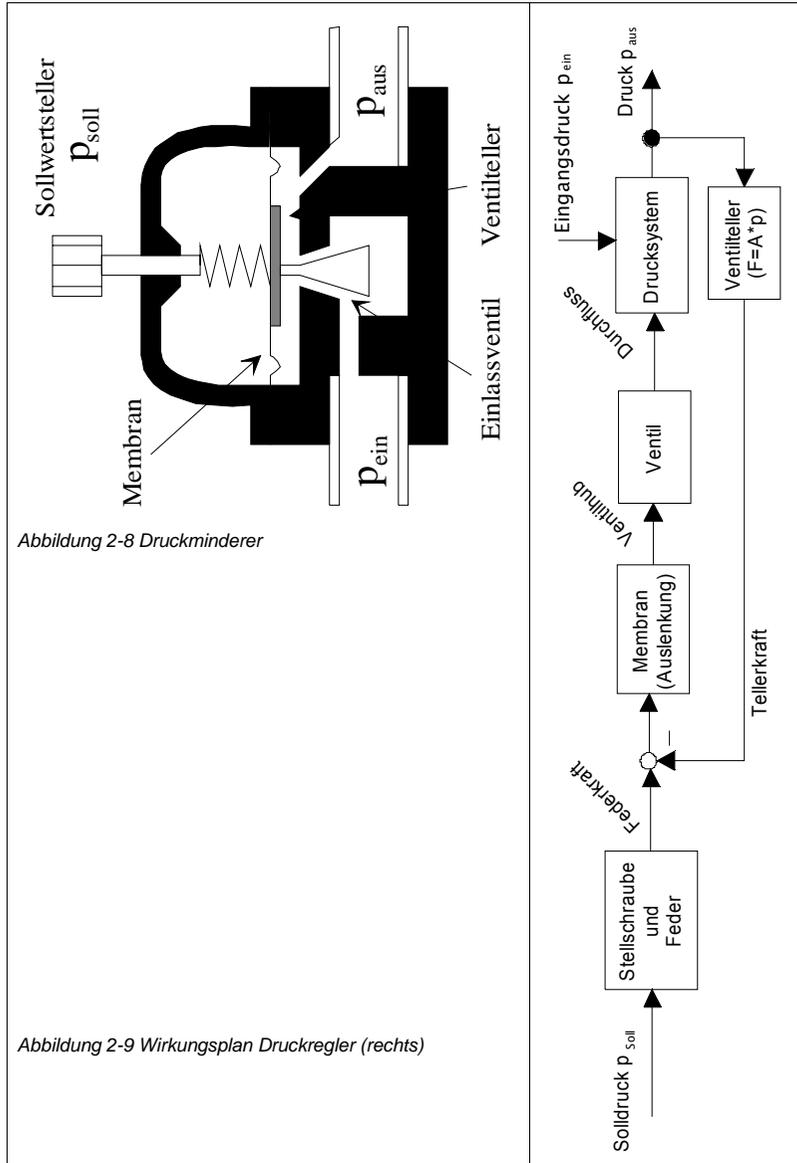


Abbildung 2-7 Wasserstand eines Behälters

**Wirkschlupläne zeichnen!**



## 2.2 Bestandteile eines Regelkreises

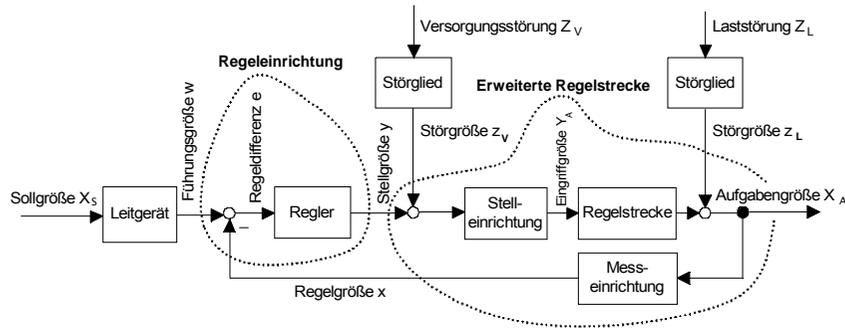


Abbildung 2-13 Allgemeiner Regelkreis<sup>1</sup>

### Definition: Regelstrecke

Die Regelstrecke ist derjenige Teil des Wirkungswegs, welcher den aufgabengemäß zu beeinflussenden Bereich der Anlage bzw. des Prozesses darstellt.

### Definition: Stelleinrichtung

Die Stelleinrichtung besteht aus Stellantrieb und Stellglied. Sie verbindet den Reglerausgang mit dem Eingang der Regelstrecke.

### Definition: Messeinrichtung

Die Messeinrichtung wandelt die Aufgabengröße der Regelstrecke in ein weiter verwertbares Signal innerhalb des Regelkreises, die Regelgröße, um.

### Definition: Erweiterte Regelstrecke

Die Regelstrecke bildet zusammen mit der Stell- und Messeinrichtung die erweiterte Regelstrecke.



Abbildung 2-14 Erweiterte Regelstrecke<sup>1</sup>

### Definition: Regeleinrichtung

Die Regeleinrichtung besteht aus demjenigen Teil des Wirkungswegs des Regelkreises, der die Beeinflussung der Regelstrecke zur Erfüllung der Regelungsaufgabe über die Stelleinrichtung bewirkt.

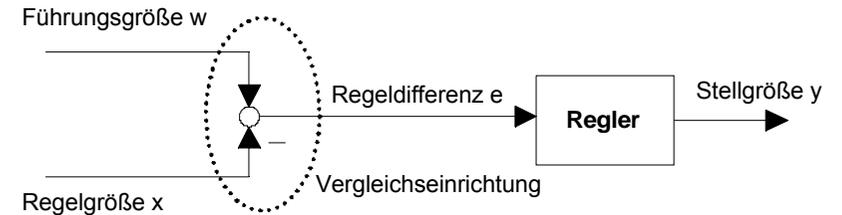


Abbildung 2-15 Regeleinrichtung<sup>2</sup>

### Definition: Vergleichseinrichtung

Die Vergleichseinrichtung bestimmt die Abweichung der Führungsgröße von der Regelgröße, welche als Regeldifferenz e dem Regler zur Weiterverarbeitung dient.

### Definition: Regler

Die prinzipielle Aufgabe eines Reglers besteht darin, eine ausgesuchte physikalische Größe (Aufgabengröße  $X_A$ ) auf einem vorgegebenen Sollwert (Sollgröße  $X_S$ ) zu bringen und dort zu halten.

### Definition: Leiteinrichtung bzw. Leitgerät

Das Leitgerät gibt der Regelung ein technisch verarbeitbares Signal als Führungsgröße vor. Es wandelt dazu entweder eine eingangsseitige

<sup>1</sup>Tröster, F.: Steuerungs- und Regelungstechnik für Ingenieure; München, Wien: Oldenbourg, 2005

<sup>1</sup>Tröster, F.: Steuerungs- und Regelungstechnik für Ingenieure; München, Wien: Oldenbourg, 2005

<sup>2</sup>Tröster, F.: Steuerungs- und Regelungstechnik für Ingenieure; München, Wien: Oldenbourg, 2005

Sollgröße in die Führungsgröße um oder stellt selbst direkt die Führungsgröße zur Verfügung.

Definition: Störeinrichtung bzw. Störglied

Ein Störglied beschreibt die Dynamik spezifischer externer Störeinflüsse auf den Regelkreis. Es wird vorwiegend bei der theoretischen Untersuchung von Regelungen benutzt.

Definition: Versorgungsstörungen

Unterliegt der zu automatisierende Prozess Störungen bei der Versorgung mit Energie und/oder Material, liegt eine Versorgungsstörung vor.

Definition: Laststörungen

Wird die Aufgabengröße einer Regelung von nachfolgenden technischen Prozessen direkt beeinflusst, liegen Laststörungen auf den Regelkreis vor.

**Ein Regelkreis kann nur Störungen beseitigen, welche zwischen Ein- und Ausgang der Regelstrecke eingreifen. Damit müssen Messstörungen und Störungen auf die Führungsgröße bzw. auf die Regeleinrichtung unter allen Umständen vermieden werden.**

Jede Regelung besitzt zwei Reaktionsarten auf äußere Einwirkungen:

Definition: Führungsverhalten

Das Führungsverhalten eines Regelkreises beschreibt die dynamische Auswirkung einer Veränderung der Führungsgröße auf die Aufgabengröße.

Definition: Störverhalten

Das Störverhalten eines Regelkreises gibt die dynamischen Auswirkungen von Versorgungs- und Laststörungen auf die Regelgröße an.

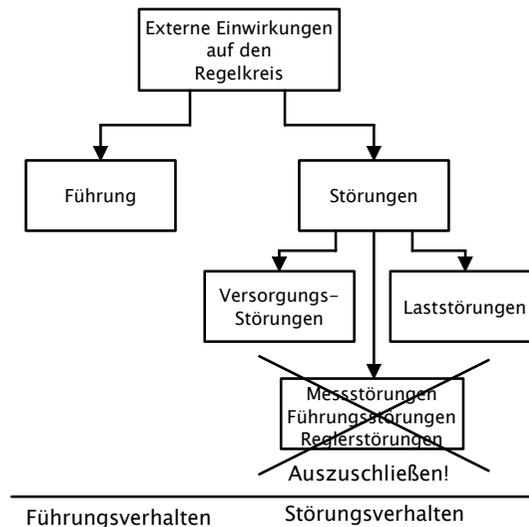


Abbildung 2-16 Regelkreisverhalten<sup>1</sup>

Bezeichnung wichtiger Größen eines Regelkreises:

Bez.	Benennung	Beschreibung
$X_A$	Aufgabengröße	Die zu regelnde Größe eines Prozesses.
$x$	Regelgröße	Normiertes Signal der Aufgabengröße zur Weiterleitung bzw. Rückkopplung über die Regeleinrichtung (Abweichung vom Arbeitspunkt).
$X_S$	Sollgröße	Vorgabewert, welche die Aufgabengröße annehmen soll.
$w$	Führungsgröße	Die Regelgröße $x$ soll der Führungsgröße $w$ unmittelbar folgen. Sie ist normiert und entspricht als Signalart der Regelgröße $x$ (Abweichung vom Arbeitspunkt).
$e$	Regeldifferenz $e = w - x$	Ausgangsgröße des Vergleichs von Führungs- und Regelgröße. Sie wirkt auf den Regler als normiertes Signal.

<sup>1</sup>Tröster, F.: Steuerungs- und Regelungstechnik für Ingenieure; München, Wien: Oldenbourg, 2005

Bez.	Benennung	Beschreibung
y	Stellgröße	Normierte Ausgangswirkung des Reglers auf die Regelstrecke über das Stellglied der Anlage (Abweichung vom Arbeitspunkt).
$Y_A$	Eingriffsgröße	Unmittelbar einwirkende Größe auf den zu regelnden Vorgang, mit welcher die Stelleinrichtung den Prozess der Regelstrecke beeinflusst.
Z	Störung	Störungen sind alle von außen wirkende Größen, soweit sie die beabsichtigte Beeinflussung einer Regelung beeinträchtigen.
Z Z <sub>V</sub> Z <sub>L</sub>	Störgröße allg. Versorgungsstörgröße Laststörgröße	Normierte Störsignale zur Beurteilung von Regelungen beim Entwurf (Abweichung vom Arbeitspunkt).

### 2.3 Standardregelkreis, Wirkungsplan

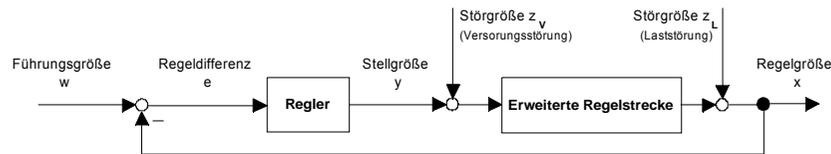


Abbildung 2-17 Standardregelkreis<sup>1</sup>

Normierung:

Berechnung mit dimensionslosen Größen durch Division durch einheitenbehaftete Bezugsgrößen:

- die Regelgröße auf den Messbereich  $X_M$
- die Stellgröße auf den Stellbereich  $Y_H$
- (die Störgröße ist speziell anzupassen: bei Versorgungsstörung auf den Stellbereich, bei Laststörungen auf den Regelbereich)

<sup>1</sup>Tröster, F.: Steuerungs- und Regelungstechnik für Ingenieure; München, Wien: Oldenbourg, 2005

$$x = \frac{X_A - X_0}{X_{\max} - X_0} \cdot 100\%$$

$X_A$  – Messwert,  $X_0$  – Nullpunkt,  $X_{\max}$  – Messbereichsendwert

Beispiel: Regelgröße = Strom  $I = 10 \text{ mA}$

Messbereich  $I_M = I_{\max} - I_0 = 20 \text{ mA} - 4 \text{ mA} = 16 \text{ mA}$

$$i = \frac{I_A - I_0}{I_{\max} - I_0} \cdot 100\% = \frac{10 \text{ mA} - 4 \text{ mA}}{20 \text{ mA} - 4 \text{ mA}} = 0,375$$

Typische analoge Einheitssignale:

relative Angabe	0-100 % (0-1)
eingeprägter Gleichstrom	4-20 mA (0-20 mA)
Gleichspannung	0-10 V
pneumatischer Druck	0,2-1 bar

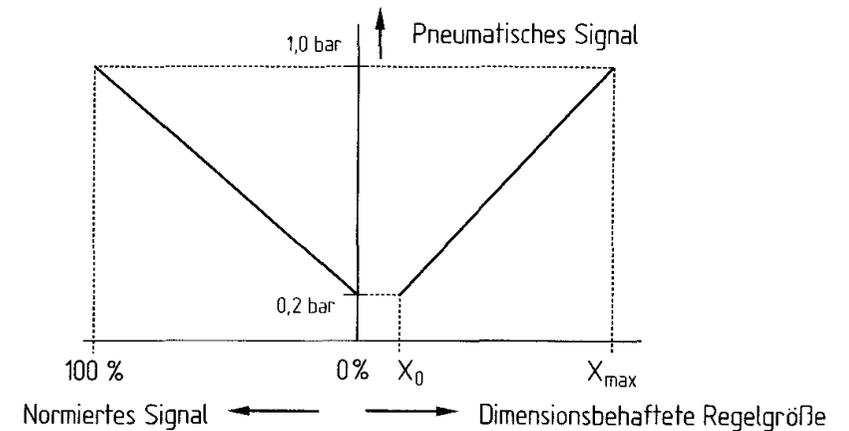


Abbildung 2-18 Kennlinie eines pneumatischen Messumformers

### Definition: Arbeitspunkt

Der Arbeitspunkt AP repräsentiert den Wert einer Prozessgröße, in dessen unmittelbarer Umgebung der Prozess betrieben wird.

$$X_1 = X_{AP} + \Delta x$$

$\Delta x$  – Änderung um den Arbeitspunkt  $X_{AP}$

Für regelungstechnische Betrachtungen ist nur die Änderung  $\Delta x$  und dessen Richtung bedeutend.

### Definition: Festwertregelung oder Störgrößenregelung

Bei der Festwertregelung oder Störgrößenregelung wird eine konstante Führungsgröße eingestellt. Der Regler hat die Aufgabe, die Regelgröße konstant auf dem Wert der Sollgröße zu halten.

### Definition: Zeitplanregelung (Programmregelung)

Wird die Führungsgröße nach einem Zeitplan verändert, spricht man von einer Zeitplan- oder Programmregelung.

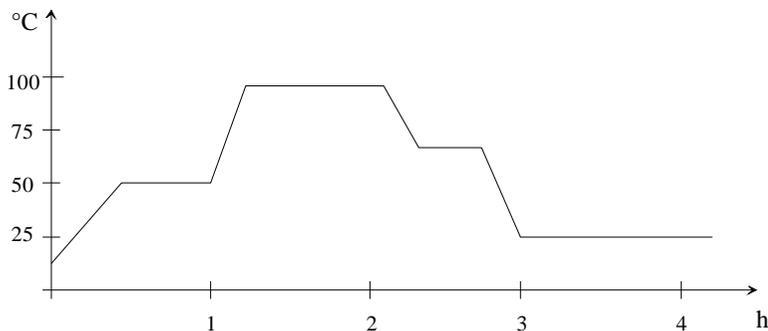


Abbildung 2-19 Zeitplan der Führungsgröße<sup>1</sup>

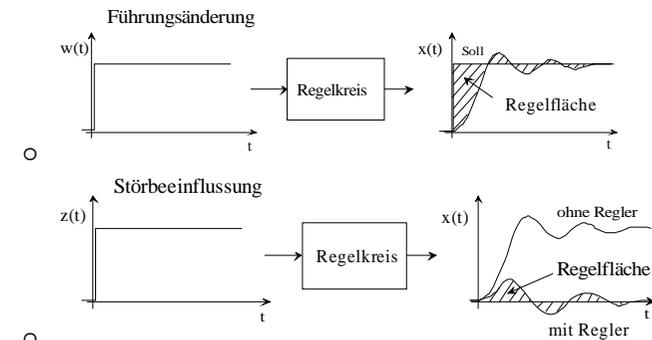
### Definition: Folgeregelung oder Nachlaufregelung

Ändert sich die Sollgröße (Führungsgröße) fortlaufend, liegt eine Folgeregelung bzw. Nachlaufregelung vor. Die Regelgröße hat dieser Führungsänderung optimal zu folgen.

<sup>1</sup>Tröster, F.: Steuerungs- und Regelungstechnik für Ingenieure; München, Wien: Oldenbourg, 2005

## 2.4 Anforderungen an eine Regelung

- Genauigkeit (Stationäre Regelgüte): Der Regler soll i. a. gewährleisten, dass die Regelgröße  $x(t)$  der Führungsgröße  $w(t)$  asymptotisch folgt. Die sogenannte bleibende Regeldifferenz hat zu verschwinden  $e(\infty) = \lim_{t \rightarrow \infty} (e(t)) = \lim_{t \rightarrow \infty} (w(t) - x(t)) = 0$
- Schnelligkeit (Dynamische Regelgüte): Bei einer Änderung der Führungsgröße  $w(t)$  wird erwartet, dass die Regelgröße  $x(t)$  unmittelbar folgt und nicht nur asymptotisch (nach langer Zeit). Die dynamische Regelgüte lässt sich geeignet mit Hilfe von Sprungsignalen darstellen:



- Stabilität: Ein Regelkreis hat immer stabil zu sein.
- Robustheit: Ein Regelkreis hat robust zu sein, d. h., der Regler muss auch auf Veränderungen der Regelstrecke während des Betriebs richtig reagieren.

Erfüllt eine Regelung die beiden letzten Forderungen, liegt ein Regelkreis mit robuster Stabilität vor.

### Zur Beachtung!

Ein Regelkreis kann nur Störungen beseitigen, welche zwischen Ein- und Ausgang der Regelstrecke eingreifen.

Damit müssen Messstörungen und Störungen auf die Führungsgröße bzw. auf die Regeleinrichtung unter allen Umständen vermieden werden.

## 2.5 Regelstrategien

- je größer die Regelabweichung, desto größer die Gegenreaktion

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

- je länger die Regelabweichung vorliegt, desto größer die Gegenreaktion

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

- je größer die Änderung der Regelabweichung, desto größer die Gegenreaktion

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

Beispiel zur Realisierung der Strategien: der PID-Regler

$$y(t) = K_{PR}e(t) + K_{IR} \int e(t) dt + K_{DR} \frac{de(t)}{dt}$$

## Detailierung und Checkliste Vorgehensmodell Reglerentwurf

### 1. Anforderungen und technische Randbedingungen klären

- Regelgröße festlegen mit: Messort, Messverfahren, Messbereich, Messgenauigkeit
- Aufgabe des Reglers: Festwertregler, Folgeregler, Verhältnisregler, ...
- Anforderung an die Genauigkeit der Regelung
- Auslegung der Sensorik und Aktorik kontrollieren oder durchführen
- Art und Umfang der Störungen, Messbarkeit der Störungen
- Stellbereich, maximale Stellenergie, Stellzeit
- Sicherheitstechnische Grenzwerte, Verkopplung mit anderen Systemen
- Wirksinn, Anfahrprozedur erforderlich
- Leistungsfähigkeit des Automatisierungsgerätes abschätzen
- Anforderungsszenarien und Testbedingungen definieren

### 2. Ziele des Reglerentwurfs definieren

- Führungsverhalten und/oder Störverhalten im Vordergrund?
- Bleibende Regelabweichung und Toleranzbereich
- An- und Ausregelzeit sowie Überschwingweite
- Regelgüte (Integralkriterien)
- Zeitoptimal oder energieoptimal?
- Entkopplung von Systemteilen erforderlich
- Testkriterien und Testfälle definieren

### 3. Modellbildung durchführen

Die Modellbildung wird in Abhängigkeit von den Randbedingungen und Zielen durchgeführt. Innerhalb der Phase 3 kann die Modellbildung theoretisch oder auf Basis einer Modellanlage erfolgen.

- Ermittlung der statischen Kennlinie
- P-T<sub>1</sub>, P-T<sub>2</sub> oder P-T<sub>n</sub>
- P-T<sub>x</sub> mit Totzeit oder integral wirkende Strecke

- $G(s)$  allgemeine Übertragungsfunktion (stabil / instabil)
- Mehrgrößensystem
- Stark nicht lineare Strecke
- Testfälle definieren

#### 4. Reglerstruktur festlegen und Reglerparameter bestimmen

Auswahl des Reglertyps bzw. Reglerstruktur in Abhängigkeit von 1 ...3:

- P-Regler, PI-Regler, PD- $T_1$ -Regler oder PID- $T_1$ -Regler
- Kaskadenregler
- Regler in der Rückführung
- Regler mit Störgrößenaufschaltung
- Entkopplungsstruktur
- Entwurfsverfahren auf Grundlage des Frequenzbereichs oder Übertragungsfunktion
- Entwurfsverfahren auf Grundlage der Zustandsraumbeschreibung
- Mehrzielige simulationsbasierte Optimierung
- Auswahl des Automatisierungsgerätes
- Auswahl des Bussystems
- Testfälle Reglerfunktion definieren

#### 5. Realisierung

- Erstellung der EMSR-Stellenpläne und Blätter
- Bestellung der Komponenten, die Überwachung von Lieferung und Montage
- Konfiguration oder Programmierung des Reglers, inklusive aller Steuer- und Bedienfunktionen
- Inbetriebnahme

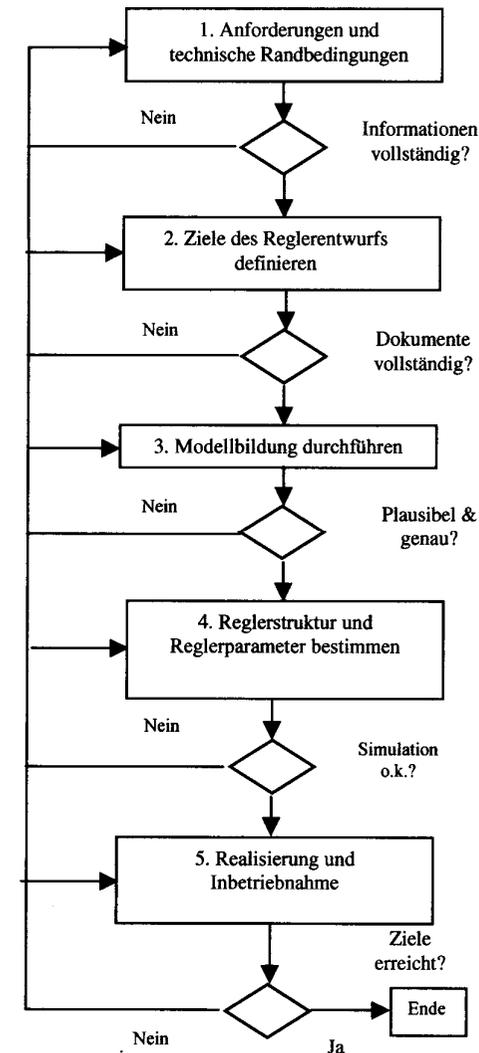
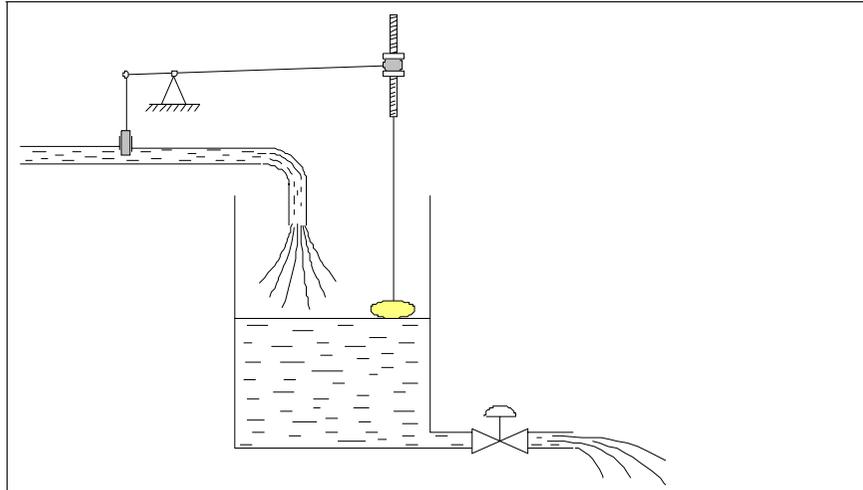


Abbildung 2-20 Vorgehensmodell Reglerentwurf<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Tröster, F.: Steuerungs- und Regelungstechnik für Ingenieure; München, Wien: Oldenbourg, 2005

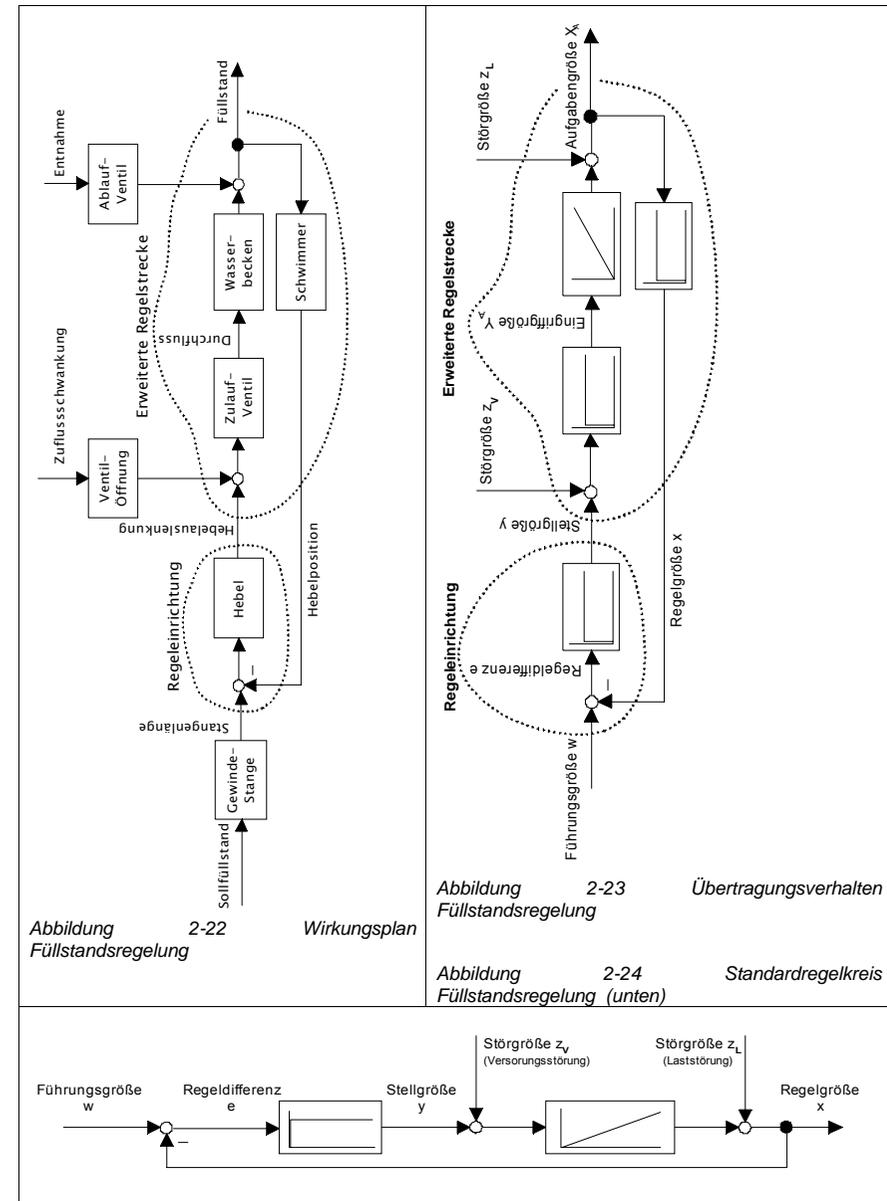
## 2.6 Beispiele für technische Regelkreise



Bezeichnung	Benennung	Beschreibung
$X_A$	Aufgabengröße	Füllstand im Behälter
$x$	Regelgröße	Hebelstellung
$X_S$	Sollgröße	Gewünschter Füllstand
$w$	Führungsgröße	Stangenlänge des Schwimmers
$e = w - x$	Regeldifferenz	Effektive Hebelstellung
$y$	Stellgröße	Hebelauslenkung
$Y_A$	Eingriffsgröße	Durchfluss
$Z_V$	Versorgungsstörung	Druckschwankung in der Versorgungsleitung
$Z_L$	Laststörung	Wasserentnahme

Abbildung 2-21 Füllstandsregelung<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Tröster, F.: Steuerungs- und Regelungstechnik für Ingenieure; München, Wien: Oldenbourg, 2005



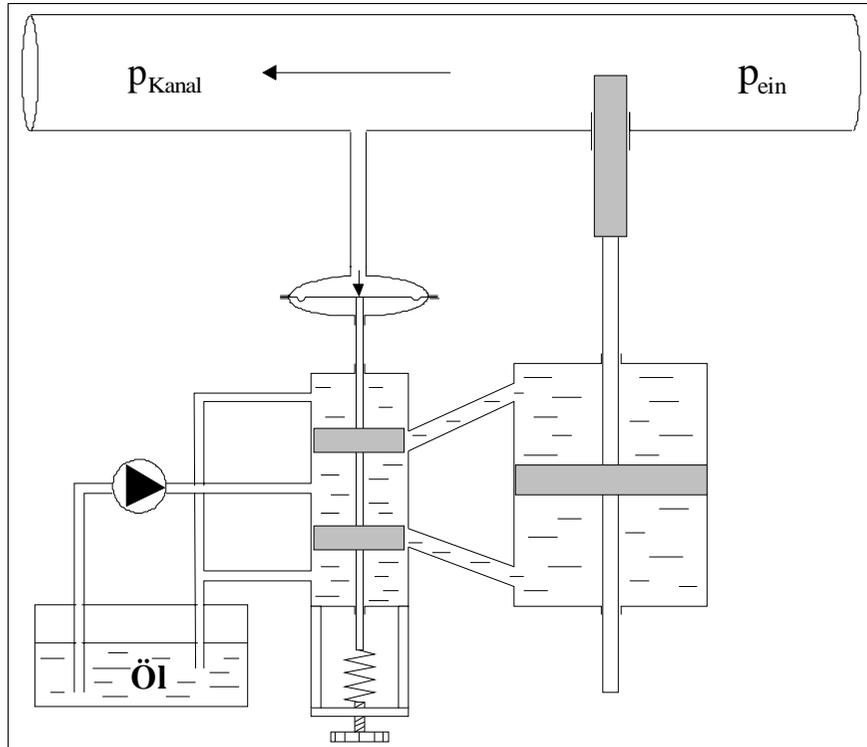


Abbildung 2-25 Druckregelung

Bezeichnung	Benennung	Beschreibung
$X_A$	Aufgabengröße	Druck im Strömungskanal
$x$	Regelgröße	Membrankraft
$X_S$	Sollgröße	Gewünschter Kanaldruck
$w$	Führungsgröße	Federkraft
$e = w - x$	Regeldifferenz	Effektive Membranauslenkung
$y$	Stellgröße	Auslenkung des Stellkolbens
$Y_A$	Eingriffsgröße	Mediendurchfluss
$Z_V$	Versorgungsstörung	Druckschwankungen der Versorgungsseite
$Z_L$	Laststörung	Gasabnahme des Verbrauchers

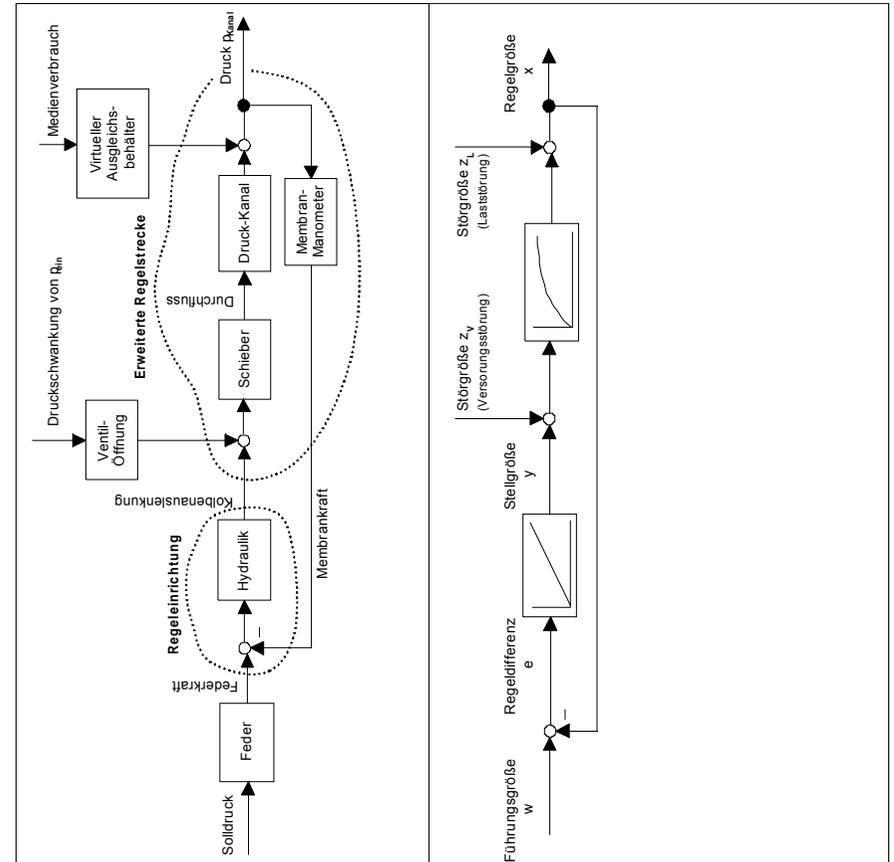


Abbildung 2-26 Wirkungsplan Druckregelung

Abbildung 2-27 Standardregelkreis Druckregelung

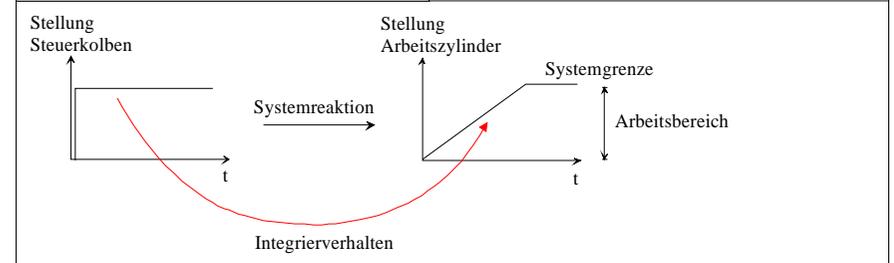


Abbildung 2-28 Übergangsfunktion Hydraulikregler

## 2.7 Beschreibung dynamischer Systeme im Zeitbereich

### 2.7.1 Fundamentalgleichung der Regelungstechnik

Die grundsätzliche Art der mathematischen Darstellung des Zeitverhaltens eines regelungstechnischen Systems ist:

$$v(t) = f(u(t), w(t), z_i(t), \dots)$$

$v(t)$  Ausgangsgröße des betrachteten Systems

$u(t)$  Eingangsgröße des betrachteten Systems

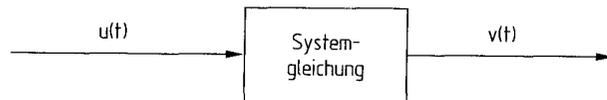
$w(t)$  Führungsgröße

$z_i(t)$  Störgrößen

Die funktionelle Abhängigkeit zwischen Eingang- und Ausgangsgröße kann durch die Fundamentalgleichung der Regelungstechnik beschrieben werden.

$$a_n \cdot v^{(n)} + \dots + a_2 \cdot v'' + a_1 \cdot \dot{v} + a_0 \cdot v = b_0 \cdot u + b_1 \cdot \dot{u} + b_2 \cdot \ddot{u} + \dots + b_m \cdot u^{(m)}$$

mit  $m \leq n$



Die linke Seite der Fundamentalgleichung beschreibt das dem System eigene Verhalten,

die rechte Seite beschreibt die Einwirkungen auf das System von außen.

„n“ wird die Ordnung der Differentialgleichung genannt. Die Ordnung entspricht physikalisch der Anzahl der System internen Speicher, z.B. Massenspeicher, Energiespeicher, ...

Lösung der Differentialgleichung

Sind die Eingangsgröße  $u(t=0)$  und die weiteren Anfangsbedingungen  $v(0^-)$ ,  $\dot{v}(0^-)$ ,  $\ddot{v}(0^-)$  bekannt, kann die Differentialgleichung gelöst werden.

$0^-$  bedeutet für kleine Zeiten  $t \rightarrow 0$ , aber  $t < 0$ .

$0^+$  bedeutet  $t \rightarrow 0$ , aber  $t > 0$ .

Zunächst wird nur die linke Seite betrachtet, genannt homogene Gleichung oder Eigendynamik des Systems. Durch den Ansatz

$v_h(t) = C \cdot e^{\alpha t}$  ergibt sich die charakteristische Gleichung des Systems.

$$a_n \cdot v^{(n)} + \dots + a_2 \cdot v'' + a_1 \cdot \dot{v} + a_0 \cdot v = 0$$

Sind die n Lösungen  $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n$  reell und voneinander verschieden, ergibt sich die homogene Lösung:

$$v_h(t) = C_1 \cdot e^{\alpha_1 t} + C_2 \cdot e^{\alpha_2 t} + \dots + C_n \cdot e^{\alpha_n t}$$

Die Integrationskonstanten  $C_i$  werden aus den Anfangsbedingungen bestimmt.

Treten komplexe Lösungen der charakteristischen Gleichung auf, so müssen die Lösungen  $\alpha_i$  paarweise konjugiert komplex sein. Für 2 konjugiert komplexe Lösungen ergibt sich aus dem Ansatz

$$v_h(t) = e^{\delta_1 t} \cdot [C_{11} \cdot e^{j\omega t} + C_{12} \cdot e^{-j\omega t}]$$

die Lösung für einen Eingangsprung

$$v_h(t) = A \cdot e^{\delta_1 t} \cdot \sin(\omega t + \varphi)$$

$$A = \frac{1}{\sqrt{1-D^2}} \quad \text{ist die Schwingungsamplitude}$$

$$\delta_1 = \frac{D}{T_0} \quad \text{ist die Abklingkonstante der Schwingung}$$

$$\varphi = \arctan \frac{\sqrt{1-D^2}}{D} \quad \text{ist die Phasenverschiebung der Schwingung}$$

Die Gesamtlösung entspricht der Addition aus homogener Lösung und partikulärer Lösung  $v(t) = v_h(t) + v_p(t)$

Dabei sind in der partikulären Lösung die Eingangsgrößen  $u(t)$  verarbeitet, die bei der homogenen Lösung noch nicht verwendet wurden.

**Aufgabe:** Feder-Dämpfungs-System (eines masselos gedachten Fahrzeugs)

Stoßdämpfer sollen die durch starke Bodenunebenheiten entstehenden Federschwingungen zwischen Fahrzeugaufbau und Radaufhängung dämpfen. Ein Kolben wird in einem Zylinder bewegt und verdrängt Öl durch enge Bohrungen.

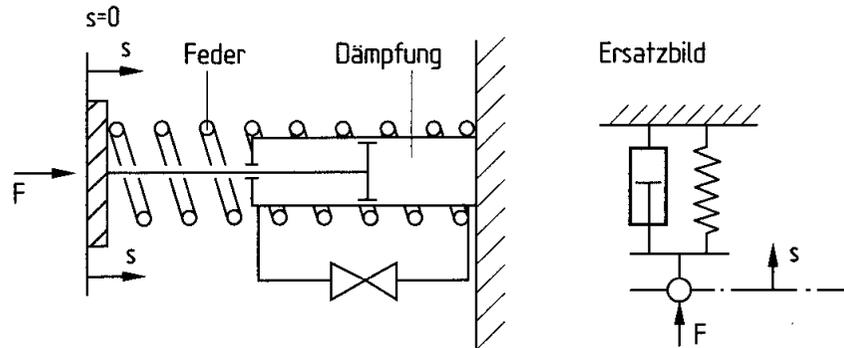


Abbildung 2-29 Gerätetechnische Darstellung einer Fahrzeugfederung mit Ersatzschaltbild<sup>1</sup>

Bewegt sich der Kolben nach rechts (Einfedern) so wird das Öl in die linke Kammer gepresst; bewegt sich der Kolben nach links (Ausfedern), so strömt das Öl in die rechte Kammer zurück. Damit das System bei einer bleibenden Kraft  $F_0$  nicht gegen den Anschlag gedrückt wird, ist zusätzlich eine Feder notwendig, die diese Kraft aufnimmt.

- Stellen Sie die Differenzialgleichung des Modells auf
- Geben Sie die Lösung der Differenzialgleichung in einer Formel an
- Stellen Sie den Zeitverlauf des Modells auf für

Federkonstante  $c = 6 \cdot 10^4 \text{ N/m}$

Dämpfungskonstante  $d = 1,2 \cdot 10^5 \text{ Ns/m}$

Anfangsauslenkung  $v_0 = 0 \text{ m}$

externe Kraftänderung  $u_0 = 1,2 \cdot 10^3 \text{ N}$

<sup>1</sup>Schneider, W.: Praktische Regelungstechnik; Wiesbaden: Vieweg, 2008

## 2.8 Wirkungsplan

- Gerätemäßige Betrachtung: (Membran, Klappe, Ventil, ...)
- Funktionale Betrachtung: (Regler, Messeinrichtung, ...)
- **Hier: wirkungsmäßige Betrachtung**

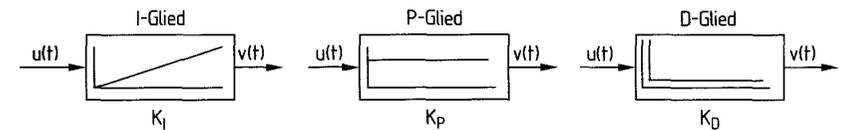


Abbildung 2-32 Elementare Zeitverhalten oder Übertragungsverhalten, dargestellt als Sprungantwort

**I-Verhalten**  $a_1 \cdot \dot{v} = b_0 \cdot u(t)$  oder  $\dot{v} = \frac{b_0}{a_1} \cdot u(t) = K_I \cdot u(t)$

**P-Verhalten**  $a_0 \cdot v(t) = b_0 \cdot u(t)$  oder  $v(t) = \frac{b_0}{a_0} \cdot u(t) = K_P \cdot u(t)$

**D-Verhalten**  $a_0 \cdot v(t) = b_1 \cdot \dot{u}$  oder  $v(t) = \frac{b_1}{a_0} \cdot \dot{u} = K_D \cdot \dot{u}$

Kopplungen:

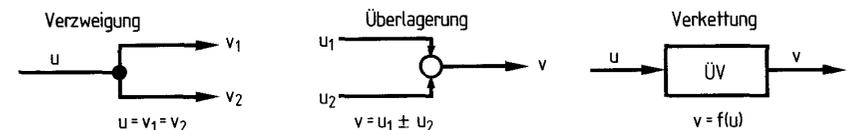


Abbildung 2-33 Elementare Kopplungen

Grundschaltungen:

- Reihenschaltung
- Parallelschaltung
- Kreisschaltung

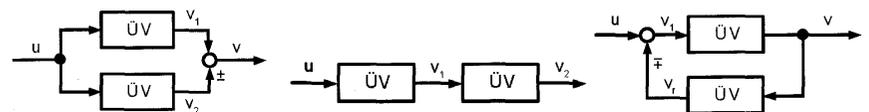


Abbildung 2-34 Grundschaltungen des Wirkungsplans, ÜV = Übertragungsverhalten

## 2.9 Zusammengesetztes Zeitverhalten

### 2.9.1 Kreisschaltung

Aufgabe: Druckluftspeicher mit Rückwirkung

Ein Druckluftspeicher wird von einem geregelten Kompressor mit Druckluft versorgt. Der Vordruck vor dem Zuflussventil wird auf  $p_0 = 4$  bar konstant gehalten.

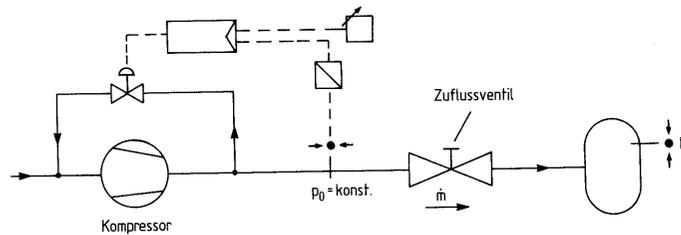


Abbildung 2-38 Druckluftspeicher (Ladevorgang)<sup>1</sup>

Folgende Parameter sind gegeben bzw. durch Messung bestimmt worden:

Behältervolumen  $V_B = 10 \text{ m}^3$

Gaskonstante für Luft  $R_L = 287 \frac{\text{J}}{\text{kgK}}$

Temperatur Luft  $\vartheta_L = 20 \text{ °C}$ ,  $T_L = 293,15 \text{ K}$

Proportionalbeiwert des Zuflussventils für kleine Änderungen:

$$K_{pV} = 1,189 \frac{\text{kg}}{\text{s} \cdot \text{bar}}$$

Hinweise: Für die Füllung des Speichers mit Luft (ideales Gas) gilt die Gasgleichung:  $p \cdot V = m \cdot R_L \cdot T_L$

<sup>1</sup>Schneider, W.: Praktische Regelungstechnik; Wiesbaden: Vieweg, 2008

Zeitvariable Größen: Druck  $p$ ; Durchsatz  $Q$  bzw. Massestrom  $\dot{m}$  zum Speicher

→  $u(t) = p_0$  und  $v(t) = p$  im Behälter

- Stellen Sie die Differentialgleichung des Druckluftspeicher und des Zuflussventils auf
- Welche Form hat die Differentialgleichung des Druckluftspeichers mit Ventil?
- Diskussion des Zeitverhaltens für einen Eingangsgrößensprung (Sprungantwort)

### 2.9.2 Reihenschaltung

Die in der Praxis häufigste regelungstechnische Schaltung ist die Reihenschaltung von Geräten. Ein einfaches Beispiel dazu ist die Messkette, eine Reihenschaltung von Sensor, Messumformer und Messwertanzeige. Aber auch physikalisch findet man diese Reihenschaltung als Kaskade von Speichern für Luft, Wasser oder sonstigem Fließgut.

#### Aufgabe Reihenschaltung einer Druckluftspeicherkaskade

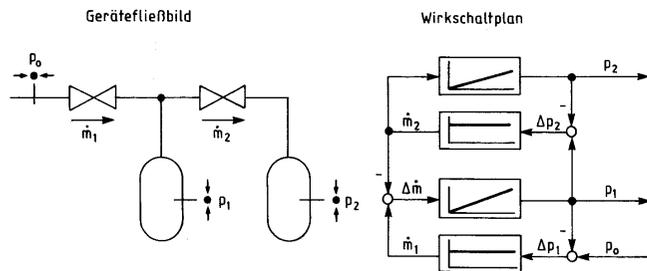


Abbildung 2-41 Gerätefließbild und Wirkschaltplan einer Druckluftspeicherkaskade<sup>1</sup>

Es sei eine Druckluftspeicherkaskade gezeichnet, bei der zwei Druckluftspeicher in Reihe geschaltet werden. Der Druck aus dem 1. Speicher wird mit dem Index A, aus dem 2. Speicher mit dem Index B gekennzeichnet.

Offensichtlich gibt es eine Rückwirkung von  $\dot{m}_2$  auf  $\Delta \dot{m}_1$ , der auf  $p_1$  wirkt

- a) Stellen Sie die Differentialgleichung der Reihenschaltung auf
- b) Diskussion des Zeitverhaltens für einen Eingangsgrößenprung: (Sprungantwort)

<sup>1</sup>Schneider, W.: Praktische Regelungstechnik; Wiesbaden: Vieweg, 2008

### 2.9.3 Parallelschaltung

Das wichtigste Beispiel in der Regelungstechnik für die Parallelschaltung ist der PID-Regler. Aber auch bei regelungstechnischen Modellen findet man häufig eine Parallelschaltung von Wirkungen.

#### Aufgabe Parallelschaltung am Beispiel eines Tendenz-Thermometers

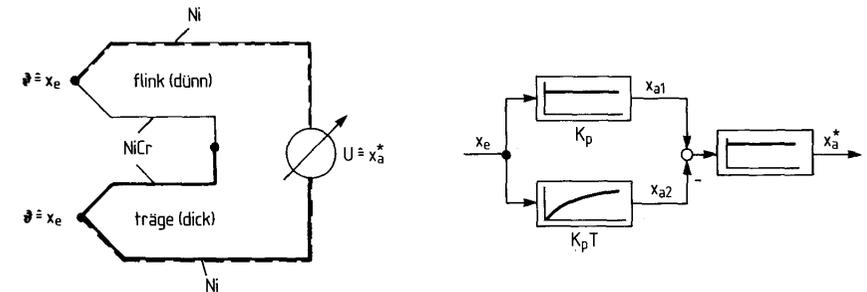


Abbildung 2-43 Geräteschaltung und Wirkschaltplan eines Tendenz-Thermoelements<sup>1</sup>

Tendenz - Thermoelemente werden eingesetzt, um steigende oder fallende Temperaturen anzuzeigen. Bei konstanter Temperatur ist die Anzeige Null. Wenn kleine Abweichungen der Temperatur von einem Beharrungswert (Sollwert) schnell ein deutliches Signal erzeugen sollen, schaltet man ein flink (P-Verhalten) und ein träge reagierendes (P-T<sub>1</sub>-Verhalten), sonst gleiches Thermoelement gegeneinander.

- a) Stellen Sie die Differentialgleichung des Thermoelements auf.
- b) Diskussion des Zeitverhaltens für einen Eingangssprung

<sup>1</sup>Schneider, W.: Praktische Regelungstechnik; Wiesbaden: Vieweg, 2008