

# 1 Regelkreis

Regelungen bilden – im Unterschied zu Steuerungen – einen geschlossenen Wirkungskreis. Dazu muss eine Rückführgröße (r) auf den Reglereingang geführt werden.

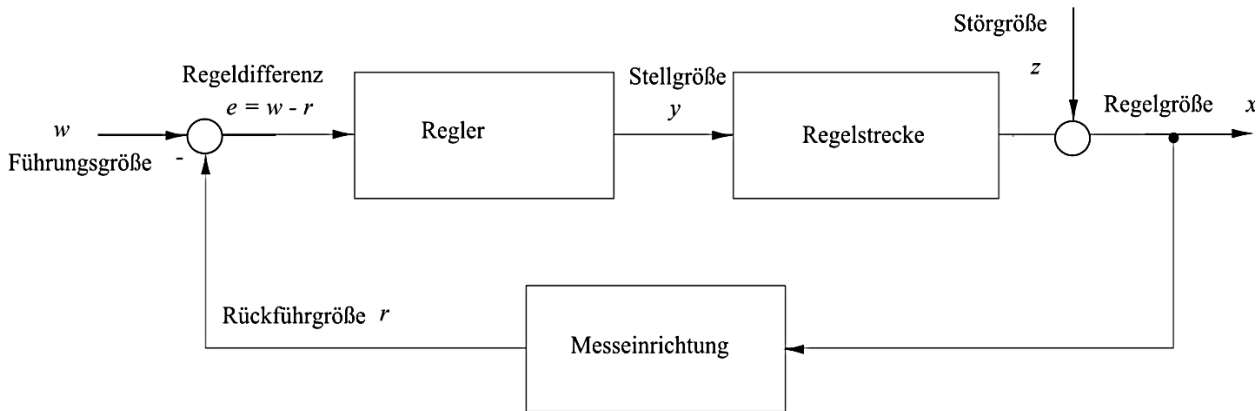


Abb. 1: Regelkreis

Prinzipiell besteht ein Regelkreis aus Regeleinrichtung und Regelstrecke, dazu kommen Stell-einrichtung und Messeinrichtung.

Die Regelgröße (x bzw. r) gelangt zu einem Vergleicher, wo aus Führungsgröße (w) und Rück-führgröße (r) die *Regeldifferenz* ( $x_d = w - r$ ) erzeugt wird. Gelegentlich wird mit der *Regelab-weichung* ( $x_w = r - w$ ) gearbeitet. Der Regler bildet daraus ein Stellsignal (y), das auf die Regel-strecke einwirkt. Damit ist der Regelkreis geschlossen.

# 2 Regelstrecke

Abhängig von ihrer Beschaffenheit werden Regelstrecken aufgrund ihres zeitlichen Verhaltens benannt.

## 2.1 Regelstrecke mit proportionalem Verhalten

Ist die Verzögerung zwischen Stell- und Regelgröße vernachlässigbar klein, spricht man von einer P-Strecke.

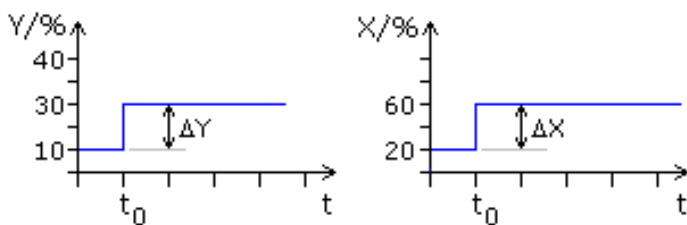


Abb. 2: Charakteristik der P-Regelstrecke

Die Regelgröße (X) ändert sich pro-  
portional mit der Stellgröße (Y).

Übertragungsbeiwert der  
Regelstrecke:

$$K_S = \frac{\Delta x}{\Delta y}$$

Strecken mit proportionalem Verhalten kommen z.B. bei einer Durchflussregelung mittels Stellventil vor. Verändert sich der Ventilhub, so ändert sich augenblicklich auch der Durchfluss.

## 2.2 Regelstrecke mit integralem Verhalten

I-Regelstrecken besitzen keinen Ausgleich. Bei einer Stellgröße  $\neq 0$  reagiert die Strecke mit stetigem Steigen oder Fallen der Regelgröße. Ein Beharrungszustand wird nicht erreicht. Dieses Verhalten ist z.B. bei einer Füllstandsregelung mit ungleichem Zu- oder Abfluss zu beobachten.

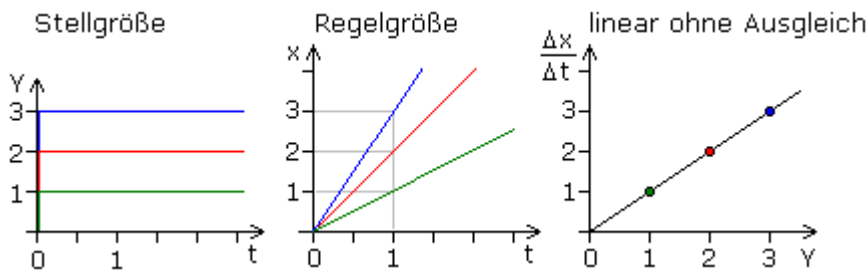


Abb. 3: Charakteristik der I-Regelstrecke

Die Integrierzeit ist die Zeit, die benötigt wird, um den Stellbereich ( $Y_h$ ) zu durchlaufen.

$$T_I = \frac{1}{K_I}$$

$K_I$  Integrierbeiwert der Regelstrecke

$$\int Y dt = Y \cdot t \quad \text{und} \quad X \sim \int Y dt$$

$$X = K_I \cdot Y \cdot t \quad \text{für} \quad X = Y \quad \text{folgt} \quad t = T_I$$

Regelstrecken ohne Ausgleich werden durch ihren Anlaufwert (A) charakterisiert.

$$A = \frac{\Delta t}{\Delta x} = \frac{1}{\tan \alpha} ; \quad \text{wenn} \quad \Delta y = Y_h$$

## 2.3 Regelstrecke mit Totzeit

Regelstrecken wie bspw. Förderbänder mit Schüttgut besitzen eine Totzeit ( $T_t$ ). Druckregelungen in langen Rohrleitungen verhalten sich in ähnlicher Weise. Die Regelgröße reagiert auf eine Änderung der Stellgröße erst nach einer gewissen Zeit.

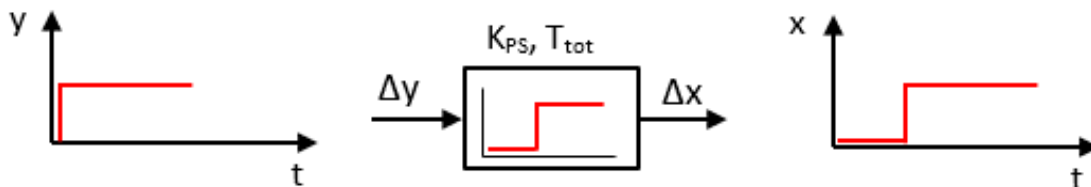


Abb. 4: Regelstrecke mit Totzeit

## 2.4 Regelstrecke mit Verzögerung

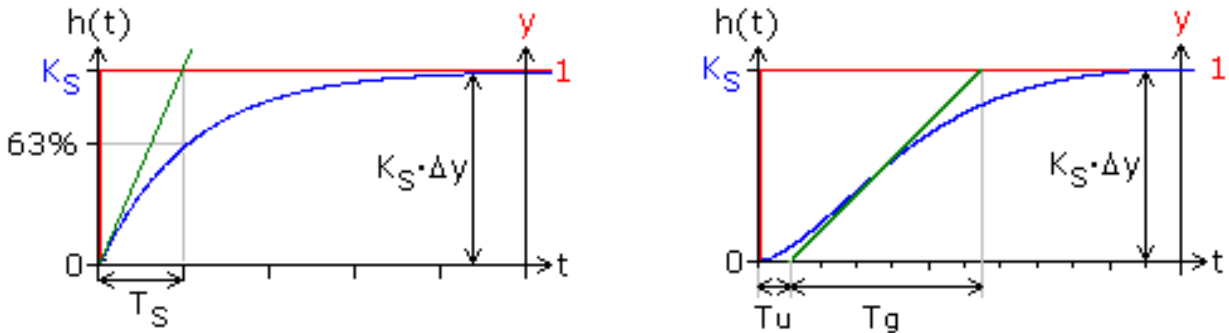
Verzögerungen zwischen Stell- und Regelgrößenänderung erfolgen nicht nur aufgrund von Totzeiten. Jede Regelstrecke besitzt Energiespeicher, die für die Aufnahme oder Abgabe der Energie eine bestimmte Zeit benötigen.

Strecken mit Energiespeichern unterscheidet man nach der Anzahl der wirksamen Verzögerungen. Eine Strecke 1. Ordnung ( $PT_1$ -Strecke) enthält einen Energiespeicher, eine Strecke 2. Ordnung ( $PT_2$ -Strecke) deren zwei usw. Ein RC-Glied bspw. verhält sich wie eine  $PT_1$ -Strecke, eine Reihenschaltung aus RL- und RC-Tiefpass wie eine  $PT_2$ -Strecke.

Die Zeitkonstante  $T_s$  zeigt an, nach welcher Zeit die Regelgröße 67 % des Endwertes erreicht. Die Tangentensteigung entspricht der ersten Ableitung der normierten Funktion  $h(t)$ .  $K_s$  ist der Streckenbeiwert.

$$H(t) = \frac{h_t}{K_S} = 1 - e^{-t/T_S} \quad ; \quad h(t) = \frac{x(t)}{\Delta y} = K_S(1 - e^{-t/T_S}) \quad ; \quad K_S = \frac{x_{max}}{\Delta y}$$

Strecken mit Verzögerung sind gut regelbar, wenn das Verhältnis von  $T_g$  und  $T_u$  einen Wert von  $\geq 10$  besitzt. Als Übergangszeit bezeichnet man die Zeit, welche nach einer Stellgrößenänderung verstreicht, bis sich die Regelgröße bis auf ca. 1 % dem neuen Wert genähert hat. Dieser Wert wird Beharrungswert genannt.



a) PT<sub>1</sub>-Strecke  
T<sub>S</sub> = Zeitkonstante

Abb. 5: Strecken mit Energiespeichern

b) PT<sub>2</sub>-Strecke  
T<sub>g</sub> = Ausgleichszeit  
T<sub>u</sub> = Verzugszeit

Der Kehrwert des Übertragungsbeiwertes ( $K_S$ ) wird als Ausgleichswert ( $q$ ) bezeichnet. Je größer der Ausgleichswert einer Regelstrecke ist, desto leichter lässt sie sich im Allgemeinen regeln.

### 3 Regeleinrichtungen

#### 3.1 Stetige Regler

##### 3.1.1 Reglerverhalten

Wie bereits bei den Regelstrecken erwähnt, gibt es in adäquater Weise bei den Regeleinrichtungen P-Glieder und I-Glieder; hinzu kommen noch D-Glieder.

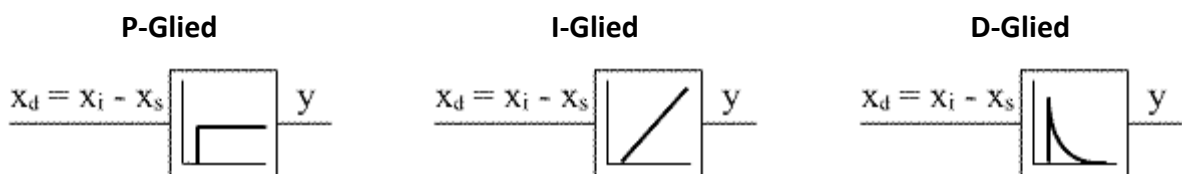


Abb. 6: Proportional-, Integrier- und Differenzglied

$$y = K_P \cdot x_d$$

$$\frac{\Delta y}{\Delta t} = K_I \cdot x_d$$

$$y = K_D \cdot \frac{\Delta x_d}{\Delta t}$$

► **Proportionalglied:** Die Verstärkung der Stellgröße ( $y$ ) ist proportional der Regeldifferenz ( $x_d$ ). Existiert keine Regeldifferenz, so gibt es auch kein Stellsignal. Der P-Regler benötigt immer eine Regelabweichung.

► **Integrierglied:** Die Stellgrößenänderung ( $\Delta y/\Delta t$ ) ist proportional zur Regeldifferenz ( $x_d$ ).

Der Regler führt bei einer Regeldifferenz bis zur Grenze des sogenannten Stellbereiches und dies umso schneller, je größer die Regeldifferenz ist.

► Differenzierglied: Die Verstärkung der Stellgröße (y) ist proportional der Regelgrößenänderung ( $\Delta x_d/\Delta t$ ). Wenn sich die Regelgröße zeitlich ändert, reagiert der Regler schnell mit einem impulsförmigen Stellsignal.

### 3.1.2 Analoge Regelungstechnik mit Operationsverstärkern

Auf elektronischem Wege lassen sich stetige Regler relativ einfach mit Operationsverstärkern realisieren.

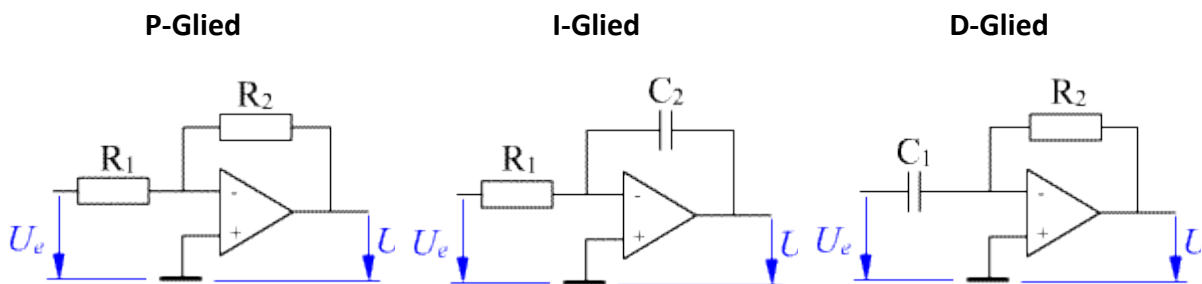


Abb. 7: Analoge Regelungstechnik mit Op-Amps

Sprungfunktion (Eingangsspannung) und Sprungantwort (Ausgangsspannung) zeigen auf anschauliche Weise die jeweiligen Unterschiede.

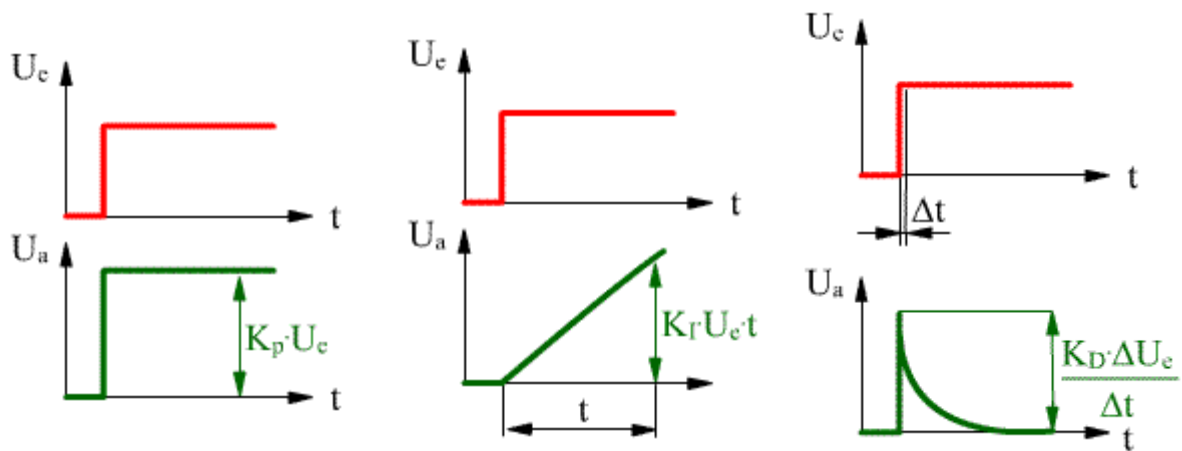


Abb. 8: Sprungfunktion (rot) und Sprungantwort (grün)

Die Übergangsfunktion wird durch den "Beiwert" beschrieben.

Proportionalbeiwert  $K_P$

$$K_P = \frac{R_2}{R_1}$$

Ausgangsspannung

$$U_a = K_P \cdot U_e$$

Integrierbeiwert  $K_I$

$$K_I = \frac{1}{R_1 \cdot C_2}$$

Ausgangsspannungsänderung

$$\frac{\Delta U_a}{\Delta t} = K_I \cdot U_e$$

Differenzierbeiwert  $K_D$

$$K_D = R_2 \cdot C_1$$

Ausgangsspannungsimpuls

$$U_a = K_D \cdot \frac{\Delta U_e}{\Delta t}$$

### 3.1.3 Auswahl des Reglertyps

Abhängig von der zu regelnden Strecke kommen unterschiedliche Reglertypen zum Einsatz. In praxi werden Kombinationen aus PI- oder PID-Gliedern als Regler verwendet. Die Ausgangssignale der einzelnen Regelglieder werden intern zusammengeführt und aufsummiert.

Regelstrecke		Regler					
Typ	Beispiel	P	I	PI	PD	PID	Zweipunkt
P <sub>0</sub>	Durchfluss	-	++	++	-	-	-
PT <sub>1</sub>	Druck	+ (S), ++ (F)	+	+ (F), ++ (S)	+	-	+
PT <sub>n</sub>	Temperatur	-	-	+	+	++	+
PT <sub>t</sub>	Transportmengen	-	+	++	-	-	-
I <sub>0</sub>	Wasserfüllstand	+	--	+	-	-	+
IT <sub>1</sub>	Ölfüllstand	+	--	+ (S), ++ (F)	+	+ (F), ++ (S)	+

-- instabil, - nicht geeignet, + geeignet, ++ gut geeignet, (F) bei Führung, (S) bei Störung

Für eine Volumenstromregelung wird ein Regler mit PID-Struktur eingesetzt.

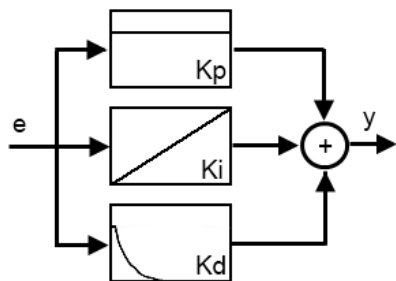


Abb. 9: PID-Reglerstruktur

Das Stellsignal (y) besteht beim PID-Regler aus den Anteilen  $y_P + y_I + y_D$ .

$$y_R(t) = K_P \cdot x_d(t) + K_I \int_0^t x_d(t) dt + K_D \frac{d}{dt} x_d(t)$$

Die Regeldifferenz (e) wird aus  $w - r$  gebildet.

Das Ausgangssignal des Reglers ( $y_R$ ) muss an das Stellgerät angepasst sein.

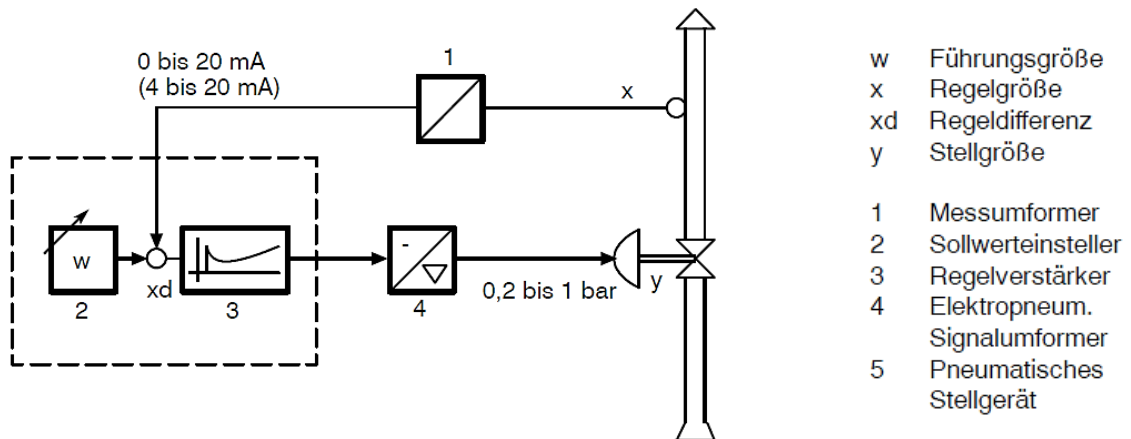


Abb. 10: Funktionsplan einer kontinuierlichen Volumenstromregelung<sup>1</sup>

Im vorliegenden Beispiel liefert der Ausgang ein Stromsignal von 0 - 20 mA, welches über einen elektropneumatischen Signalumformer auf das Stellglied einwirkt. Die Regelgröße (x) wird über einen Messumformer auf den Eingang zurückgeführt.

<sup>1</sup> Siemens-Handbuch SIPART DR21.

## 3.2 Unstetige Regler

### 3.2.1 Zweipunkt-Regler

Zweipunktregler besitzen zwei Zustände (Ein oder Aus) und werden für Regelungen verwendet, die kein dynamisches Verhalten (wie bspw. Temperaturregelungen) erfordern. Als binäre Ausgänge werden Relais oder Halbleiter verwendet. Zweipunktregler mit Impulslängenausgang variieren nach Bedarf die relative Einschaltdauer. Adäquat dazu verändern Zweipunktregler mit Impulsfrequenzausgang die Impulsfrequenz des Ausganges.

### 3.2.2 Dreipunkt-Regler

Dreipunktregler enthalten zwei Reglerstrukturen und werden z.B. zum Heizen und/oder Kühlen eingesetzt.

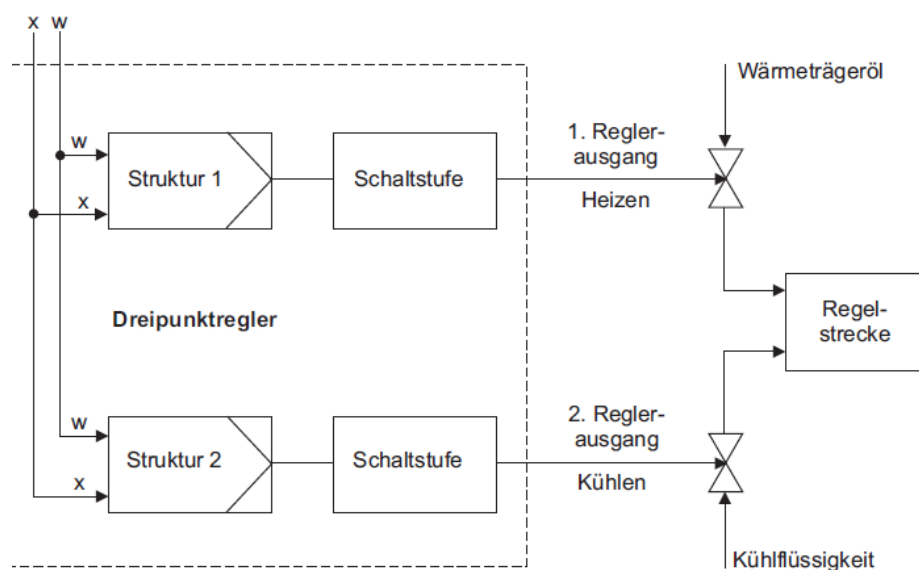


Abb. 11: Prinzipieller Regleraufbau eines Dreipunktreglers<sup>2</sup>

### 3.2.3 Stellungsregler

Um motorische Stellglieder anzusteuern, werden Stellungsregler mit Rückführung benötigt. Die Rückführung des Stellgrades erfolgt meist mit einem in das Stellglied integrierten Potentiometers. Innerhalb der Stellgliedlaufzeit verfährt das Stellglied vom vollständig geöffneten in den geschlossenen Zustand (und umgekehrt).

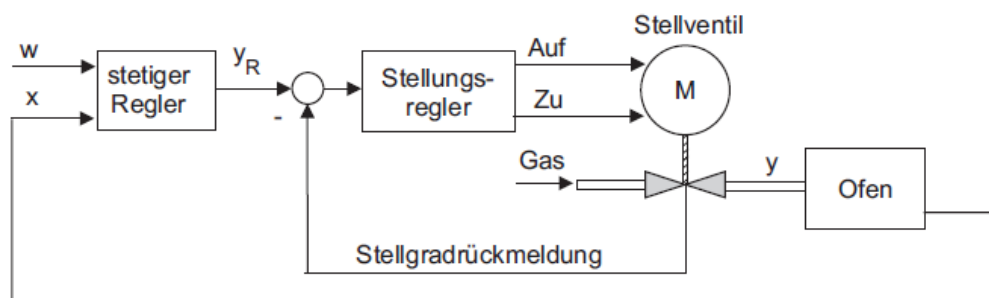


Abb. 12: Stetiger Regler mit integriertem Stellungsregler<sup>3</sup>

<sup>2</sup> M. Schleicher: Regelungstechnik (JUMO Handbuch).

<sup>3</sup> Ebenda.

### 3.2.4 Dreipunkt-Schrittregler

Damit das Stellglied nicht andauernd auf und zu fährt, kann ein Dreipunktschrittregler eingesetzt werden mit den Zuständen Rechtslauf, Aus, Linkslauf. Eine Rückführung wird nicht benötigt.

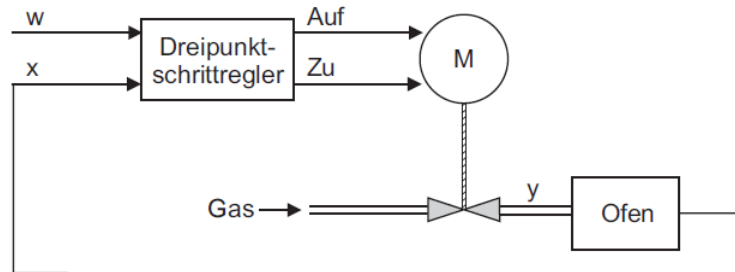


Abb. 13: Dreipunktschrittregler mit Motorstellglied<sup>4</sup>

Um den Antrieb in den beiden Endstellungen (Auf, Zu) auszuschalten, werden Grenzwertschalter benötigt.

## 4 Reglereinstellungen

### 4.1 Parametrierung nach Ziegler-Nichols

Bei unbekanntem Regelverhalten der Strecke wird die Einstellmethode nach Ziegler-Nichols bevorzugt. Dazu müssen die kritischen Parameter durch Beaufschlagung der Strecke mit einem sinusförmigen Signal ermittelt werden.

Regel-einrichtung	$K_P$	$T_n$	$T_v$
P	$0,5 \cdot K_{P_{krit}}$	—	—
PD	$1,25 \cdot K_{P_{krit}}$	—	$0,12 \cdot T_{krit}$
PI	$0,45 \cdot K_{P_{krit}}$	$0,85 \cdot T_{krit}$	—
PID	$0,6 \cdot K_{P_{krit}}$	$0,5 \cdot T_{krit}$	$0,12 \cdot T_{krit}$

### 4.2 Parametrierung nach Chien, Hrones und Reswick

Sind die Streckenparameter bekannt, wird die Einstellmethode nach Chien, Hrones und Reswick verwendet. Um die Übergangsfunktion zu bestimmen, kann durch eine sprunghafte Änderung der Stellgröße der Verlauf der Regelgröße mit einem Schreiber registriert werden.

<sup>4</sup> Ebenda.

Regel-einrichtung	Störungsverhalten		Führungsverhalten	
	ohne Überschwingung	20% Überschwingung	ohne Überschwingung	20% Überschwingung
P	$X_P \approx 3,3 \cdot K_S \cdot Y_h \cdot \frac{T_u}{T_g}$ $K_P \approx 0,3 \cdot \frac{T_g}{K_S \cdot T_u}$	$X_P \approx 1,4 \cdot K_S \cdot Y_h \cdot \frac{T_u}{T_g}$ $K_P \approx 0,7 \cdot \frac{T_g}{K_S \cdot T_u}$	$X_P \approx 3,3 \cdot K_S \cdot Y_h \cdot \frac{T_u}{T_g}$ $K_P \approx 0,3 \cdot \frac{T_g}{K_S \cdot T_u}$	$X_P \approx 1,4 \cdot K_S \cdot Y_h \cdot \frac{T_u}{T_g}$ $K_P \approx 0,7 \cdot \frac{T_g}{K_S \cdot T_u}$
PI	$X_P \approx 1,7 \cdot K_S \cdot Y_h \cdot \frac{T_u}{T_g}$ $K_P \approx 0,6 \cdot \frac{T_g}{K_S \cdot T_u}$ $T_n \approx 4 \cdot T_u$	$X_P \approx 1,4 \cdot K_S \cdot Y_h \cdot \frac{T_u}{T_g}$ $K_P \approx 0,7 \cdot \frac{T_g}{K_S \cdot T_u}$ $T_n \approx 2,3 \cdot T_u$	$X_P \approx 2,9 \cdot K_S \cdot Y_h \cdot \frac{T_u}{T_g}$ $K_P \approx 0,35 \cdot \frac{T_g}{K_S \cdot T_u}$ $T_n \approx 1,2 \cdot T_g$	$X_P \approx 1,7 \cdot K_S \cdot Y_h \cdot \frac{T_u}{T_g}$ $K_P \approx 0,6 \cdot \frac{T_g}{K_S \cdot T_u}$ $T_n \approx T_g$
PID	$X_P \approx 1,05 \cdot K_S \cdot Y_h \cdot \frac{T_u}{T_g}$ $K_P \approx 0,95 \cdot \frac{T_g}{K_S \cdot T_u}$ $T_n \approx 2,4 \cdot T_u$ $T_v \approx 0,42 \cdot T_u$	$X_P \approx 0,83 \cdot K_S \cdot Y_h \cdot \frac{T_u}{T_g}$ $K_P \approx 1,2 \cdot \frac{T_g}{K_S \cdot T_u}$ $T_n \approx 2 \cdot T_u$ $T_v \approx 0,42 \cdot T_u$	$X_P \approx 1,7 \cdot K_S \cdot Y_h \cdot \frac{T_u}{T_g}$ $K_P \approx 0,6 \cdot \frac{T_g}{K_S \cdot T_u}$ $T_n \approx T_g$ $T_v \approx 0,5 \cdot T_u$	$X_P \approx 1,05 \cdot K_S \cdot Y_h \cdot \frac{T_u}{T_g}$ $K_P \approx 0,95 \cdot \frac{T_g}{K_S \cdot T_u}$ $T_n \approx 1,35 \cdot T_g$ $T_v \approx 0,47 \cdot T_u$

### 4.3 Was versteht man unter dem Proportionalbereich?

Bei einem reinen P-Regler verhält sich die Stellgröße innerhalb des *Proportionalbereiches* ( $X_p$ ) proportional zur Regelabweichung. Über den Proportionalbereich lässt sich die Verstärkung des Reglers an die Regelstrecke anpassen.

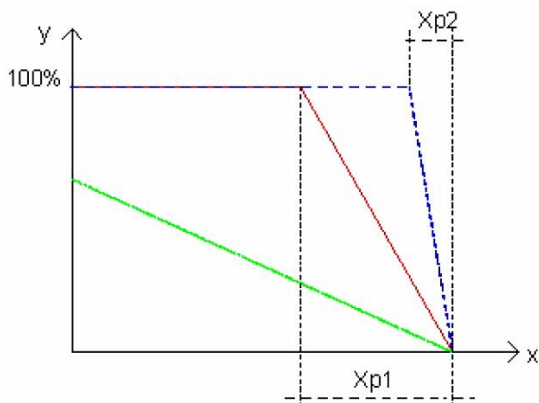


Abb. 14: Proportionalbereich

nimmt mit kleinerem Proportionalbereich zu.

Der Regler reagiert bei kleinem Proportionalbereich schneller und heftiger. Ein zu kleiner Proportionalbereich führt daher zum Schwingen des Regelkreises.

### 4.4 Was versteht man unter der Nachstellzeit?

Der I-Anteil eines Reglerausgangssignales sorgt für eine stetige Veränderung des Reglerstellgrades, solange bis der Istwert den Sollwert erreicht. Je größer die Regeldifferenz ist, desto rascher wirkt sich der der I-Anteil aus. Letztlich sorgt der I-Anteil dafür, dass ohne bleibende Regelabweichung ausgeregelt werden kann.



Die *Nachstellzeit* ( $T_N$ ) gibt an, wann bei einer Sprungantwort die Wirkung des I-Anteils gleich groß ist, wie die Wirkung des P-Anteils.

Eine große Nachstellzeit hat einen geringeren Einfluss des I-Anteils zur Folge und umgekehrt.

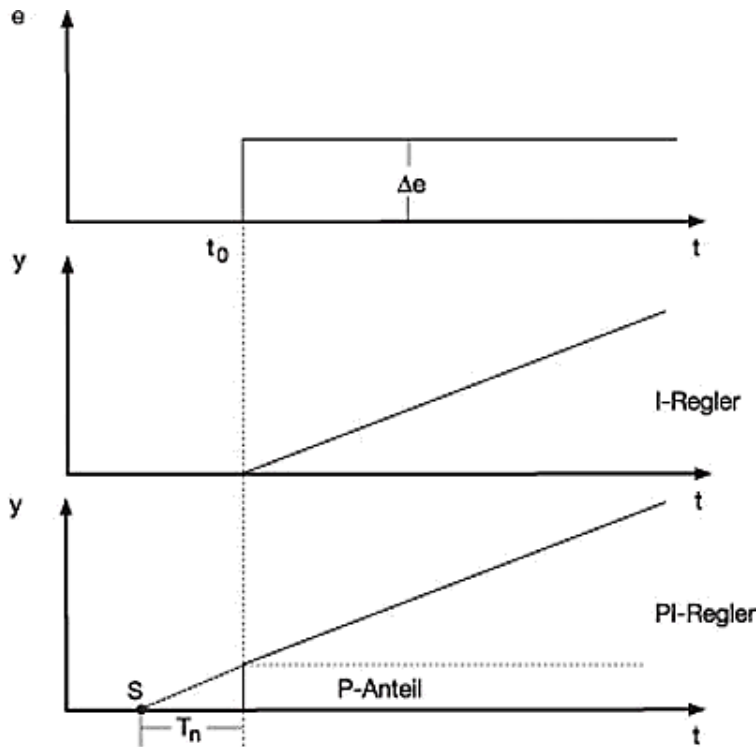


Abb. 15: Sprungantwort eines PI-Reglers

### 4.5 Was versteht man unter der Vorhaltezeit?

Über die *Vorhaltezeit* ( $T_v$ ) wird die Intensität des D-Anteils eingestellt. Der D-Anteil reagiert auf die Änderungsgeschwindigkeit der Eingangsgröße. Je schneller die Änderung verläuft, desto stärker ist die Reaktion. Bei Annäherung an den Sollwert geht der D-Anteil gegen Null und verhindert damit ein Überschwingen der Regelgröße.

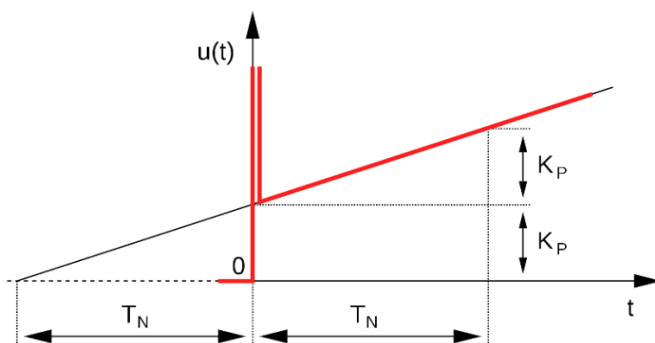


Abb. 16: Sprungantwort des idealen PID-Reglers

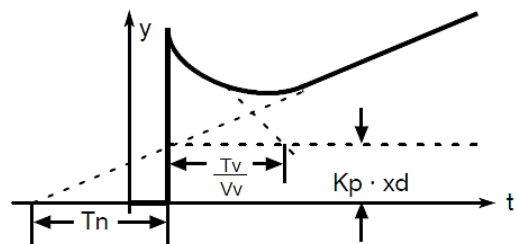


Abb. 17: Sprungantwort des realen PID-Reglers

In praxi verläuft der durch den D-Anteil bewirkte Nadelimpuls als Abklingfunktion gegen Null zurück.

## 5 Stabilität von Regelkreisen

Für einen Regelkreis gelten folgende Bedingungen:

- Der Regelkreis muss stabil sein
- Der Regelkreis muss schnell sein
- Der Regelkreis muss genau sein.

Eine Regeleinrichtung ist um so besser eingestellt:

- je kleiner die bleibende Regeldifferenz  $e$
- je kürzer die Einschwingzeit
- je kleiner die Überschwingweite  $x_m$  ist

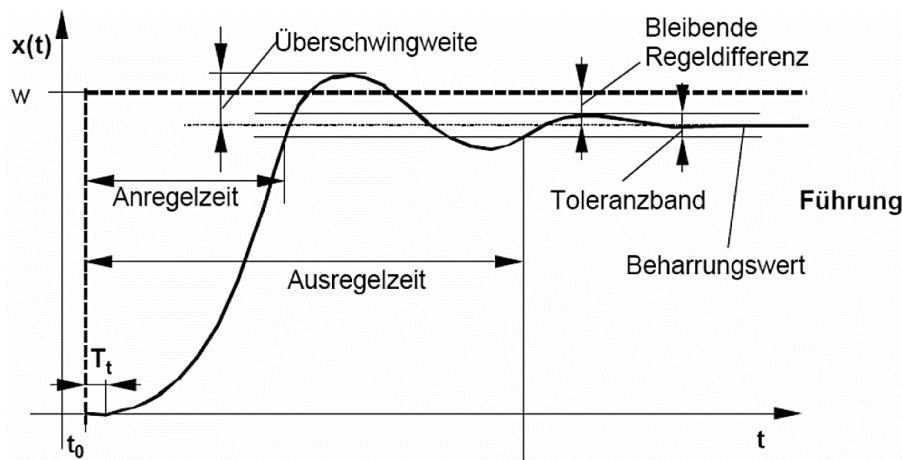


Abb. 18: Übergangsverhalten einer  $PT_2$ -Regelstrecke

In der obigen Grafik erreicht die Regelgröße nach zweimaligem Überschwingen den Beharrungszustand. Die Regelung erweist sich als stabil.

Bei zu großer Kreisverstärkung ( $V_0$ ) wird der Regelkreis instabil.

$$V_0 = K_{PR} \cdot K_{PS}$$

### 5.1 Ortskurve

In der Regelungstechnik besitzt die experimentelle Ermittlung des Frequenzgangs eine besondere Bedeutung. Hierbei beobachtet man die Reaktion eines Übertragungselements nach der Aufschaltung eines sinusförmigen Signals. Sind die Einschwingvorgänge des Eingangssignals abgeklungen, so zeigt sich, dass sich auch die Ausgangsgröße nach einer harmonischen Funktion ändert. Dabei sind jedoch die *Amplitude* und die *Phasenlage* anders als die der Eingangsgröße.

$$x_e(t) = \hat{x}_e \cdot \sin(\omega t) \quad x_a(t) = \hat{x}_a(\omega) \cdot \sin(\omega t + \varphi)$$

Eine besondere Bedeutung kommt hierbei der *Kreisfrequenz* ( $\omega$ ) des Eingangssignals zu. Sie bestimmt das Verhältnis der Amplituden von Eingangs- und Ausgangsgröße, also den Frequenzgang und die Phasenlage.

Für den Frequenzgang gilt: 
$$F(j\omega) = \frac{x_a(j\omega)}{x_e(j\omega)} = \frac{\hat{x}_a(\omega)}{\hat{x}_e} \cdot e^{j\varphi(\omega)}$$

Die Frequenzgänge verschiedener Kreisfrequenzen können dann in die komplexe Zahlenebene eingetragen werden und man erhält auf diese Weise unterschiedliche *Zeiger*, deren Spitzen anschließend miteinander verbunden werden und damit die *Ortskurve* des Systems abbilden.

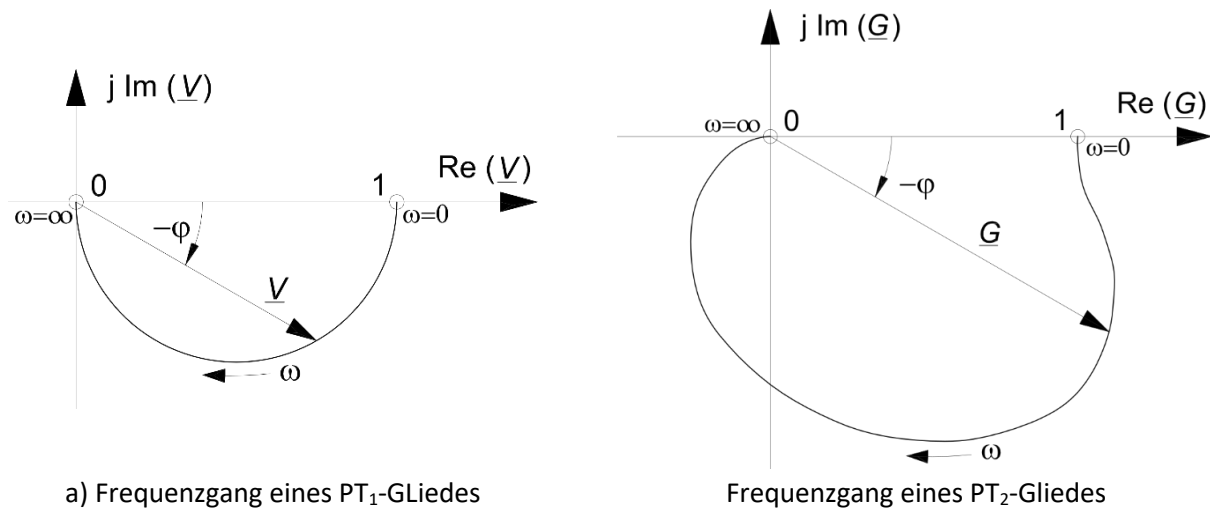


Abb. 19: Ortskurven von PT<sub>n</sub>-Gliedern<sup>5</sup>

Die Ortskurve des Frequenzganges wird in der Regelungstechnik als *Nyquist-Diagramm* bezeichnet. Aus dem Kurvenverlauf lassen sich wichtige Schlussfolgerungen gewinnen.

Es gilt das *Nyquist-Kriterium*:

«Ist der offene Regelkreis stabil, so ist der geschlossene Regelkreis genau dann stabil, wenn die Ortskurve des offenen Kreises den kritischen Punkt weder umkreist noch durchdringt.»

Das "vereinfachte Nyquistkriterium" ist anwendbar, wenn maximal zwei Polstellen des offenen Regelkreises auf der imaginären Achse liegen und alle anderen in der linken Halbebene. Das Nyquistverfahren ist auch bei Regelkreisen anwendbar, deren offene Kreise Totzeitglieder enthalten.

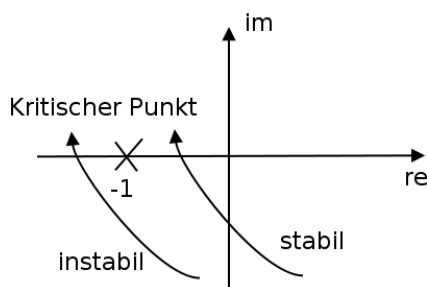


Abb. 20: Vereinfachtes Nyquist-Kriterium

Der kritische Punkt, an dem die Phasendrehung 180° erreicht, befindet sich bei -1 auf der reellen Achse.

1) Stabilität → Der geschlossene Regelkreis ist genau dann stabil, wenn beim Durchlauf der Ortskurve in Richtung zunehmender Frequenz der "kritische Punkt zur Linken" liegt. Ist die Ortskurve weit genug vom kritischen Punkt entfernt und befindet dieser sich links, so verläuft der Einschwingvorgang des geschlossenen Regelkreises hinreichend gedämpft.

2) Instabilität → Ein Rückkopplungssignal, das als Gegenkopplung wirken soll, besitzt grund-

<sup>5</sup> [https://de.wikipedia.org/wiki/Ortskurve\\_\(Systemtheorie\)](https://de.wikipedia.org/wiki/Ortskurve_(Systemtheorie))

sätzlich eine Phasenverschiebung von  $180^\circ$  gegenüber dem Eingangssignal eines Systems. Erfolgt durch weitere Phasendrehung im Verlauf der stetigen Frequenzzunahme eine Mitkopplung, so beginnt das System zu schwingen. Der Graph verläuft dann links vom kritischen Punkt und der Regelkreis ist instabil.

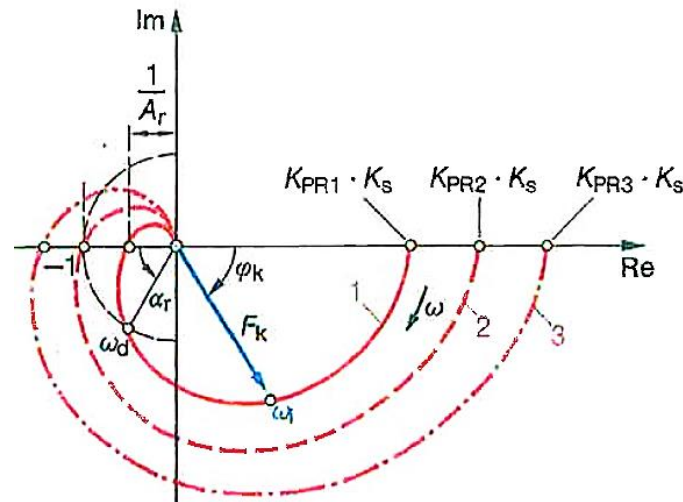


Abb. 21: Nyquist-Diagramm<sup>6</sup>

Zum Abgleich des Reglers sind zwei Kenngrößen, Phasenrand und Amplitudenrand zu beachten.

► Der *Phasenrand* (Phasenreserve) zeigt den Winkel ( $\alpha_r$ ) an, um den die Phasenlage des rückgekoppelten Signals noch weiter verschoben werden kann, bis Mitkopplung im System eintritt. Der Phasenrand beschreibt also den verbleibenden Winkel zwischen der Ursprungsgerade durch den *Durchtrittspunkt* ( $\omega_d$ ) auf der Ortskurve mit dem Abstand 1 zum Ursprung (Schnittpunkt mit dem Einheitskreis) und der reellen Achse.

► Der *Amplitudenrand* (Amplitudenreserve) zeigt an, um welchen Faktor die Regelstrecke verstärkt werden darf, um noch stabil zu sein.

Der Amplitudenrand – als Kehrwert von  $V_R$  – lässt sich nach folgender Formel bestimmen:

$$A_{ab}(\omega) = 20 \lg A(\omega) \text{ in Dezibel}$$

## 5.2 Bode-Diagramm

Eine zweite Möglichkeit, um sich schnell einen Überblick über die Stabilität eines Regelkreises zu verschaffen, besteht in der Konstruktion eines *Bode-Diagramms*. Das Bode-Diagramm dient neben der Ortskurve zur graphischen Darstellung des Frequenzganges.

Das Zeitverhalten des rückgekoppelten Regelkreises hängt entscheidend vom Verlauf des Frequenzganges  $F(j\omega)$  ab.

Während man bei der Ortskurvendarstellung den Frequenzgang nach Betrag und Phase in einem einzigen Diagramm in der Gaußschen Zahlenebene darstellt, werden im Bode-Diagramm der Amplitudengang  $A(t)$  in Dezibel und der Phasenwinkel ( $\varphi$ ) in Grad in zwei getrennten Dia-

<sup>6</sup> Paetzold: Mess- und Regelungstechnik (Christiani).

grammen als Funktionen der Kreisfrequenz ( $\omega$ ) aufgetragen. Die Kreisfrequenz wird in beiden Diagrammen im logarithmischen Maßstab auf der Abszisse angezeigt.

Ein Kriterium für die Stabilität des Regelkreises ist – wie beim Nyquist-Diagramm – Phasenrand und Amplitudenrand.

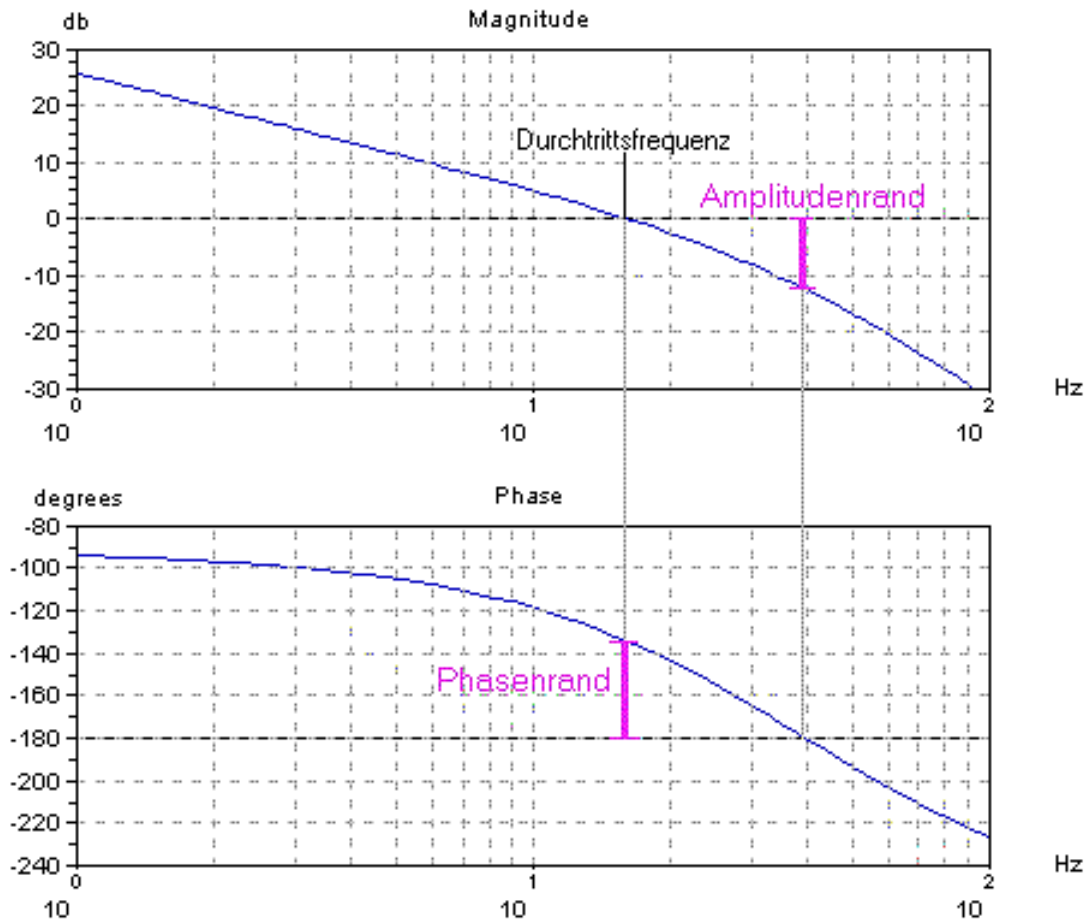


Abb. 22: Bode-Diagramm<sup>7</sup>

- ▶ Der *Phasenrand* ist der Abstand (Phasenreserve) zur  $-180^\circ$ -Linie bei der Durchtrittsfrequenz. Eine kleine Phasenreserve bedeutet ein starkes Überschwingen und lange Überschwingdauer.
- ▶ Die *Durchtrittsfrequenz* ( $\omega_d$ ) ist diejenige Frequenz, bei der der *Amplitudengang* durch die 0 dB-Linie geht.

<sup>7</sup> <https://rn-wissen.de/wiki/index.php/Regelungstechnik>

## 6 Praxisbeispiele

### 6.1 Druckregelung mit einem Zweipunkt-Regler

Ein Druckschalter überwacht eine Pumpe zur Trinkwasserförderung. Dieser Druckschalter soll bei Überschreiten eines Druckes von 6 bar (Schaltpunkt) den Stopp einer Pumpe herbeiführen. Bei einem auf den Pumpenstopp folgenden Unterschreiten des Druckes von 6 bar (Rückschalt- punkt) soll der Druckschalter die Pumpe erneut starten.

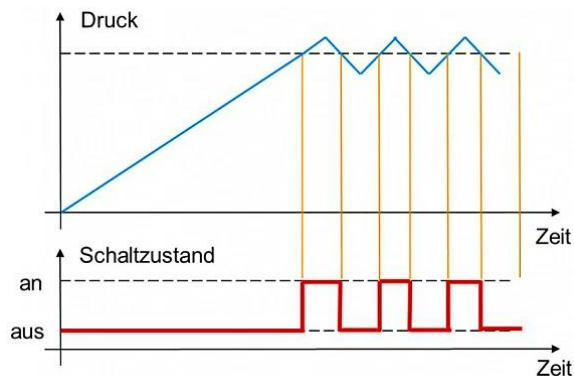


Abb. 23: Druckregelung ohne Hysterese

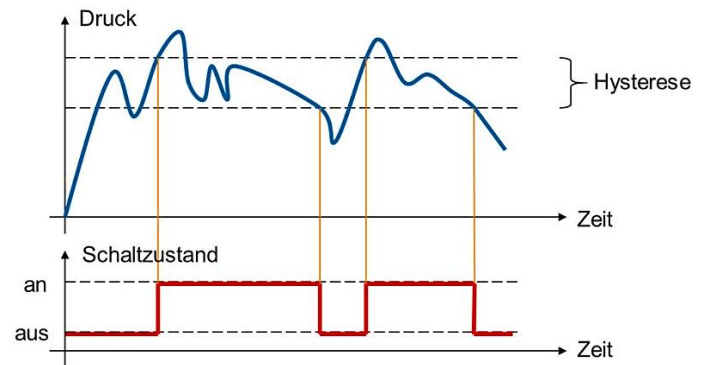


Abb. 24: Druckregelung mit definierter Hysterese

Stellt man sich einen kontinuierlichen Prozess vor, so wird die Pumpe in schneller Abfolge ein- und ausschalten. Dies führt zu Instabilität, Verschleiß und nicht zuletzt frühzeitigem Ausfall der Pumpe. Um also eine unnötige Oszillation des Systems zu vermeiden, benötigt man eine dem Prozess angepasste Einstellung der Schalt- und Rückschalt- punkte, d.h. eine definierte *Hysterese*, um einen stabilen Regelkreis zu realisieren.

Mechanische Schalter besitzen bedingt durch ihren konstruktiven Aufbau eine vordefinierte Schalt- hysterese, die in der Herstellerspezifikation zu finden ist. Diese liegt in der Regel bei 10 bis 20 % des eingestellten Schalt- punktes (z. B. 10 bar Schalt- punkt, 1 bar Hysterese). Ausnahmen bilden me- chanische Druckschalter, bei denen die Hysterese eingestellt werden kann. Bei einem elektroni- schen Schalter ist die Hysterese in der Regel nahezu über den gesamten Messbereich frei konfigur- ierbar, mittels einer externen Software, einem Konfigurationsmodul oder über ein integriertes Dis- play mit Bedientasten.<sup>8</sup>

### 6.2 Drehzahlregelung mit einem PI-Regler

Der Drehzahlregelkreis besteht aus dem Drehzahlregler und der Regelstrecke. Die Regel- strecke enthält einen Leistungsteil und den Antrieb der Arbeitsmaschine. Ausgangsgröße des Drehzahlreglers – und damit Eingangsgröße der Regelstrecke – ist der Drehmomentsollwert. In der praktischen Realisierung wird jedoch anstelle des Drehmomentsollwertes ein Strom- sollwert verwendet, der dem Drehmoment proportional ist. Der unterlagerte Stromregelkreis sorgt für eine schnelle Einprägung des Stromes und damit des gewünschten Motordrehmo- mentes. Für die Betrachtungen zur Drehzahlregelung kann der Stromregelkreis vereinfacht durch ein  $PT_1$ -Glied mit einer kleinen Verzögerungszeitkonstante nachgebildet werden.

Um den Antrieb definiert auf seine Betriebsdrehzahl hochzufahren, wird ein rampenförmiger

<sup>8</sup> <https://blog.wika.de/know-how/schaltfunktion-hysterese-bei-elektronischen-druckschaltern/>

Drehzahlsollwert benötigt. Dieser wird mit Hilfe eines Hochlaufgebers gebildet. Er begrenzt den Anstieg des Drehzahlsollwertes in positiver und negativer Richtung und wandelt einen sprungförmigen Sollwert in einen rampenförmigen Sollwert um. Die Steilheit der Rampenfunktion ist je nach Anwendungsfall einstellbar.

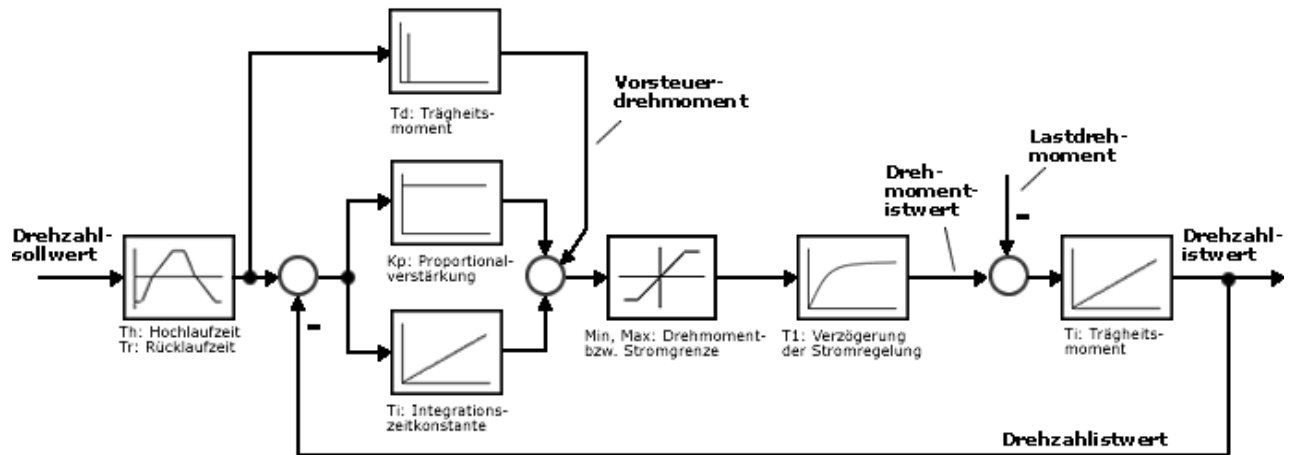


Abb. 25: Drehzahlregelung<sup>9</sup>

Der Drehzahlregler wird wie der Stromregler typischer Weise als PI-Regler ausgelegt. Er besteht aus einem P-Glied und einem I-Glied, die parallel geschaltet sind. Die Summe der Ausgangssignale ergibt das Solldrehmoment, das anschließend entsprechend den Gegebenheiten des Antriebes und der angeschlossenen Arbeitsmaschine auf einen Maximalwert begrenzt wird.

Das P-Glied und das I-Glied übernehmen unterschiedliche Aufgaben im Drehzahlregler:

- a) Das P-Glied dient zur unverzögerten Reaktion auf Sollwertänderungen bzw. das Einwirken von Störgrößen. Treten aufgrund dieser Vorgänge Regelabweichungen auf, bewirkt das P-Glied eine sofortige Änderung des Solldrehmomentes und damit eine unverzögerte Reaktion des Drehzahlreglers. Das P-Glied ist damit für die Dynamik der Drehzahlregelung von entscheidender Bedeutung.
- b) Das I-Glied dient zur Kompensation von stationären Störgrößen. Eine typische Störgröße stellt das Lastmoment dar.

Das Regelverhalten kann durch eine Vorsteuerung des Drehmomentsollwertes deutlich verbessert werden. Dazu wird der wirksame Drehzahlsollwert über ein D-Glied geführt. Die Zeitkonstante des D-Glieds entspricht der mechanischen Trägheit des Motors und der angeschlossenen Mechanik. Unter dieser Bedingung steht am Ausgang des D-Glieds genau das Solldrehmoment zur Verfügung, das für die Beschleunigung des Antriebes benötigt wird.

<sup>9</sup> [http://www.servotechnik.de/fachwissen/regelung/f\\_beitr\\_00\\_607.htm](http://www.servotechnik.de/fachwissen/regelung/f_beitr_00_607.htm)

## 7 Praxisaufgaben

### 7.1 Aufgabe 1

Die Temperatur in einem Musterlager für pflanzliche Pharmaprodukte soll möglichst konstant gehalten werden. Die reguläre Lagerraumtemperatur von 20 °C darf nicht mehr als 2 % abnehmen. Die Räumlichkeit entspricht einer PT<sub>2</sub>-Strecke; dafür vorgesehen ist ein PI-Regler. Der Reglerausgang generiert eine Stellgrösse (y) von 0 bis 10 V. Um eine Kennlinie aufzunehmen, wird die Stellgrösse abrupt verändert. Folgende Grössen werden erfasst:

$$\Delta x = 70 \text{ °C}; T_g = 500 \text{ s}; T_u = 50 \text{ s}.$$

Bestimme die Einstellparameter des Reglers nach dem Verfahren von Chien, Hrones und Reswick für eine optimale Ausregelung von Störungen, wobei der Regelvorgang aperiodisch verläuft und keine Totzeit auftritt.

$$K_{pS} = \frac{\Delta x}{\Delta y} = \frac{70 \text{ °C}}{10 \text{ V}} = 7 \text{ °C/V}$$

$$K_{pR} = 0,6 \cdot \frac{T_g}{K_{pS} \cdot T_u} = 0,6 \cdot \frac{500 \text{ s}}{\frac{7 \text{ °C}}{\text{V}} \cdot 50 \text{ s}} = 0,86 \text{ V/°C}$$

### 7.2 Aufgabe 2

Die Zugspannung zwischen Auslauf Härter und Eingang Presse wird mit einem PI-Regler auf einem konstanten Wert gehalten. Im Zuge einer Modernisierung soll der bestehende Analogregler durch einen in einer SPS integrierten Reglerbaustein ersetzt werden.

Vom PI-Regler wurden nach einem Sollwertsprung von 0 mA auf 2 mA zum Zeitpunkt  $t_0 = 1 \text{ s}$  die folgenden Messwerte erfasst:

t/s	0	1	2	3	4	5	6	7	8
y/mA	0	3	3,5	4	4,5	5	5,5	6	6,5

Zeichne die Sprungantwort der PI-Regeleinrichtung auf und bestimme den Übertragungsbeiwert und die Nachstellzeit des Reglers.

$$K_p = \frac{y}{e} = \frac{3 \text{ mA}}{2 \text{ mA}} = 1,5 \quad K_i = \frac{K_p}{T_n} = \frac{1,5}{6 \text{ s}} = 0,25 \text{ s}^{-1}$$

$$T_n = 6 \text{ s}$$

Die Nachstellzeit wurde grafisch (Abb. 26) ermittelt.



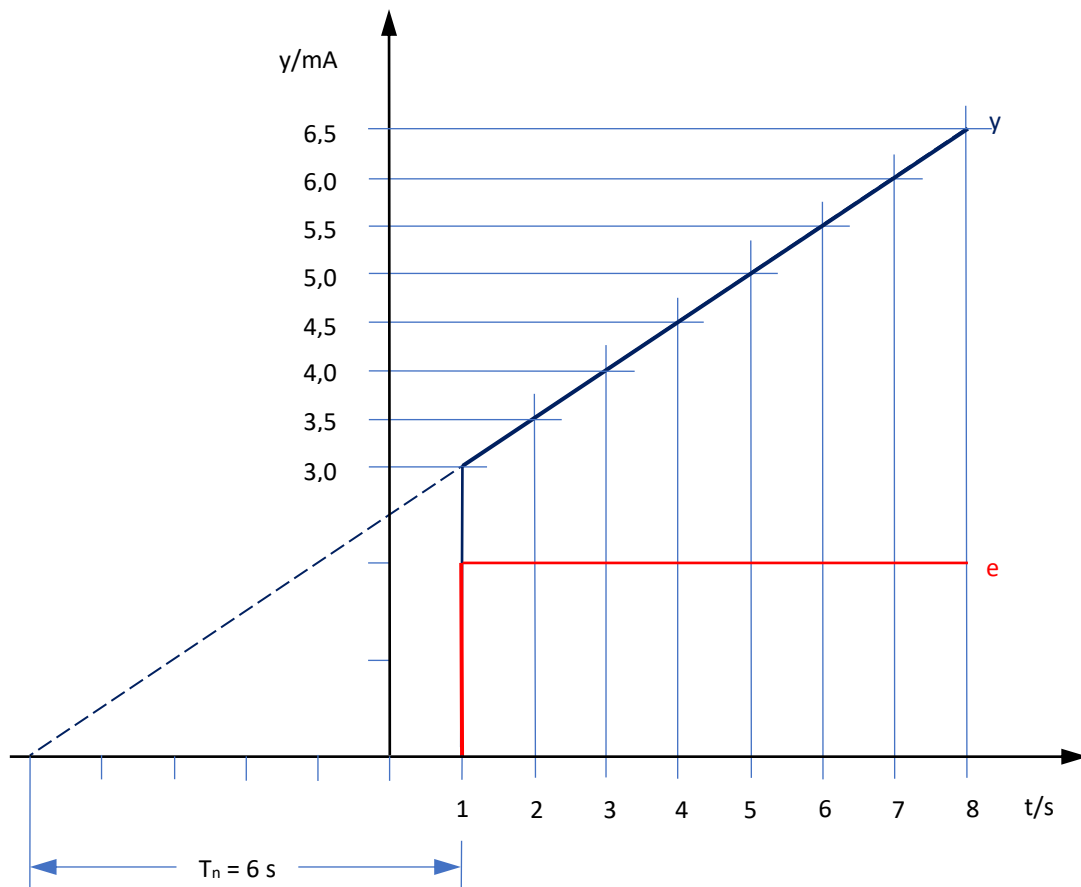


Abb. 26: Reglerkennlinie (7.2)

## 8 Lernquellen

### 8.1 Books

Peter Busch: Elementare Regelungstechnik (Vogel Fachbuch)

Thomas Beier, Petra Wurl: Regelungstechnik (Hanser)

Peter Orłowski: Praktische Regelungstechnik (Springer Vieweg)

### 8.2 Firmenhandbücher

Jumo: Regelungstechnik

Siemens: Regeltechnik

### 8.3 Weblinks

<https://elektroniktutor.de/>

<https://rn-wissen.de/wiki/index.php/Regelungstechnik>

### 8.4 YouTube

<https://www.youtube.com/watch?v=cQH--8rpRw8>