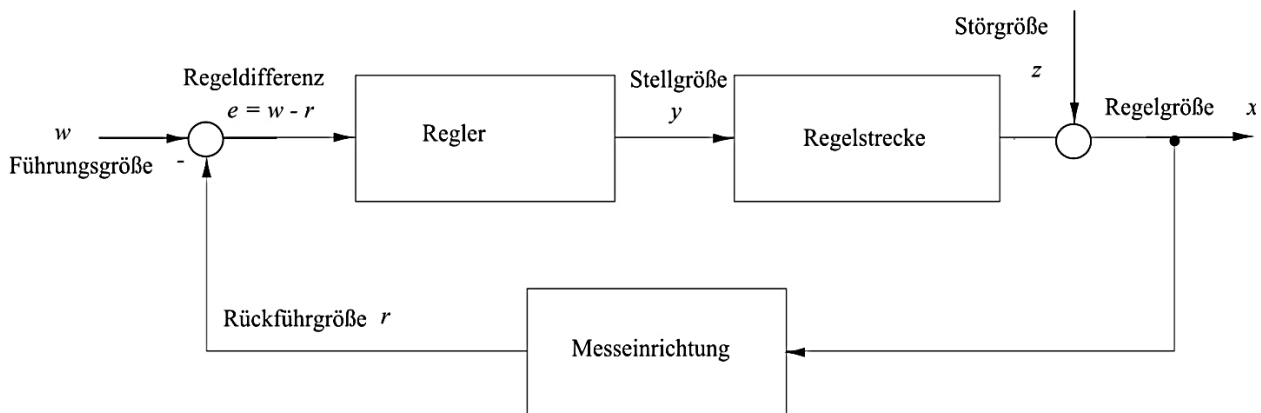


# 1 Regelkreis

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



**Abb. 1**  
Regelkreis

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

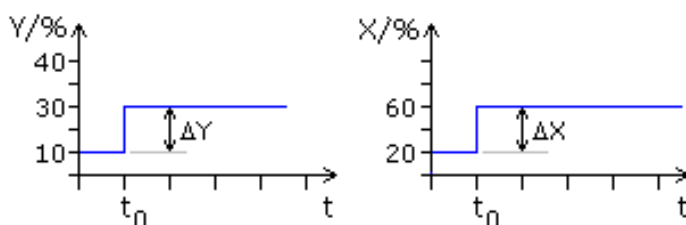
Die Regelgrösse ( $x$  bzw.  $r$ ) gelangt zu einem Vergleicher, wo die Regeldifferenz ( $e$ ) erzeugt wird. Der Regler bildet daraus ein Stellsignal ( $y$ ), das auf die Regelstrecke einwirkt. Damit ist der Regelkreis geschlossen.

## 2 Regelstrecke

Abhängig von ihrer Beschaffenheit benennt man Regelstrecken, die sich durch ihr zeitliches Verhalten unterscheiden.

### 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 proportional mit der Stellgrösse ( $Y$ ).

Übertragungsbeiwert der Regelstrecke:

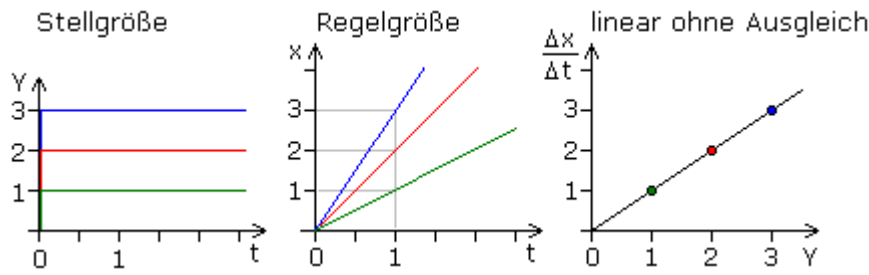
$$K_S = \frac{\Delta x}{\Delta y}$$

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. Das ist z.B. bei einer Füllstandsregelung mit ungleichem Zu- oder Abfluss zu beobachten.



Die Integrierzeit ist die Zeit, die benötigt wird, um den Stellbereich zu durchlaufen.

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

**Abb. 3**

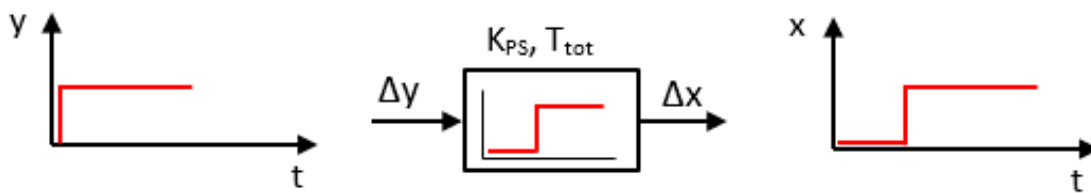
Charakteristik der I-Regelstrecke

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

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

### 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

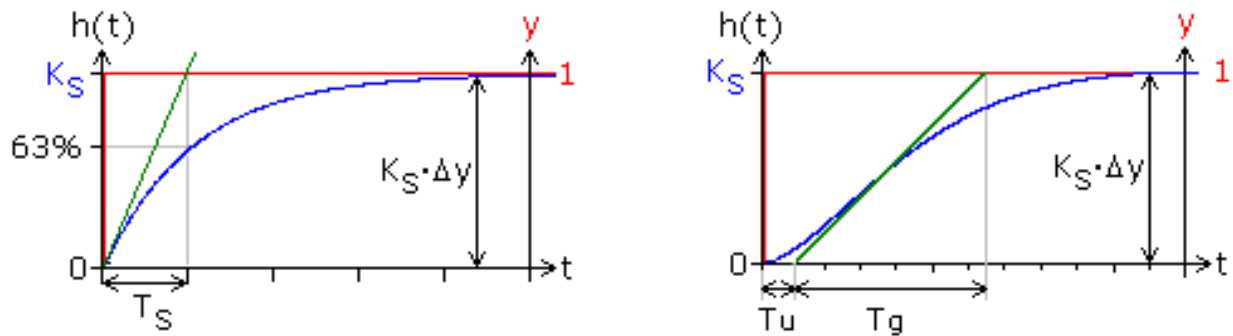
Verzögerungen zwischen Stell- und Regelgrößenänderung erfolgen nicht nur aufgrund von Totzeiten. Jede Regelstrecke besitzt Energiespeicher, die für die Aufnahme oder Abgabe der Energie eine bestimmte Zeit benötigen.

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.



a) PT<sub>1</sub>-Strecke

Abb. 5

b) PT<sub>2</sub>-Strecke

T<sub>s</sub> = Zeitkonstante

Strecken mit Energiespeichern

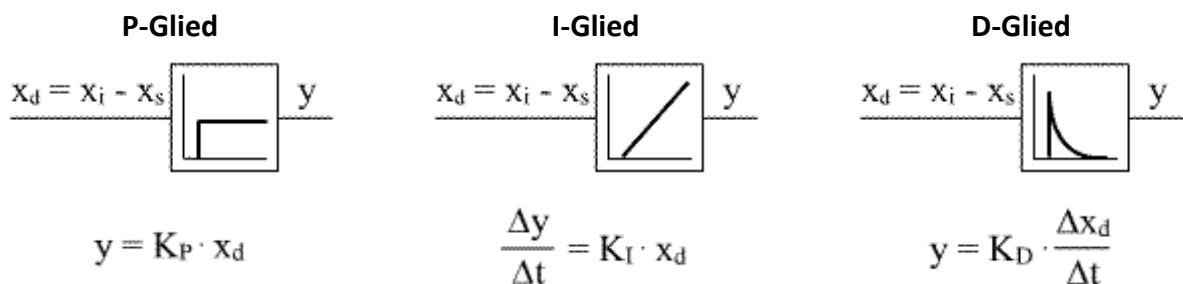
T<sub>g</sub> = Ausgleichszeit

T<sub>u</sub> = Verzugszeit

### 3 Regeleinrichtungen

#### 3.1 Reglertypen

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



► Proportionalglied: Die Verstärkung der Stellgröße (y) ist proportional der Regeldifferenz (x<sub>d</sub>). Existiert keine Regeldifferenz, so gibt es auch kein Stellsignal. Der P-Regler benötigt immer eine Regelabweichung.

► Integrierglied: Die Stellgrößenänderung (Δy/Δt) ist proportional zur Regeldifferenz (x<sub>d</sub>).

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 (Δx<sub>d</sub>/Δt). Wenn sich die Regelgröße zeitlich ändert, reagiert der Regler schnell mit einem impulsförmigen Stellsignal.

In praxi werden Kombinationen aus PI- oder PID-Gliedern als Regler verwendet. Die Ausgangssignale der einzelnen Regelglieder werden zusammengeführt und aufsummiert. Das Stellsignal (y) besteht beim PID-Regler aus den Anteilen y<sub>P</sub> + y<sub>I</sub> + y<sub>D</sub>.

#### 3.2 Reglerauswahl

Abhängig von der zu regelnden Strecke kommen unterschiedliche Reglertypen zum Einsatz.

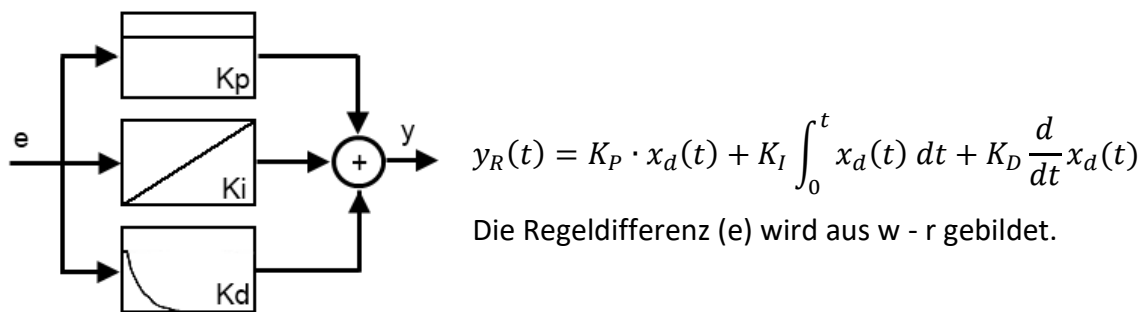
Regelstrecke		Regler					
Typ	Beispiel	P	I	PI	PD	PID	Zweipunkt
P <sub>0</sub>	Durchfluss	-	++	++	-	-	-
PT <sub>1</sub>	Druck	+(S), ++(F)	+	+(F), ++(S)	+	-	+
PT <sub>n</sub>	Temperatur	-	-	+	+	++	+
PT <sub>t</sub>	Transportmengen	-	+	++	-	-	-
I <sub>0</sub>	Wasserfüllstand	+	--	+	-	-	+
IT <sub>1</sub>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

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

Bei den stetigen Reglern sind es PI- und PID-Regler, die für alle denkbaren Anwendungen in Frage kommen.

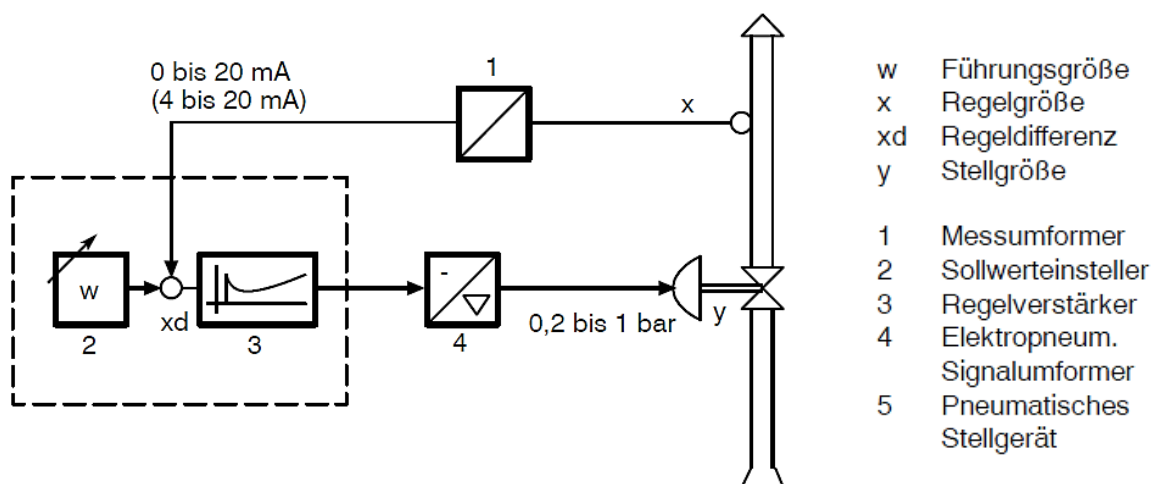
### 3.3 PID-Regler

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



**Abb. 6**  
PID-Reglerstruktur

Das Ausgangssignal des Reglers (y<sub>R</sub>) muss an das Stellgerät angepasst sein. 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.



**Abb. 7**  
Funktionsplan einer kontinuierlichen Volumenstromregelung<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Siemens-Handbuch SIPART DR21 (Ausgabe 2003).

## 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	$0,6 \cdot K_{P_{krit}}$	$0,5 \cdot T_{krit}$	$0,12 \cdot T_{krit}$

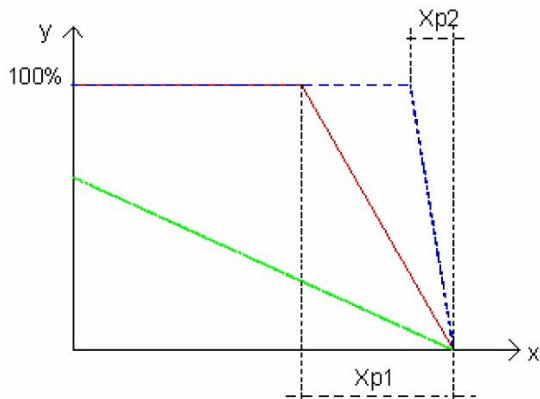
### 4.2 Parametrierung nach Chien, Hrones und Reswick

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.

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* ( $X_p$ )



**Abb. 8**  
Proportionalbereich

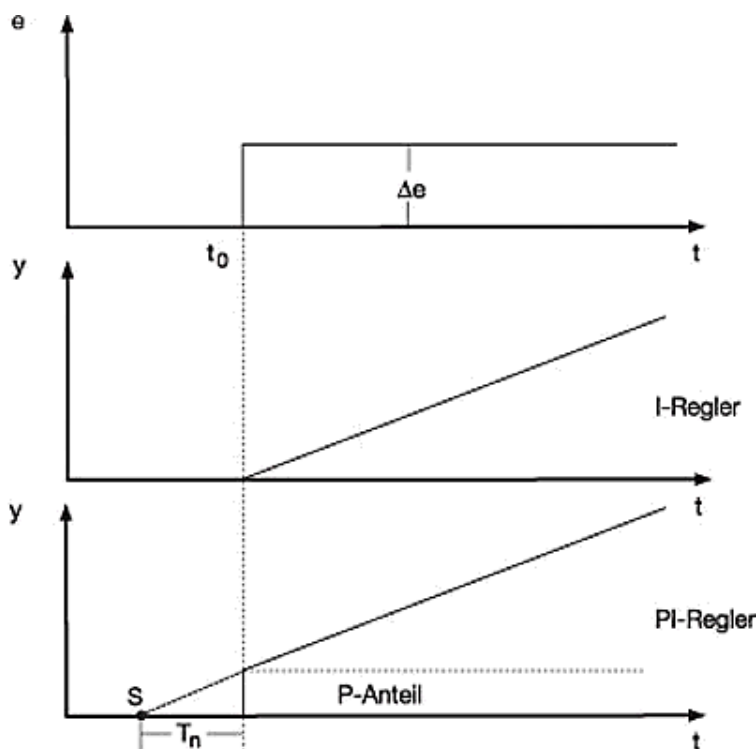
proportional zur Regelabweichung. Über den Proportionalbereich lässt sich die Verstärkung des Reglers an die Regelstrecke anpassen.

Der Proportionalbereich (auch als P-Band bezeichnet) ist jener Bereich der Regelgröße, bei der die Stellgröße den Bereich 0 bis 100 % durchläuft. Wird ein kleiner Proportionalbereich gewählt, so reicht schon eine kleine Regelabweichung aus, um einen Stellgrad von 100 % zu erreichen, d. h. die Verstärkung 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 Reglerstell-



**Abb. 9**  
Sprungantwort eines PI-Reglers

grades, solange bis der Istwert den Sollwert erreicht. Je größer die Regeldifferenz ist, desto rascher wirkt sich 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.

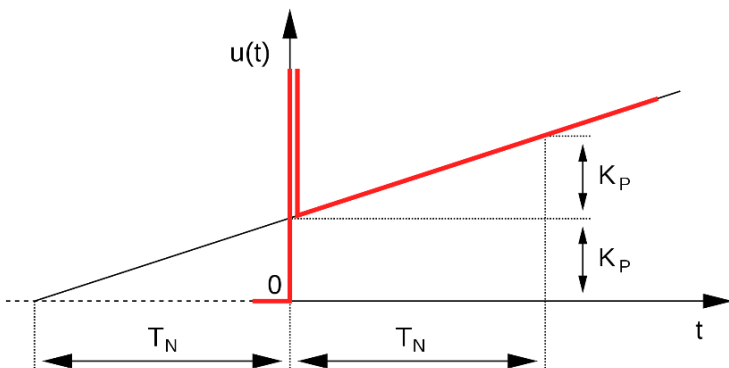
### 4.5 Was versteht man unter der Vorhaltezeit?

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

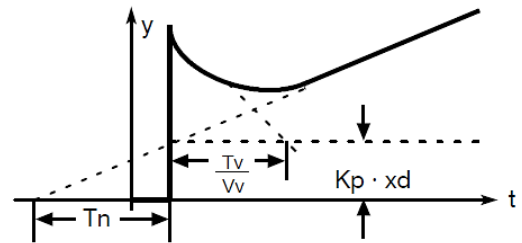


verhindert damit ein Überschwingen der Regelgröße.

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



**Abb. 10**  
Sprungantwort des idealen PID-Reglers



**Abb. 11**  
Sprungantwort des realen PID-Reglers

## 5 Stabilität von Regelkreisen

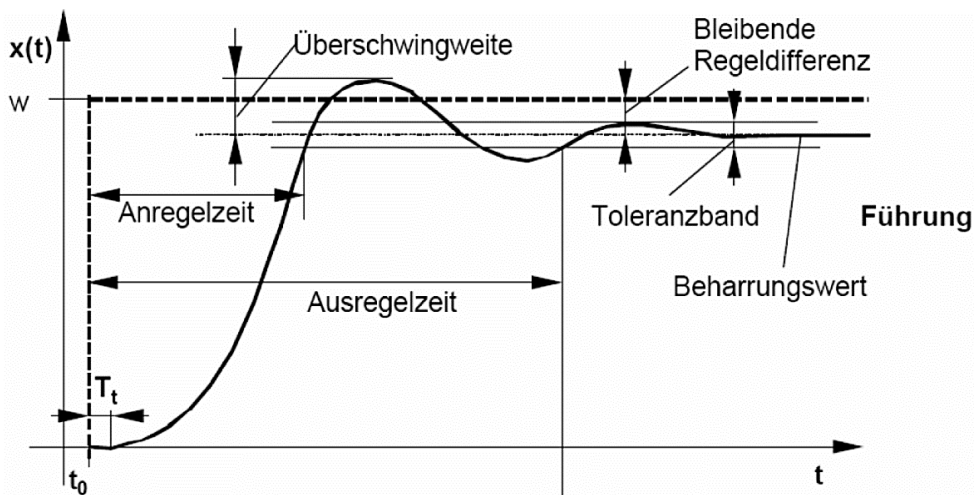
Für einen Regelkreis gelten folgende Bedingungen:

- 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

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



**Abb. 12**  
Übergangverhalten einer  $PT_2$ -Regelstrecke

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.

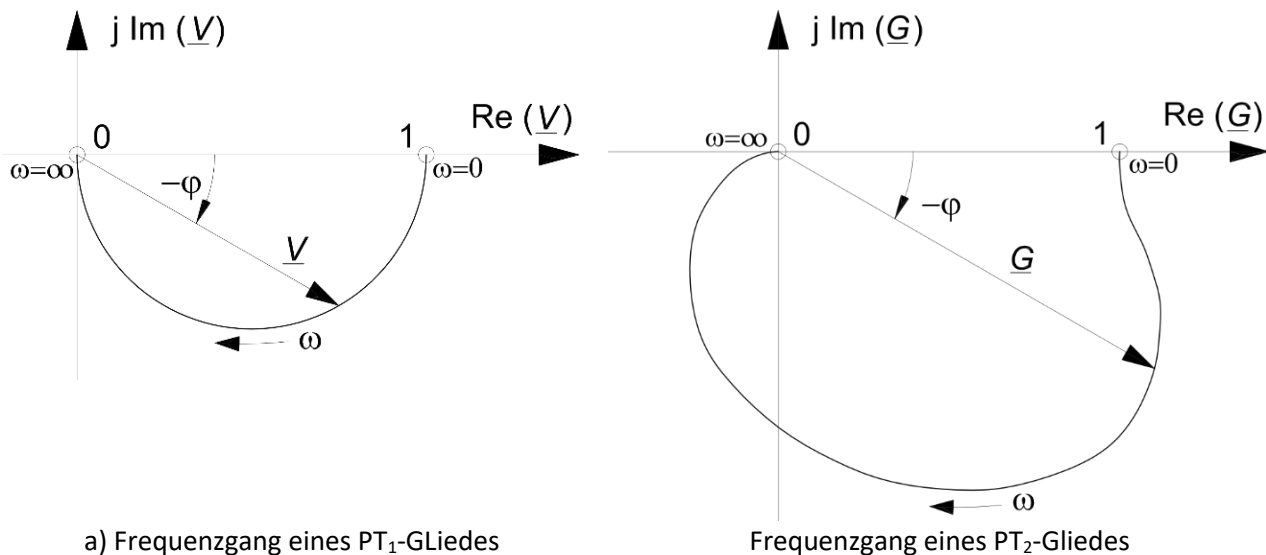
$$x_e(t) = \hat{x}_e \cdot \sin(\omega t) \quad x_a(t) = \hat{x}_a(\omega) \cdot \sin(\omega t + \varphi)$$

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. 13**  
Ortskurven von PT<sub>n</sub>-Gliedern<sup>2</sup>

Die Ortskurve des Frequenzgangs wird in der Regelungstechnik auch *Nyquist-Diagramm* genannt. Aus dem Kurvenverlauf lassen sich wichtige Schlussfolgerungen gewinnen.

Es gilt das *Nyquist-Kriterium*:

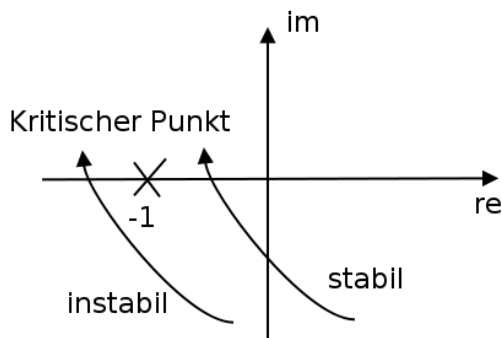
«Ist der offene Regelkreis stabil, so ist der geschlossene Regelkreis genau dann stabil, wenn die

<sup>2</sup> [https://de.wikipedia.org/wiki/Ortskurve\\_\(Systemtheorie\)](https://de.wikipedia.org/wiki/Ortskurve_(Systemtheorie))



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.



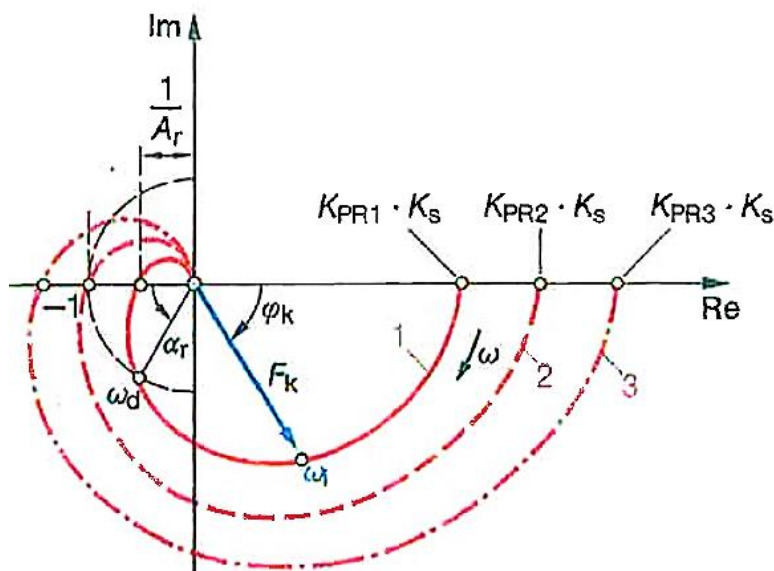
Der kritische Punkt, an dem die Phasendrehung 180° erreicht, befindet sich bei -1 auf der reellen Achse.

**Abb. 14**

Vereinfachtes Nyquist-Kriterium

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 sich dieser links, so verläuft der Einschwingvorgang des geschlossenen Regelkreises hinreichend gedämpft.

2) Instabilität → Ein Rückkopplungssignal, das als Gegenkopplung wirken soll, besitzt grundsätzlich eine Phasenverschiebung von 180° 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. 15**

Nyquist-Diagramm<sup>3</sup>

Zum Abgleich des Reglers sind zwei Kenngrößen, Phasenrand und Amplitudenrand zu beach-

<sup>3</sup> Paetzold: Mess- und Regelungstechnik (Christiani).

ten.

► 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 Ursprungsgeraden durch den *Durchtrittspunkt* ( $\omega_d$ ) auf der Ortskurve mit dem Abstand 1 zum Ursprung (Schnittpunkt mit dem Einheitskreis) und der reellen Achse.

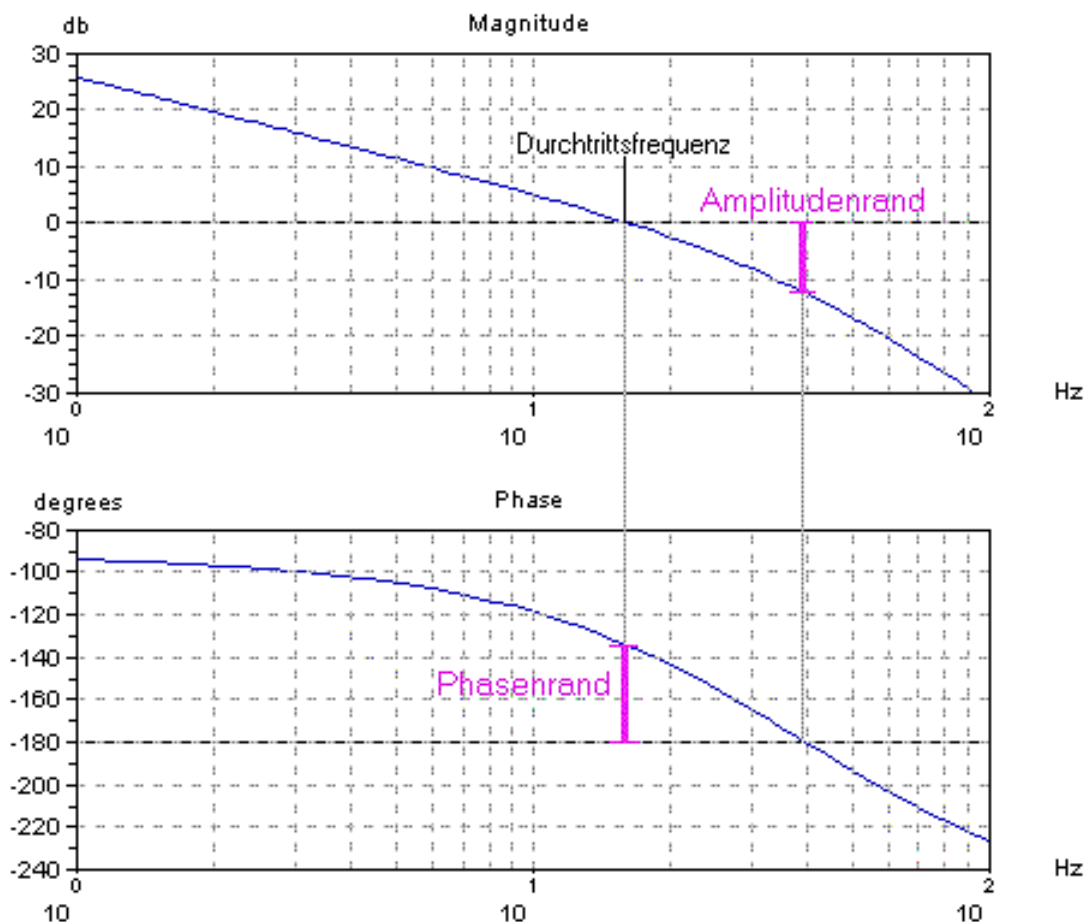
► Der *Amplitudenrand* (Amplitudenreserve) zeigt an, um welchen Faktor die Regelstrecke verstärkt werden darf, um noch stabil zu sein.

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

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

## 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.



**Abb. 16**  
Bode-Diagramm<sup>4</sup>

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

<sup>4</sup> <https://rn-wissen.de/wiki/index.php/Regelungstechnik>

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 Diagrammen 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.

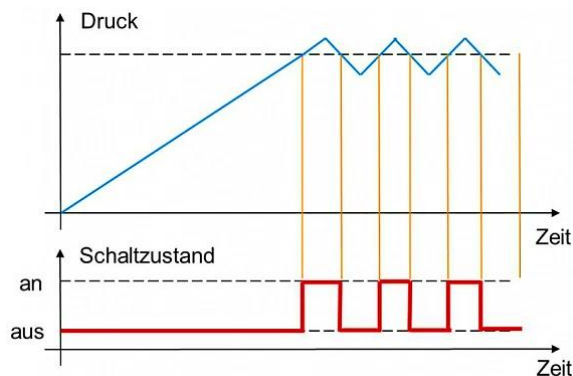
► Der *Phasenrand* ist der Abstand (Phasenreserve) zur  $-180^\circ$ -Linie bei der Durchtrittsfrequenz. Eine kleine Phasenreserve bedeutet ein starkes Überschwingen und lange Überschwingdauer.

► Die *Durchtrittsfrequenz* ( $\omega_d$ ) ist diejenige Frequenz, bei der der *Amplitudengang* durch die 0 dB-Linie geht.

## 6 Praxisbeispiele

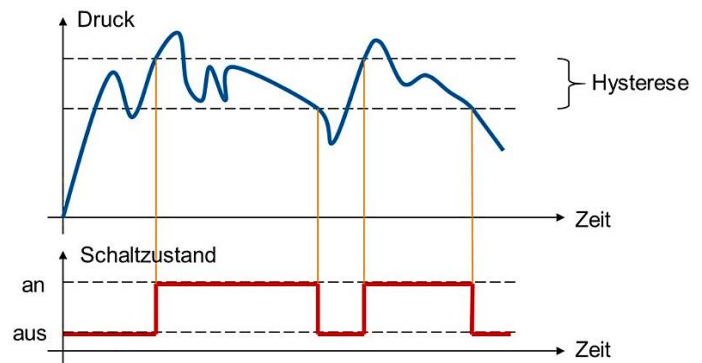
### 6.1 Druckregelung mit einem Zweipunkt-Regler

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. 17**

Druckregelung ohne Hysterese



**Abb. 18**

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 Rückschaltpunkte, d.h. eine definierte *Hysterese*, um einen stabilen Regelkreis zu realisieren.

Mechanische Schalter besitzen bedingt durch ihren konstruktiven Aufbau eine vordefinierte Schalthysterese, die in der Herstellerspezifikation zu finden ist. Diese liegt in der Regel bei 10 bis 20 % des eingestellten Schaltpunktes (z. B. 10 bar Schaltpunkt, 1 bar Hysterese). Ausnahmen bilden mechanische Druckschalter, bei denen die Hysterese eingestellt werden kann. Bei einem elektronischen Schalter ist die Hysterese in der Regel nahezu über den gesamten Messbereich frei konfigurierbar, mittels einer externen Software, einem Konfigurationsmodul oder über ein integriertes

Display mit Bedientasten.<sup>5</sup>

## 6.2 Drehzahlregelung mit einem PID-Regler

Der Drehzahlregelkreis besteht aus dem Drehzahlregler und der Regelstrecke. Die Regelstrecke 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 Stromsollwert verwendet, der dem Drehmoment proportional ist. Der unterlagerte Stromregelkreis sorgt für eine schnelle Einprägung des Stromes und damit des gewünschten Motordrehmomentes. Für die Betrachtungen zur Drehzahlregelung kann der Stromregelkreis vereinfacht durch ein  $PT_1$ -Glieder mit einer kleinen Verzögerungszeitkonstante nachgebildet werden.

Um den Antrieb definiert auf seine Betriebsdrehzahl hochzufahren bzw. von dieser wieder stillzusetzen, wird ein rampenförmiger 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 Drehzahlrampen ist je nach Anwendungsfall einstellbar.

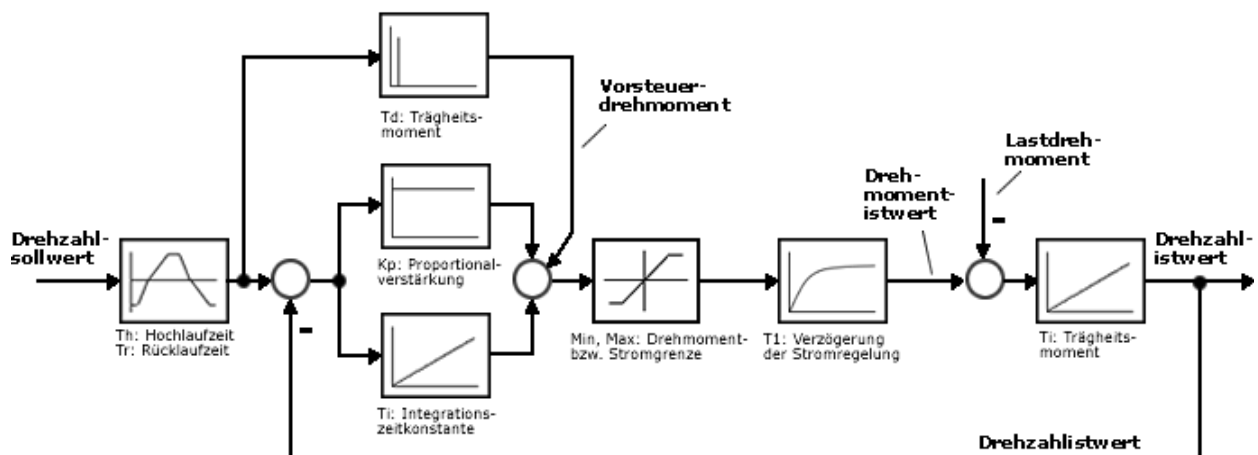


Abb. 19  
Drehzahlregelung<sup>6</sup>

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 Sollmoment, 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

<sup>5</sup> <https://blog.wika.de/know-how/schaltfunktion-hysteresse-bei-elektronischen-druckschaltern/>

<sup>6</sup> [http://www.servotechnik.de/fachwissen/regelung/f\\_beitr\\_00\\_607.htm](http://www.servotechnik.de/fachwissen/regelung/f_beitr_00_607.htm)

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 Sollmoment zur Verfügung, das für die Beschleunigung des Antriebes benötigt wird.

## **7 Verweise**

### **7.1 Books**

Peter Busch: Elementare Regelungstechnik (Vogel Fachbuch)

Thomas Beier, Petra Wurl: Regelungstechnik (Hanser)

Peter Orlowski: Praktische Regelungstechnik (Springer Vieweg)

Hans-Werner Philippsen: Einstieg in die Regelungstechnik (Hanser)

### **7.2 Firmenhandbücher**

Jumo: Regelungstechnik. Grundlagen und Tipps für den Praktiker

Samson: Regler und Regelstrecken

Siemens: Regeltechnik

### **7.3 Weblinks**

<http://www.el-gor.at/>

<https://elektroniktutor.de/>

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

[http://www.kramann.info/62\\_Regelungssysteme/](http://www.kramann.info/62_Regelungssysteme/)

<http://www.dt77.gmxhome.de/Daten/Regelungstechnik/Hilfe.htm>

### **7.4 YouTube**

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