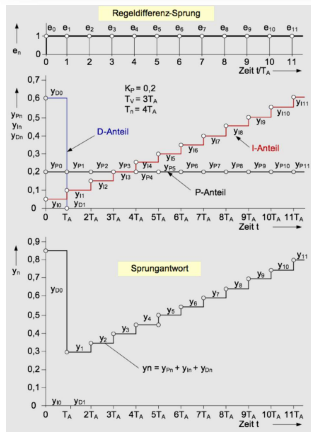


PID-Stellungsalgorithmus *PID-设置算法*



aus der Gleichung des *analogen* PID-Reglers

$$y = K_P \left(e + \frac{1}{T_n} \int e dt + T_v \cdot \frac{de}{dt} \right)$$

扫描时间

wird bei *digitaler* Regelung mit Abtastzeit T_A zum Zeitpunkt $n \cdot T_A$

$$y_n = K_P \left[e_n + \frac{T_A}{T_n} \sum_{i=0}^n e_i + \frac{T_v}{T_A} (e_n - e_{n-1}) \right]$$

$e_0, e_1, e_2, \dots, e_n$ sind dabei die Regeldifferenzen zu den Abtastzeitpunkten $0, T_A, 2 \cdot T_A, \dots, n \cdot T_A$; $e_1 = 0$ (Anfangswert) *比例-积分-微分-者的和*

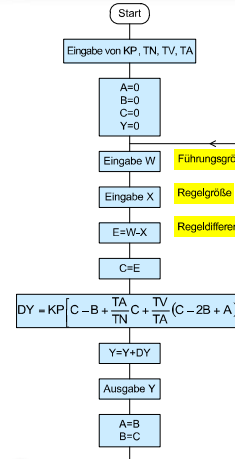
P-Anteil bleibt, aus *Integration* wird *Summation* (I-Anteil), aus *Differenziation* wird *Differenzenbildung* (D-Anteil)

Sprungantwort Summe von P-, I- und D-Anteil

Hinweis: leicht in Form einer zyklischen Schleife programmierbar

Sprungantwort des digitalen PID-Reglers

PID-Geschwindigkeitsalgorithmus *PID-速度算法*



Nachteil des Stellungsalgorithmus: Summation über *alle* bisherigen Regeldifferenzen e_0, \dots, e_n für y_n recht aufwändig; es genügt aber, folgende Differenz zu berechnen:

$$\begin{aligned} \Delta y_n &= y_n - y_{n-1} \\ &= K_P \left[e_n + \frac{T_A}{T_n} \sum_{i=0}^n e_i + \frac{T_v}{T_A} (e_n - e_{n-1}) \right] \\ &\quad - K_P \left[e_{n-1} + \frac{T_A}{T_n} \sum_{i=0}^{n-1} e_i + \frac{T_v}{T_A} (e_{n-1} - e_{n-2}) \right] \\ &= K_P \left(e_n - e_{n-1} + \frac{T_A}{T_n} e_n + \frac{T_v}{T_A} (e_n - 2e_{n-1} + e_{n-2}) \right) \end{aligned}$$

es werden also nur die *Zuwachswerte* der Stellgröße in jedem Zyklus ermittelt und aufaddiert

$$y_n = y_{n-1} + \Delta y_n$$

只适用于该定值 增加的情况

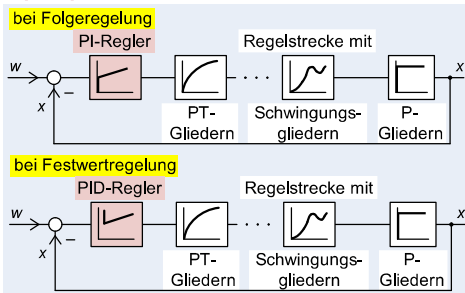
Flussdiagramm mit $e_n \triangleq C, e_{n-1} \triangleq B, e_{n-2} \triangleq A$

3.4 Auswahl und Einstellung von Reglern (1/2)



Regelung von P-Strecken

调节器的选择与整定



P-Strecken: enthalten ein oder mehrere Verzögerungsglieder, bleiben aber Strecken mit *Ausgleich*

PID-Regler: wenn die Führungsgröße weitgehend konstant bleibt (*Festwertregelung*) *恒值控制*

P-Strecken: 有许多控制器 但是有差控制系统 *跟踪控制*

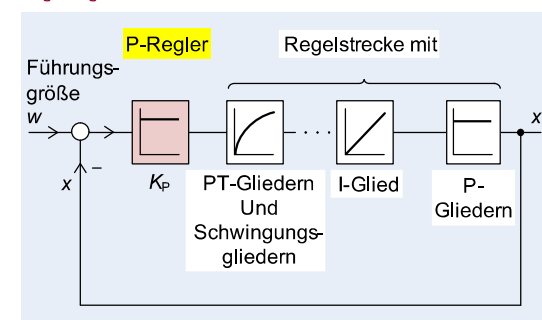
PI-Regler: wenn die Führungsgröße sich sehr schnell ändert (*Folgeregelung*)

D-Anteil würde bei schneller Änderung zum *Übersteuern* führen

3.4 Auswahl und Einstellung von Reglern (2/2)



Regelung von I-Strecken



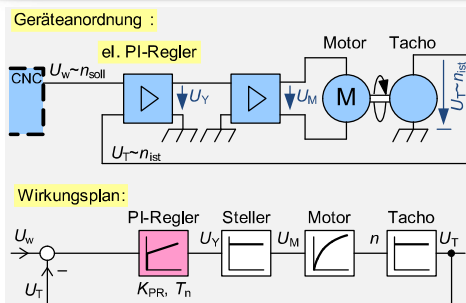
I-Strecken: enthalten mindestens ein I-Glied und sind daher Strecken *ohne Ausgleich*

meist Einsatz von *P-Reglern*, teilweise auch PI- oder PD-Regler

至少存在一个积分环节 是无差控制系统

I-Anteile und D-Anteile können aber leicht zu *Instabilität* führen

Beispiel: Drehzahlregelung mit PI-Regler (1/2)



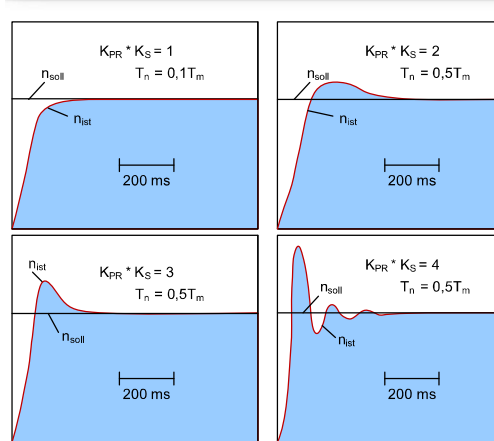
Motor als *PT₁-Strecke* modellierbar, Steller und Tacho (Sensor) als zusätzliche *P-Glieder*

P-Strecke mit *Folgeregelung* \Rightarrow *PI-Regler*

Darstellung als Wirkungsplan

Gesamtverstärkung \triangleq Produkt der Einzelverstärkungen

Beispiel: Drehzahlregelung mit PI-Regler (2/2)

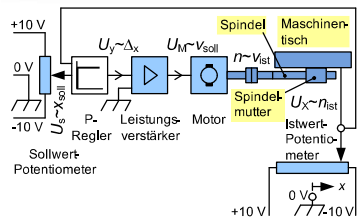


Sprungantwort bei verschiedenen *PI-Reglereinstellungen* (Zeitkonstante des Motors: $T_m = 100$ ms)

optimale Einstellung von Proportionalbeiwert K_{PR} und Nachstellzeit T_n bei PI-Reglern *schwierig* zu finden (Einschwingvorgänge)

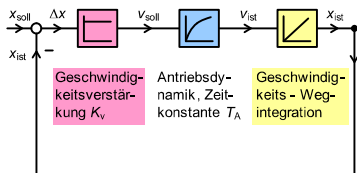
Hinweis: große Verstärkung $K_{PR} \cdot K_S$ und kleine Werte für Nachstellzeit T_n führen zu schnellerem Anstieg, aber auch zu *Überschwingen*

Beispiel: Lageregelung mit P-Regler (1/2)



ein Maschinentisch soll über einen Motor mit Spindel so geregelt werden, dass seine Position x (Istwert) möglichst genau der Führungsgröße w (Sollwert) entspricht, d.h. **Folgeregelung**

Regelgröße y : Geschwindigkeit des Motors

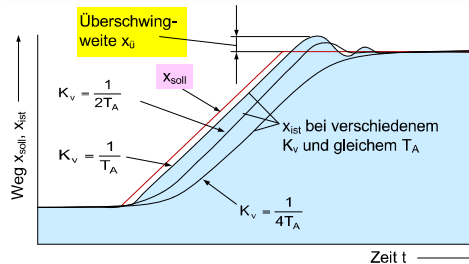


Strecke besteht aus PT_1 - und I -Glieder, also insgesamt **I -Strecke**

⇒ Lageregelung mit **P -Regler**

$$K_v = \frac{v_{soll}}{\Delta x}$$

Beispiel: Lageregelung mit P-Regler (2/2)



Strecke besteht aus PT_1 - und I -Glieder, also insgesamt **I -Strecke**
⇒ Lageregelung mit **P -Regler**

K_v : Geschwindigkeitsverstärkung des Reglers
 v : Vorschubgeschwindigkeit
 Δx : $x_{soll} - x_{ist}$ Lageregeldifferenz

K_v **niedrig** ⇒ langsamer Anstieg, kein Überschwingen
 K_v **hoch** ⇒ schneller Anstieg, aber Überschwingen

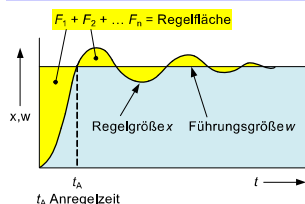
$$K_v = \frac{v_{soll}}{\Delta x}$$

Einstellregeln **整定规则**



Parameter von Reglern **schwierig** so einzustellen, dass sich ein **optimales** Regelverhalten ergibt

参数很难设置 要有最佳的调节行为



Regelgüte schwer allgemein zu definieren, da stark anwendungsabhängig

Beispiele:
minimale Regelfläche F der Sprungantwort;
 $\int (w-x)^2 dt$ Methode der kleinsten Fehlerquadrate

Voraussetzung: hier **Überschwingen** erlaubt, was nicht bei allen Anwendungen zutrifft
es gibt **heuristische** Verfahren (Einstellregeln), wie man Regler möglichst gut einstellen kann

aber: nachoptimieren per Hand meist unvermeidlich
不会避免手动重新优化

Achtung: *调节器也可能不稳定, d.h. permanent schwingen, was auf jeden Fall vermieden werden muss 要避免持续的摆动*

Stabilitätsnachweise mit fortgeschrittenen Verfahren der Regelungstechnik auch formal möglich

Reglereinstellung nach Ziegler und Nichols (Z&N)



Ziegler - Nichols 1-整定法

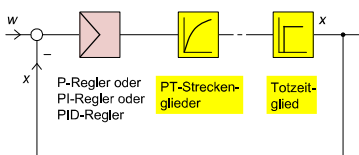
zunächst nur **P -Regler** verwenden und K_{PR} so lange erhöhen, bis der Regelkreis bei $K_{PR \text{ krit}}$ anfängt zu **schwingen** (Dauerschwingung)

Ermittlung der **Periodendauer** T_P der Schwingung
1. 将积分和微分增益设为0 2. 比例增益从0开始增加 达到极限增益KPRkrit

Wahl der Einstellung gemäß

P-Regler:	$K_{PR} \approx 0,5 K_{PR \text{ krit}}$
PI-Regler:	$K_{PR} \approx 0,45 K_{PR \text{ krit}}, T_n \approx 0,85 T_P$
PID-Regler:	$K_{PR} \approx 0,6 K_{PR \text{ krit}}, T_n \approx 0,5 T_P, T_v \approx 0,12 T_P$

3. 按照下表, 设置积分和微分增益



besonders geeignet für PT_1 -Strecken (mit Totzeit) *适用于PT1控制系统*

gutes Störverhalten, aber starke Schwingungsneigung bei sprungförmiger Änderung der Führungsgröße

Reglereinstellung nach Chien, Hrones und Reswick (CHR)

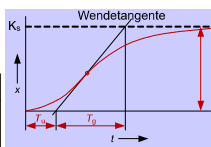


Ermittlung der **Ersatzgrößen** K_s , T_u und T_g für **P -Strecken höherer Ordnung** aus der Sprungantwort *CHR-自整定方法, 适用于高阶P-控制系统*

Ermittlung der Reglerparameter nach folgender Tabelle:

aperiodische Regelvorgänge mit kürzester Dauer

Typ	Führung <i>伺服</i>	Störung <i>调节</i>
P-Regler	$K_p \approx 0,3 \cdot \frac{T_g}{T_u \cdot K_s}$	$K_p \approx 0,3 \cdot \frac{T_g}{T_u \cdot K_s}$
PI-Regler	$K_p \approx 0,35 \cdot \frac{T_g}{T_u \cdot K_s}$ $T_n \approx 1,2 \cdot T_g$	$K_p \approx 0,6 \cdot \frac{T_g}{T_u \cdot K_s}$ $T_n \approx 4 \cdot T_u$
PID-Regler	$K_p \approx 0,6 \cdot \frac{T_g}{T_u \cdot K_s}$ $T_n \approx 1 \cdot T_g$ $T_v \approx 0,5 \cdot T_u$	$K_p \approx 0,95 \cdot \frac{T_g}{T_u \cdot K_s}$ $T_n \approx 2,4 \cdot T_u$ $T_v \approx 0,42 \cdot T_u$



Sprungantwort P -Strecke höherer Ordnung

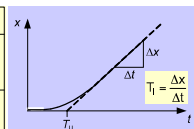
0% 过冲情况

Reglereinstellung nach Chien, Hrones und Reswick (CHR) (2/2)



20% Überschwingen mit kleinster Schwingungsdauer

Typ	Führung <i>伺服</i>	Störung <i>调节</i>
P-Regler	$K_p \approx 0,7 \cdot \frac{T_g}{T_u \cdot K_s}$	$K_p \approx 0,7 \cdot \frac{T_g}{T_u \cdot K_s}$
PI-Regler	$K_p \approx 0,6 \cdot \frac{T_g}{T_u \cdot K_s}$ $T_n \approx 1 \cdot T_g$	$K_p \approx 0,7 \cdot \frac{T_g}{T_u \cdot K_s}$ $T_n \approx 2,3 \cdot T_u$
PID-Regler	$K_p \approx 0,95 \cdot \frac{T_g}{T_u \cdot K_s}$ $T_n \approx 1,35 \cdot T_g$ $T_v \approx 0,47 \cdot T_u$	$K_p \approx 1,2 \cdot \frac{T_g}{T_u \cdot K_s}$ $T_n \approx 2 \cdot T_u$ $T_v \approx 0,42 \cdot T_u$



Sprungantwort I -Strecke (mit P -Anteil)

20% 过冲情况

einfaches Verfahren, universell einsetzbar;
auch für **I -Strecken (mit P -Anteil)** anwendbar mit $K_s = 1$ und $T_g = T_i$

besonders für gutes Führungs- und Störverhalten bei P -Strecken höherer Ordnung geeignet

von großer praktischer Bedeutung



适用于数字化调节的TCA整定方法

in Anlehnung an das CHR-Verfahren
unter zusätzlicher Berücksichtigung der Abtastzeit T_A

Typ	K_R	T_n	T_v
P-Regler	$\frac{T_g}{T_u + T_A} \cdot \frac{1}{K_S}$	—	—
PI-Regler	$\frac{0,9 \cdot T_g}{T_u + 0,5 \cdot T_A} \cdot \frac{1}{K_S}$	$3,3 \cdot (T_u + 0,5 \cdot T_A)$	—
PID-Regler	$\frac{1,2 \cdot T_g}{T_u + 0,5 \cdot T_A} \cdot \frac{1}{K_S}$	$2 \cdot (T_u + 0,5 \cdot T_A)$	$0,5 \cdot (T_u + 0,5 \cdot T_A)$

K_S , T_u , T_g siehe CHR-Verfahren

ähnliche Eigenschaften wie CHR,
aber bei großen Abtastzeiten T_A Gefahr von Schwingungen



theoretisch sehr gut untersuchtes Gebiet, aber **mathematisch** aufwändig
(Differentialgleichungen, Laplace-Transformation etc.)

formale Stabilitätsbeweise möglich, optimale Reglerdimensionierung aber auch mit fortgeschrittenen Verfahren schwierig

in der **Praxis** meist **P-, PI oder PID-Regler** mit Dimensionierung durch **Einstellregeln nach Z&N, CHR, TCA** und **Nachoptimierung** per Hand

rechengestützte Verfahren zur **Reglersimulation** und -dimensionierung

Trend zu **digitalen Reglern** mit Mikrocontrollern oder SPSen

komplexere Reglerstrukturen für anspruchsvolle Aufgaben (z.B. **Kaskadenregler**)

adaptive Regler für zeitvariante Strecken

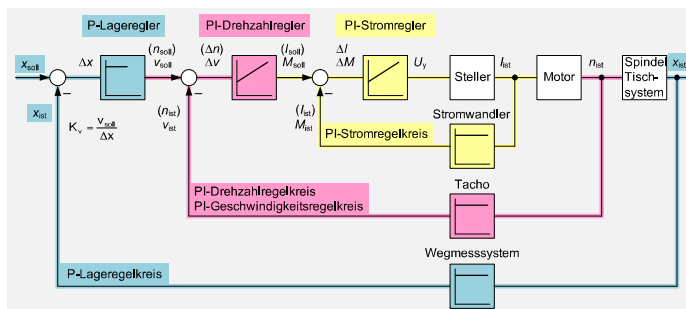
Fuzzy Control für schwierige, auch nichtlineare Strecken



Kaskadenregler 主从调节控制



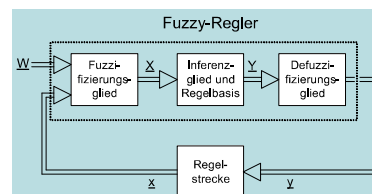
Beispiel: Lageregelung einer NC-Maschine



mehrere, ineinander geschachtelte Regler zur Nachbesserung des Reglerverhaltens,
hier: **P-Lageregler** außen, dann **PI-Drehzahlregler** in der Mitte, **PI-Stromregler** innen;
Festlegung der Regelparameter von innen nach außen



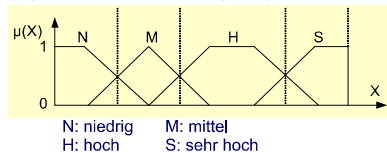
Fuzzy-Regler (Fuzzy Control) 模糊控制



Fuzzifizierung: 模糊化
Zuordnung von linguistischen Variablen zu Führungsgröße w und Regelgröße x mittels Zugehörigkeitsfunktionen

模糊推理 规则库
Inferenzglied und Regelbasis:
unscharfes Schließen (Fuzzy Inferenz) mittels WENN-DANN-Regeln (Regelbasis)

linguistische Variable mit Zugehörigkeitsfunktion



Defuzzifizierungsglied: 解模糊
Bilden einer scharfen Ausgangsgröße (Regelgröße y) aus den unscharfen Ausgangsgrößen der Regelbasis



Beispiel: Einfache Fuzzy Temperaturregelung



Fuzzy Regelbasis:

WENN Temperatur = niedrig	DANN Heizung = auf
WENN Temperatur = mittel	DANN Heizung = unverändert
WENN Temperatur = hoch	DANN Heizung = zu

Achtung: es sind im Allg. -durch die unscharfen Variablen- **mehrere** Regeln gleichzeitig **verschieden stark** erfüllt (Ausgangsvariablen auch unscharf)

ist die Temperatur z.B. etwas niedriger als der gewünschte Mittelwert,
ist außer der zweiten auch die erste Regel etwas erfüllt

die **Defuzzifizierung** sorgt dann dafür, dass die Heizung etwas mehr aufgedreht wird,
d.h. sanfter Übergang zwischen den Regeln

oft **erstaunlich gute Ergebnisse**, besonders für mit klassischen Methoden nur schwierig beherrschbare nichtlineare Strecken

Regelbasen-Einstellung erfordert **Expertenwissen** über die Strecke;
heute **etablierte Standardmethode** mit guter Werkzeugunterstützung

