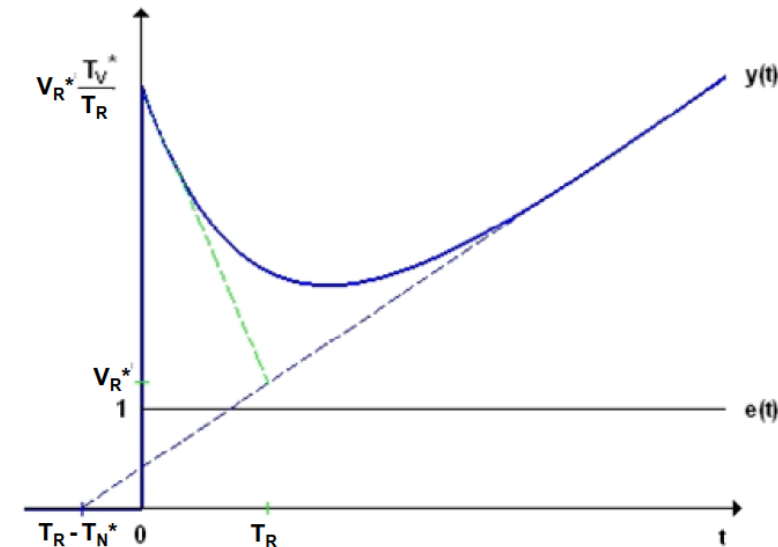
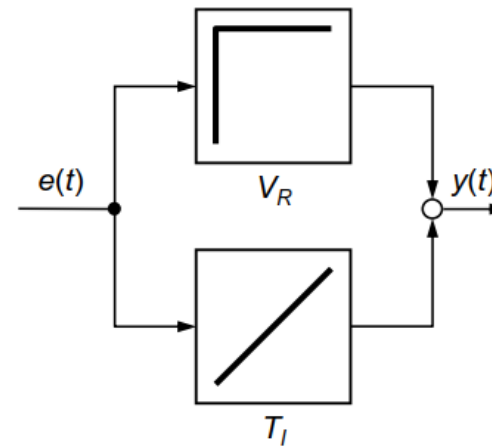
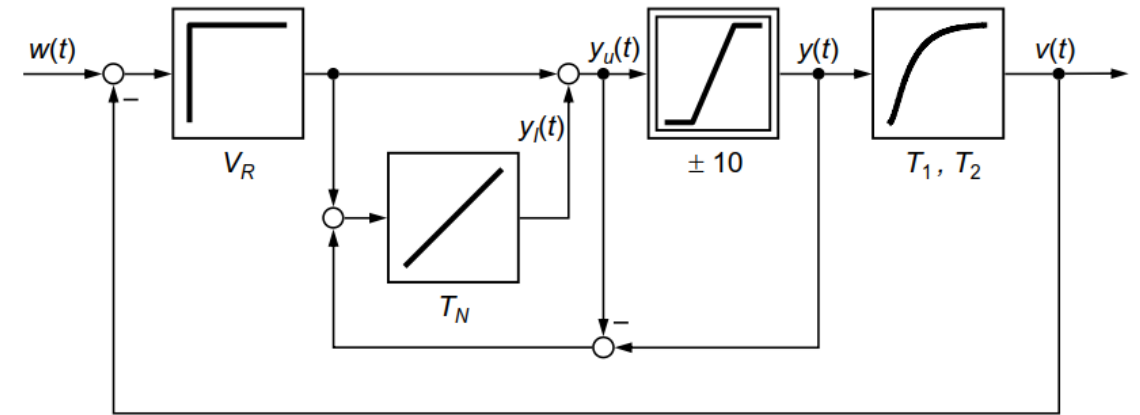
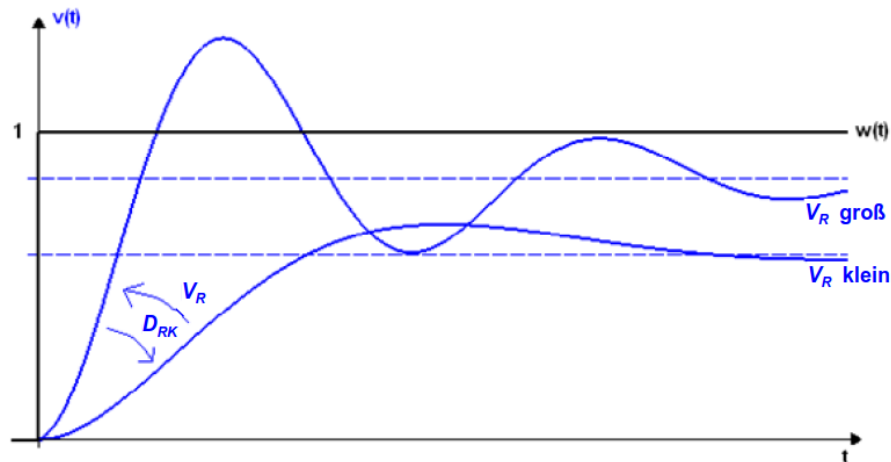


Regelungstechnik

für BEI4, BMEI4 und IBT

Prof. Dr. B. Wagner

$$\underline{\underline{G_R(s) = \frac{\frac{Z_W(s)}{N_W(s)}}{\frac{Z_S(s)}{N_S(s)} \cdot \left(1 - \frac{Z_W(s)}{N_W(s)}\right)}} = \frac{Z_W(s) \cdot N_S(s)}{Z_S(s) \cdot (N_W(s) - Z_W(s))}}$$



Kap. 5 Regler und Regelkreise Teil 1: Standard-Regler (P, I, PI, PD / PDT₁, PID / PIDT₁)

Stabilität

=> Klingen alle Eigenschwingungen des Regelkreises ab?

Robustheit

=> Ist der Regelkreis unempfindlich gegen Parameterschwankungen?

Stationäre Eigenschaften

=> Strebt die Regelgröße für $t \Rightarrow \infty$ gegen den Sollwert?

=> Oder gibt es eine bleibende Regelabweichung?

=> (Getrennte) Betrachtung bei Störungen und Sollwertänderungen!

Dynamische Eigenschaften

=> Wie schnell sind Übergangsvorgänge abgeklungen?

=> Sind Überschwinger akzeptabel?

Software-Tools (BORIS, Matlab-Simulink, TIA-Portal...)



PID-Regler

☒ PID Blockname:

OK

Abbrechen

Hilfe

PID-Parameter Begrenzung

P-Anteil

Proportionalbeiwert KP: ☒ Ein

I-Anteil

Nachstellzeit Ti (TN): ☒ Ein

Anfangswert:

D-Anteil

Vorhaltezeit Td (TV): ☒ Ein

Verzögerungszeit TVz:

☒ Festwert
☐ *Td

☐ Exportieren

Blockkommentar

☒ Aus Parametern erzeugen (☐ incl. Legende)
☐ Benutzerdefinierter Text:

Position: ☒ Oben ☐ Unten

☐ Betriebsart "Regler" ☐ Ausgänge für yP, yI, yD

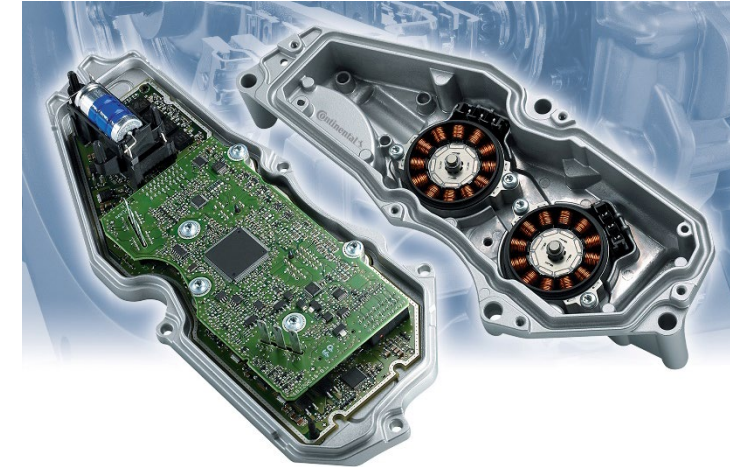
„Kompaktregler“

Wachendorff URDR PID Temperaturregler, 2 x Relais
Ausgänge, 24 → 230 V ac/dc, 72 x 90mm

RS Best.-Nr.: 819-9735 | Herst. Teile-Nr.: URDR0001 | Marke: Wachendorff



Kfz-Steuergerät (z. B. Getriebesteuergerät)



„Standard-Regler“ = PID-Familie

P-Regler mit PT_1 -/ PT_2 -/ PT_n - Strecke

⇒ Stationäres und dynamisches Verhalten

I-Regler

⇒ Stationär genau, jedoch (sehr) langsamer Regelkreis

Der PI-Regler

⇒ DER Standard-Regler überhaupt

Der PD- und der PDT_1 -Regler

⇒ Das Prinzip der „Pol-Nullstellen-Kompensation“

⇒ Beschleunigung einer Regelung

Der PID- und der $PIDT_1$ -Regler

⇒ Unterschiedliche Formen (additiv / multiplikativ)



PID-Regler

Blockname: PID

OK

Abbrechen

Hilfe

PID-Parameter

Begrenzung

P-Anteil

Proportionalbeiwert KP: 1 ☒ Ein

I-Anteil

Nachstellzeit Ti (TN): 1 ☒ Ein

Anfangswert: 0

D-Anteil

Vorhaltezeit Td (TV): 1 ☒ Ein

Verzögerungszeit TVz: 0.001

☒ Festwert

☐ * Td

☐ Exportieren

Aus Zwischenablage

Blockkommentar

☒ Aus Parametern erzeugen (☐ incl. Legende)

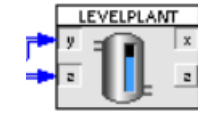
☐ Benutzerdefinierter Text:

Position: ☒ Oben ☐ Unten

☐ Betriebsart "Regler"

☐ Ausgänge für yP, yI, yD

Füllstands-Regelstrecke „LEVELPLANT“ aus BORIS (Bibliothek „Regelstrecken“)



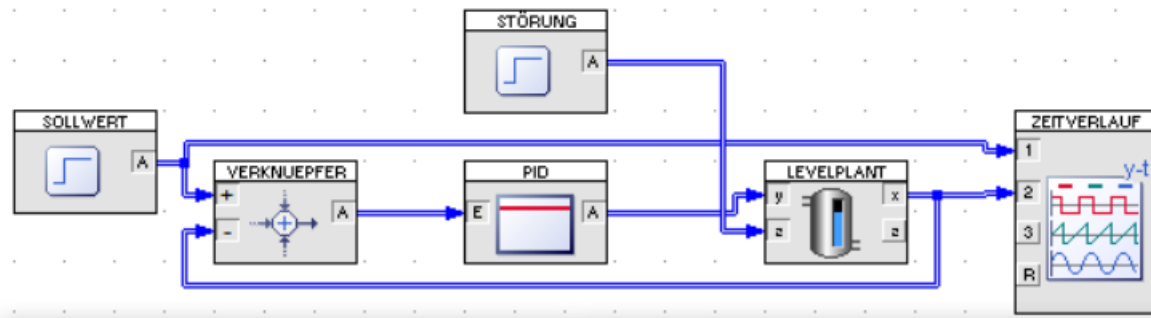
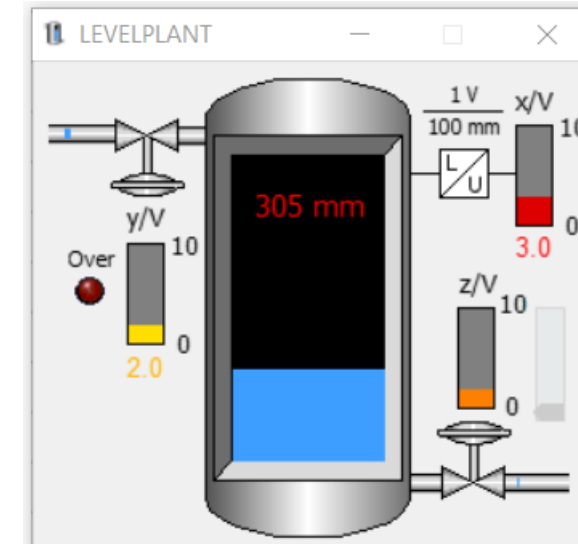
Eingangsgröße: Ventilansteuersignal 0 ... 10 V

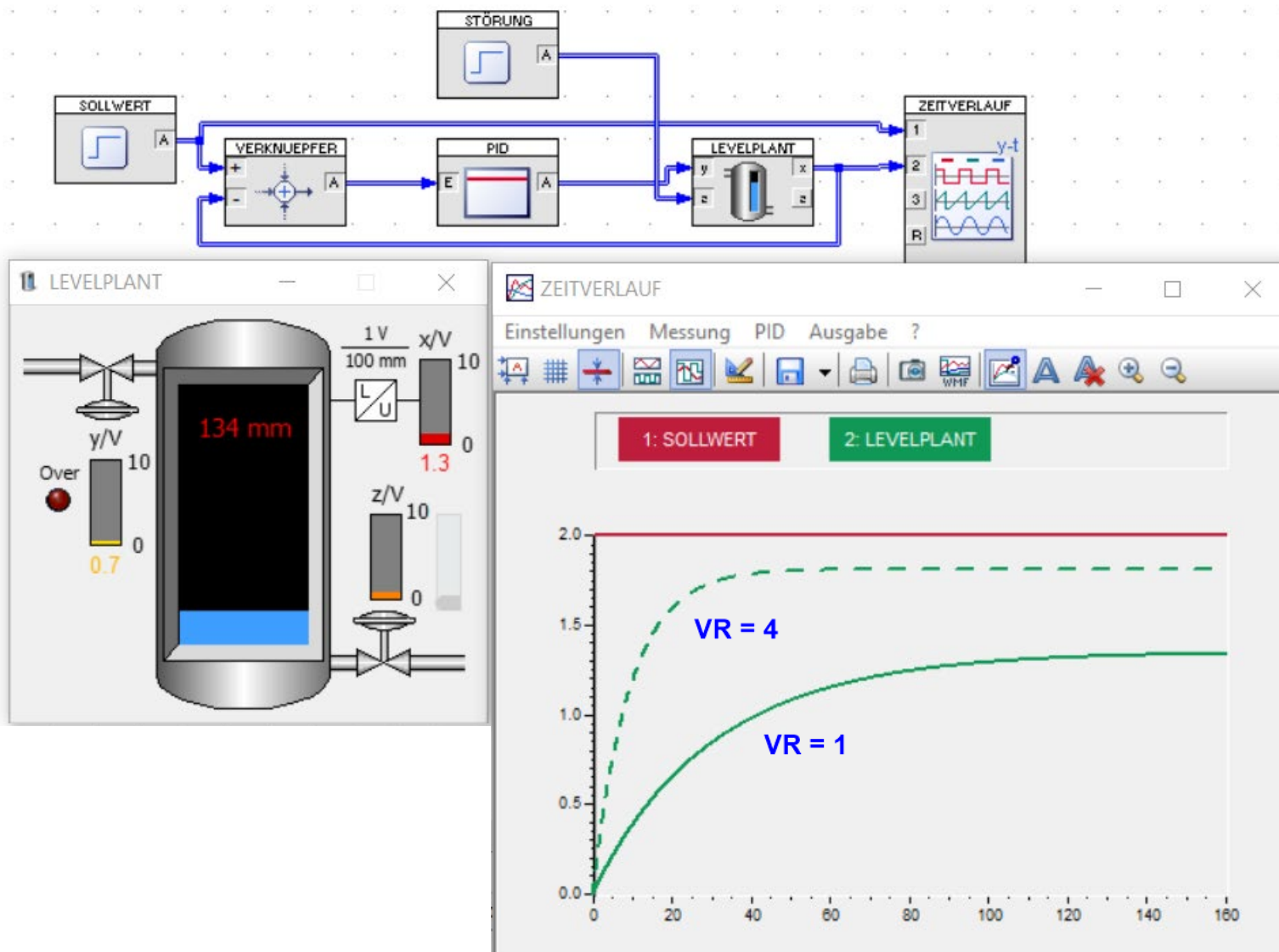
Ausgangsgröße: Füllstands-Messsignal 0 ... 10 V

Störgröße: Abflussventil 0 ... 10 V

Verhalten: „nichtlineares PT_1 “ (bei geöffnetem Ausfluss)

Regelung mit einem P-Regler





stationäres Verhalten wird mit steigendem VR besser, die bleibende Regelabweichung sinkt

dynamisches Verhalten wird mit steigendem VR besser, schnelleres Einschwingen, kein Überschwingen

Analytische Rechnung: P-Regler für PT₁-Regelstrecke

Betrachte Führungsverhalten $G_W(s)$

Gegeben:

$$G_R(s) = V_R$$

$$G_S(s) = V_S / (1 + sT_S)$$

Gesucht:

$$G_W(s) = (V_R * V_S) / (1 + sT_S + V_R * V_S)$$

⇒ Systemtyp von $G_W(s)$? PT1

⇒ $G_W(s)$ auf Standardform bringen! $(V_R * V_S / (1 + V_R * V_S)) / (1 + s * (T_S / (1 + V_R * V_S)))$

V_W = Zähler (immer < 1)

$T_W = T_S / (1 + V_R * V_S)$ (immer kleiner T_S)

⇒ Ist der geschlossene Regelkreis stabil?

mit V_R steigendem sinkt T_W

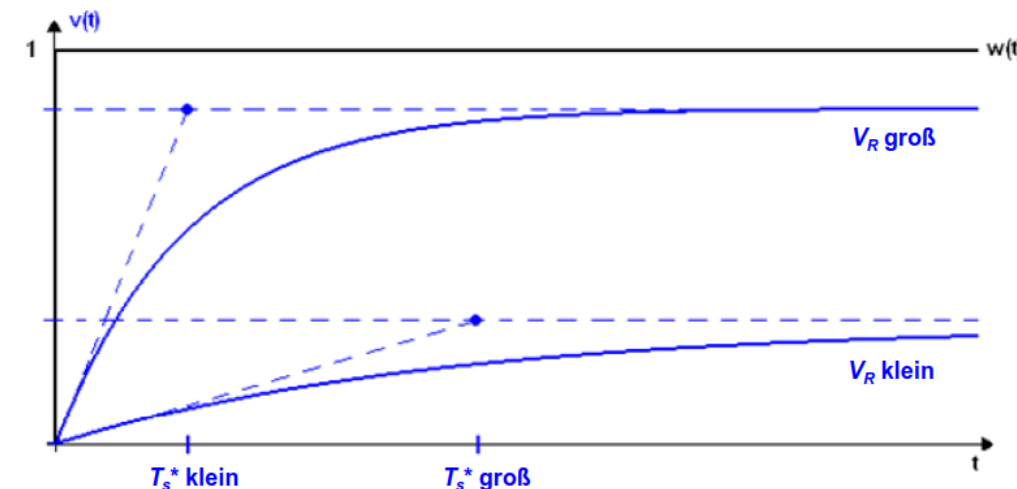
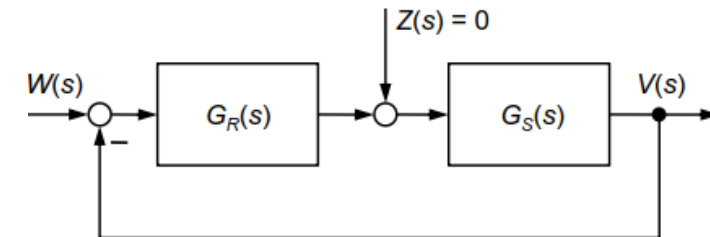
⇒ Endwert der Führungssprungantwort?

stets kleiner 1

strebt für $V_R \rightarrow \infty$ gegen 1

mit steigendem V_R sinkt bleibende Regelabweichung

mit steigendem V_R wird Regelkreis schneller



Analytische Rechnung: **P-Regler für PT₂-Regelstrecke**
Betrachte Führungsverhalten $G_W(s)$

Gegeben: $G_R(s) = V_R > 0$

Gesucht:

$$G_S(s) = \frac{V_S}{1 + s \frac{2D_S}{\omega_0 S} + s^2 \frac{1}{\omega_0 S^2}} \rightarrow G_W(s) = \frac{\frac{V_S V_R}{1 + s \frac{2D_S}{\omega_0 S} + s^2 \frac{1}{\omega_0 S^2}}}{1 + \frac{V_S V_R}{1 + s \frac{2D_S}{\omega_0 S} + s^2 \frac{1}{\omega_0 S^2}}} = \frac{V_S V_R}{1 + V_S V_R + s \frac{2D_S}{\omega_0 S} + s^2 \frac{1}{\omega_0 S^2}}$$

$$= \dots \frac{\frac{V_S V_R}{1 + V_S V_R}}{1 + \frac{2D_S}{\omega_0 S (1 + V_S V_R)} s + \frac{1}{\omega_0 S^2 (1 + V_S V_R)} s^2}$$

⇒ Systemtyp von $G_W(s)$? **PT2**

Analytische Rechnung: P-Regler für PT₂-Regelstrecke

Betrachte Führungsverhalten $G_W(s)$

⇒ $G_W(s)$ auf Standardform bringen (Koeffizientenvergleich)

$$V_{RK} = \frac{V_S V_R}{1 + V_S V_R}$$

(wie PT1 mit P-Regler)

$$D_{RK} = \frac{D_S}{\sqrt{1 + V_S V_R}}$$

Regelkreis schwächer gedämpft als die unregelte Strecke; mit steigendem VR sinkt DRK; Schwingneigung nimmt zu

$$\omega_{0RK} = \omega_{0S} \cdot \sqrt{1 + V_S V_R}$$

$$\frac{\frac{V_S V_R}{1 + V_S V_R}}{1 + \frac{2D_S}{\omega_{0S}(1 + V_S V_R)}s + \frac{1}{\omega_{0S}^2(1 + V_S V_R)}s^2}$$

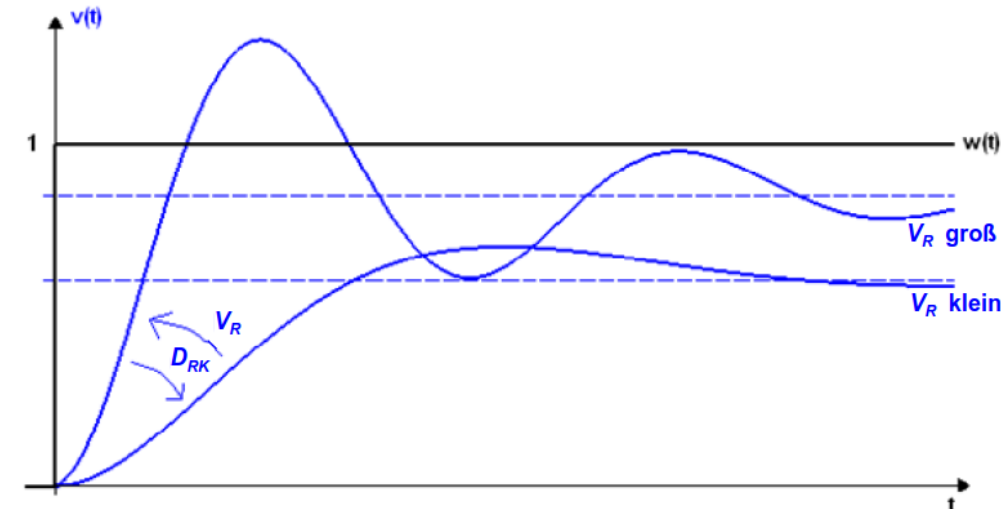
⇒ Ist der geschlossene Regelkreis stabil?

ja für alle VR

⇒ Endwert der Führungssprungantwort?

$$a(\infty) = G_W(0) = V_{RK} \rightarrow < 1$$

für steigendes VR: 1. bleibende Regelabweichung sinkt (gut)
2. Schwingneigung steigt (schlecht)



Verallgemeinerung: P-Regler für PT_n -Regelstrecke

Betrachte Führungsverhalten $G_W(s)$ und Störverhalten $G_Z(s)$

Gegeben:

$$G_R(s) = V_R \quad G_S(s) = \frac{V_S}{1+sa_1+s^2a_2+\dots}$$

Gesucht:

$$G_W(s) = \frac{\frac{V_S V_R}{1+sa_1+s^2a_2+\dots}}{1+\frac{V_S V_R}{1+sa_1+s^2a_2+\dots}} = \frac{\frac{V_R V_S}{1+V_R V_S}}{1+s\frac{a_1}{1+V_R V_S}+s^2\frac{a_2}{1+V_R V_S}+\dots}$$

$$G_Z(s) = \frac{\frac{V_S}{1+sa_1+s^2a_2+\dots}}{1+\frac{V_S V_R}{1+sa_1+s^2a_2+\dots}} = \frac{\frac{V_S}{1+V_R V_S}}{1+s\frac{a_1}{1+V_R V_S}+s^2\frac{a_2}{1+V_R V_S}+\dots}$$

⇒ Systemtyp von $G_W(s)$

und von $G_Z(s)$

⇒ Stationärer Endwert der Führungssprungantwort: $\frac{V_R V_S}{1+V_R V_S}$ wie PT1 u. PT2 (mit P-Regler)

⇒ Stationärer Endwert der Störsprungantwort: $\frac{V_S}{1+V_R V_S}$

⇒ Ist der Regelkreis stabil?

ab $n=3$ von V_R abhängig --> Kapitel 6

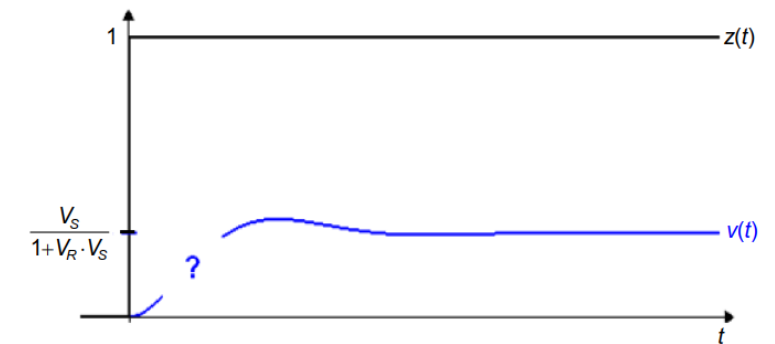
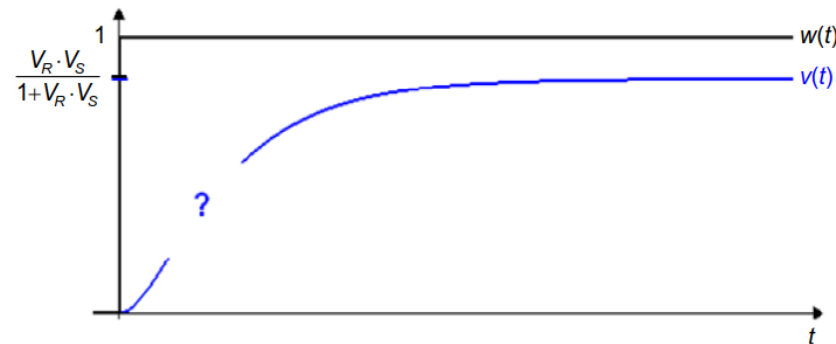
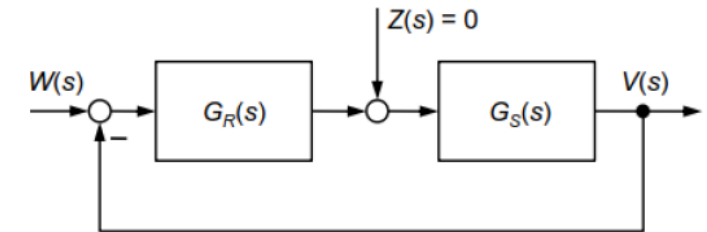
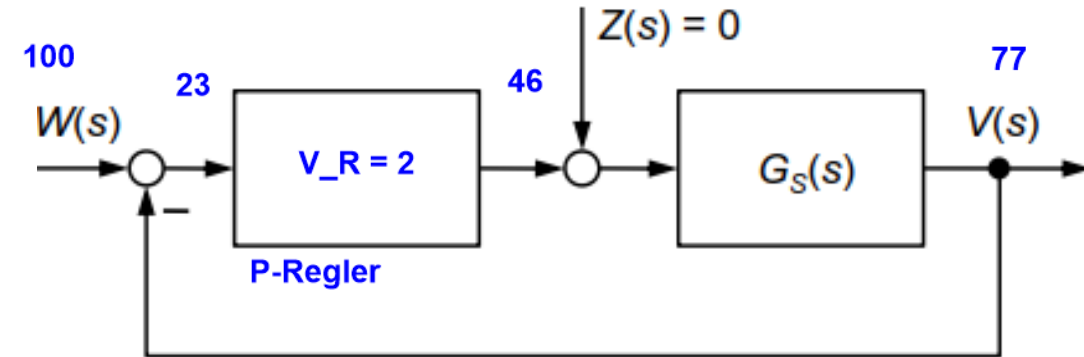


Bild 5-1: P-Regler mit PT_n -Strecke, Sprungantwort des Führungsverhaltens

Bild 5-2: P-Regler mit PT_n -Strecke, Sprungantwort des Störverhaltens

"Der P-Regler braucht eine Regelabweichung $e(t) \neq 0$, um am Ausgang ein Stellsignal $y(t) \neq 0$ auszugeben."

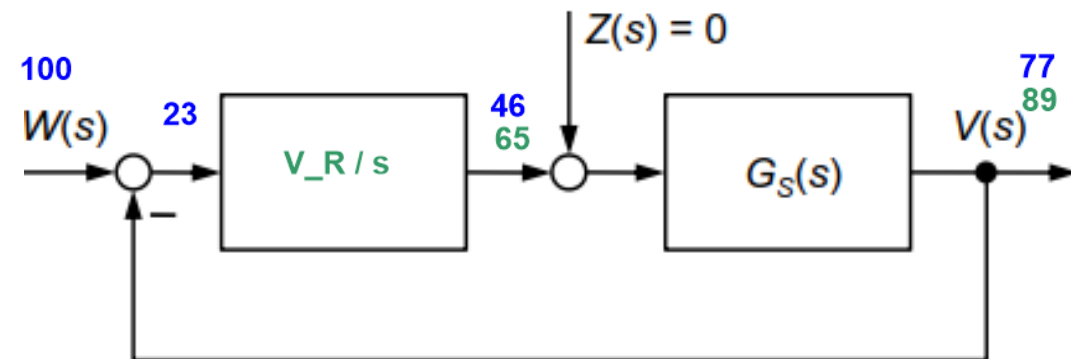
(Da $e(t)$ einfach nur mit V_R multipliziert wird)



Idee: verwende Integrator als Regler:

"Der Integrator integriert so lange, bis sein Eingangssignal $e(t) = w(t) - v(t) = 0$ ist!"

--> keine bleibende Regelabweichung ($e(t) \rightarrow \infty = 0$) im Führungsverhalten (gut)



Analytische Rechnung: I-Regler für PT_1 -Regelstrecke

Betrachte Führungsverhalten $G_W(s)$

Gegeben:

Gesucht:

$$G_R(s) = VR/s \quad G_S(s) = VS/(1+sTS) \quad G_W(s) = \dots = 1/(s^2(TS/VR*VS) + s(1/VR*VS) + 1)$$

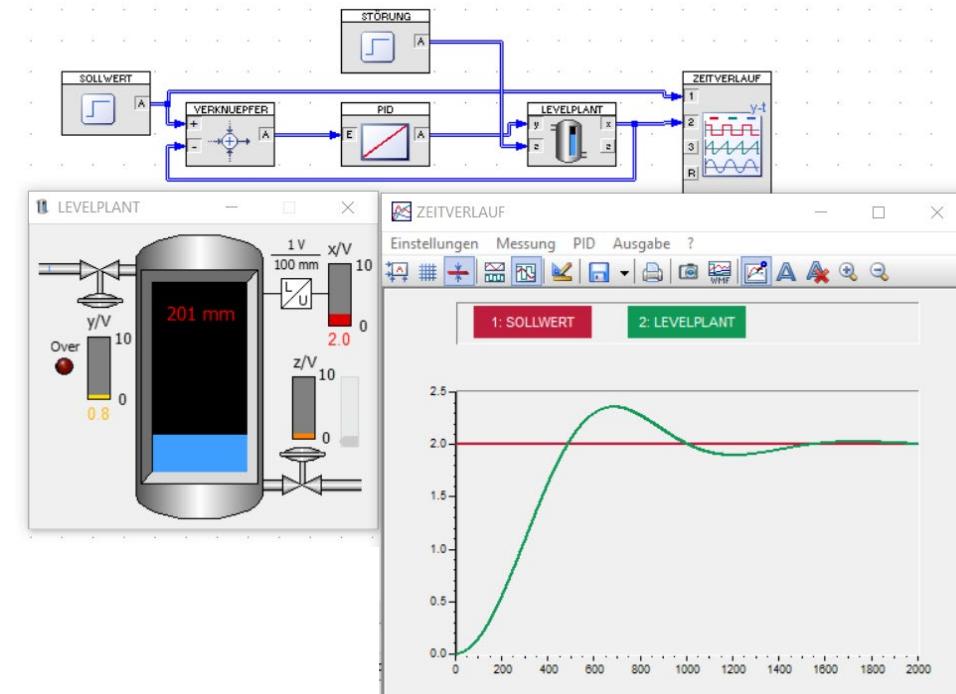
$$G_Z(s) = \dots = (s*VS) / (s^2(TS/VR*VS) + s(1/VR*VS) + 1)$$

⇒ Systemtyp von $G_W(s)$? **PT2**

⇒ Systemtyp von $G_Z(s)$? **DT2**

⇒ Endwert der Führungssprungantwort? $a(\infty) = GW(0) = 1$ (unabh. v. VR!)

⇒ Endwert der Störsprungantwort? $a(\infty) = GW(0) = 0$ (unabh. v. VR!)



P-Regler: schnellere Reaktion, aber nicht stationär genau

I-Regler: stationär genau, aber langsamere Reaktion

⇒ **Kombination der Vorteile im PI-Regler**

⇒ **PI – Regler: PARALLELschaltung von P- und I-Kanälen!**

⇒ **In der Praxis der mit Abstand am häufigsten eingesetzte Reglertyp!**

⇒ **Ungebräuchlich: Parallelstruktur**

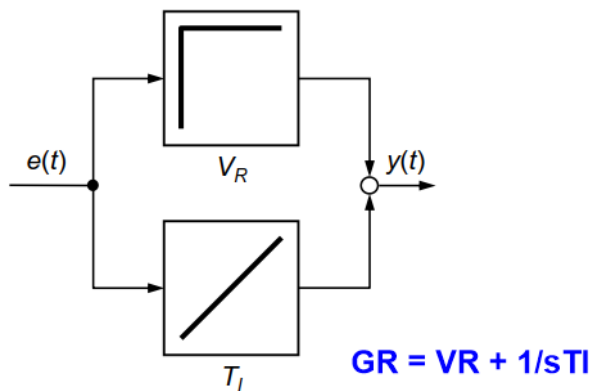


Bild 5-5: PI-Regler in Parallelstruktur

gebräuchliche Standardform: Verstärkung V_R und Nachstellzeit T_N

$$G_R(s) = V_R \left(1 + \frac{1}{sT_N} \right) = V_R \frac{1+sT_N}{sT_N}$$

NS bei $-1/T_N$

Pol bei $s = 0$ ("I-Anteil")

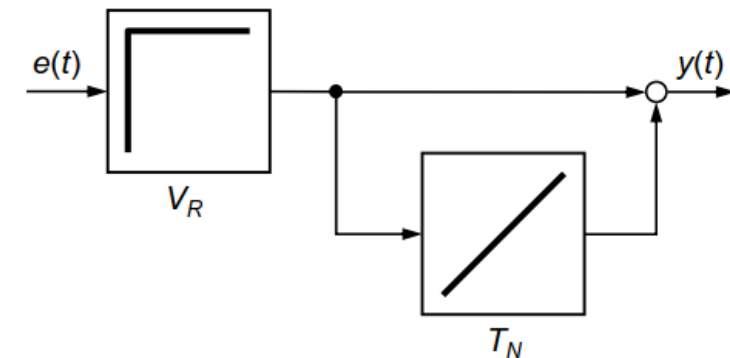


Bild 5-6: PI-Regler

$$G_R(s) = \underbrace{V_R}_P \left(1 + \underbrace{\frac{1}{sT_N}}_I \right)$$

Sprungantwort:

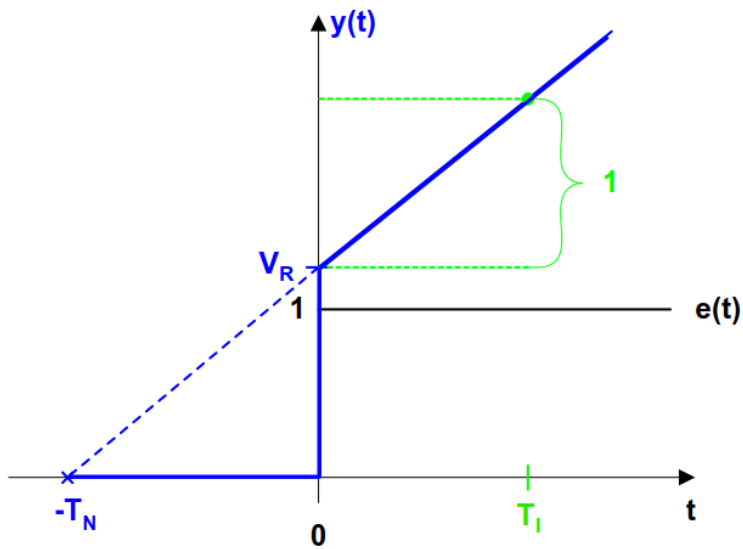
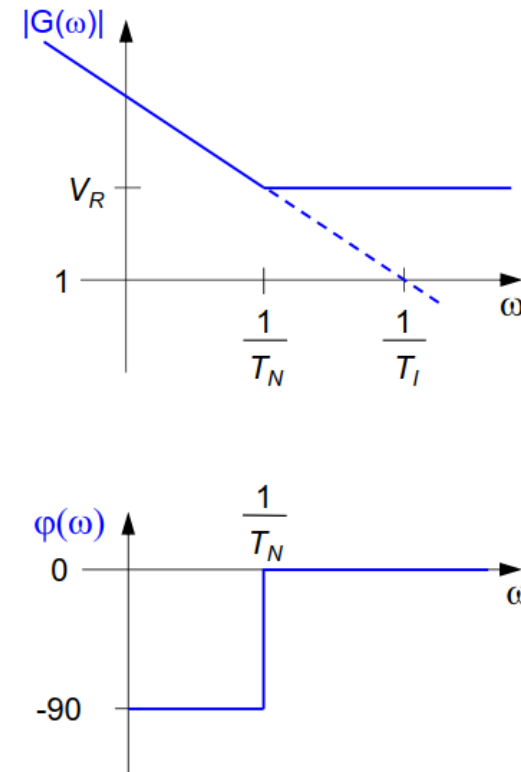


Bild 5-7: Sprungantwort des PI-Reglers

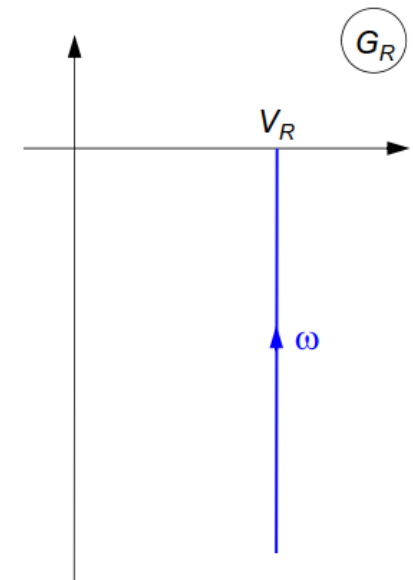
"Nachstellzeit"

Frequenzgang:

Bode-Diagramm



Ortskurve



z. B. im PD-Regler $VR * (1 + sTV)$

⇒ Schnelle Reaktion auf eine entstehende Regelabweichung auch: Bedämpfung des Regelverhaltens

⇒ $T_V =$ „Vorhaltzeit“

⇒ Idealer PD-Regler ist nicht realisierbar (Zählergrad > Nennergrad!)

⇒ Ideales Differenzieren wäre sowieso nicht wünschenswert (Messrausch-Verstärkung!)

⇒ Darum in der Praxis: PDT_1 -Regler $VR(1+sTV) / (1+sTR)$

⇒ Meist wird Reglerzeitkonstante „klein“ gewählt $\Leftrightarrow T_R \cong (0,01 \dots 0,2) T_V$

⇒ Wie wählt man die Reglernullstelle? Ein Konzept: „Kompensation“ eines (langsamen) Streckenpols

Idee: wähle Reglernullstelle gleich einer Streckenzeitkonstante

Beispiel: PD-Regler ... für PT2-Regelstrecke ... mit P-N-Kompensation

$$G_R(s) = V_R \cdot (1 + sT_V)$$

hat NS
--> wird genutzt um
Pol zu kompensieren

$$G_S(s) = \frac{V_S}{(1 + sT_{S1})(1 + sT_{S2})}$$

$$T_V = T_{S2}$$

Berechne $G_W(s) =$

wenn $T_V = T_{S2}$

$$= \frac{\frac{V_R(1 + sT_V) \cdot V_S}{(1 + sT_{S1})(1 + sT_{S2})}}{1 + \frac{V_R(1 + sT_V) \cdot V_S}{(1 + sT_{S1})(1 + sT_{S2})}} = \frac{\frac{V_R \cdot V_S}{(1 + sT_{S1})}}{1 + \frac{V_R \cdot V_S}{(1 + sT_{S1})}} = \frac{V_R V_S}{1 + V_R V_S + sT_{S1}}$$

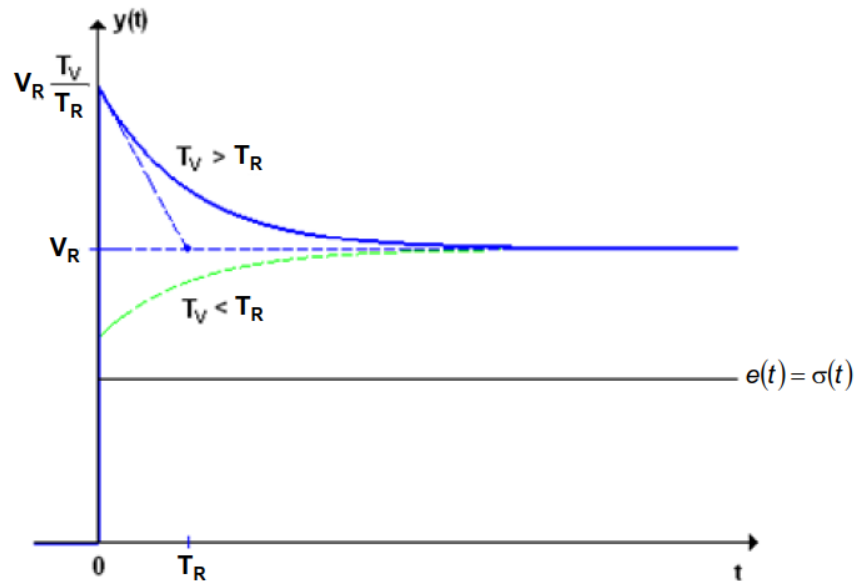
--> entspricht
PT1-Führungsverhalten
mit P-Regler
aperiodisch/nicht
schwingfähig
--> keine Überschwinger
bei großem VR:
kleine bleibende
Regelabweichung mgl

--> Kompensation führt generell zu einem günstigen Führungsverhalten

--> Störverhalten? Getrennt betrachten, ggf. "Kriechen"

$$G_R(s) = \frac{V_R(1 + sT_V)}{(1 + sT_R)}$$

Sprungantwort:



Frequenzgang:

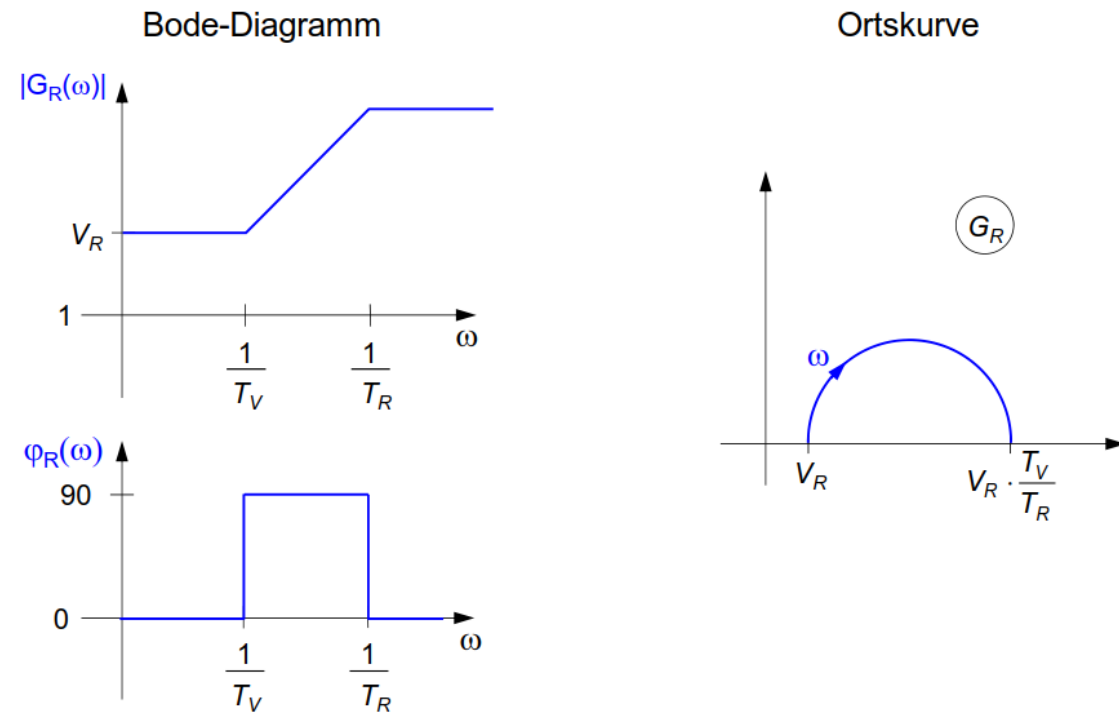


Bild 5-21: Bode-Diagramm (Asymptoten) und Ortskurve des PDT₁-Reglers

⇒ Parallelschaltung von P-, I- und D-Kanal mit Verzögerung 1. Ordnung

⇒ Vorteile: ermöglicht schnelle Reaktion und stationäre Genauigkeit

⇒ Darstellungsformen:

⇒ Parallelstruktur (PID)

$$G_{PID}(s) = V_R^* + \frac{1}{sT_I^*} + sT_D^*$$

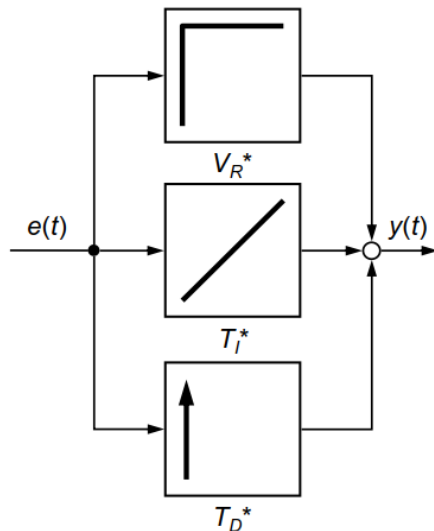


Bild 5-22: PID-Regler in Parallelstruktur

$PIDT_1$ additive Form

$$G_{RA}(s) = V_R^* \cdot \frac{1 + \frac{1}{sT_N^*} + sT_V^*}{1 + sT_R} = V_R^* \cdot \frac{s^2 T_N^* T_V^* + sT_N^* + 1}{sT_N^* (1 + sT_R)}$$

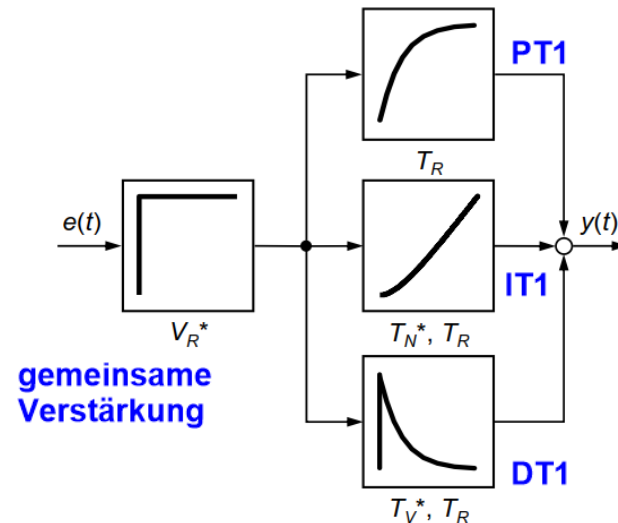
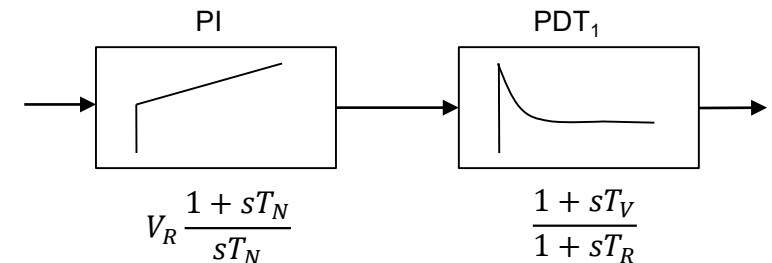


Bild 5-23: $PIDT_1$ -Regler in Parallelstruktur (additive Form)

hier auch Kompensation von komplexen Polen möglich

$PIDT_1$ multiplikative Form

$$G_{RM}(s) = V_R \cdot \frac{(1 + sT_N)(1 + sT_V)}{sT_N(1 + sT_R)} \quad \text{2 reelle NS}$$



$$G_{RA}(s) = V_R^* \cdot \frac{1 + \frac{1}{sT_N^*} + sT_V^*}{1 + sT_R} = V_R^* \cdot \frac{s^2 T_N^* T_V^* + sT_N^* + 1}{sT_N^* (1 + sT_R)}$$

$$G_{RM}(s) = V_R \cdot \frac{(1 + sT_N)(1 + sT_V)}{sT_N(1 + sT_R)}$$

Sprungantwort (additive Form):

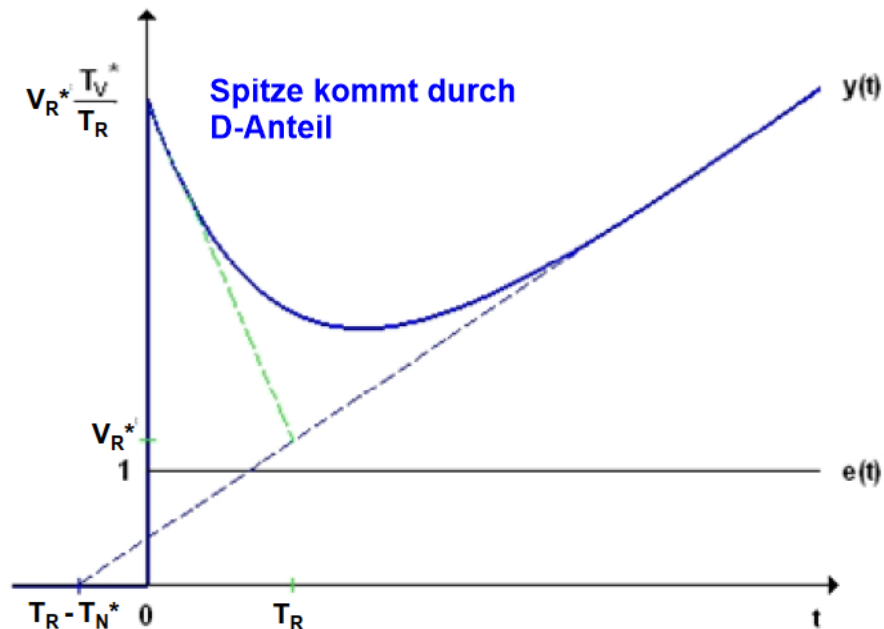


Bild 5-24: Sprungantwort des PIDT₁-Reglers

$$V_R^* = V_R \left(1 + \frac{T_V}{T_N} \right)$$

$$T_N^* = T_N \left(1 + \frac{T_V}{T_N} \right)$$

$$T_V^* = \frac{T_V}{1 + \frac{T_V}{T_N}}$$

--> Umrechnung von additiver in multiplikative Form

Frequenzgang (multiplikative Form):

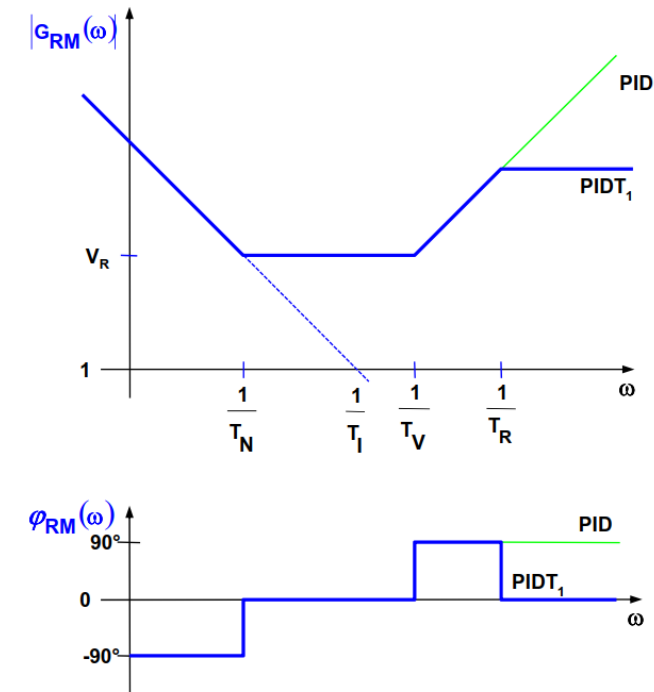


Bild 5-25: Bode-Diagramm (Asymptoten) des PID- und PIDT₁-Reglers

$$T_N = 0,5 \cdot T_N^* \left[1 + \sqrt{1 - 4 \frac{T_V^*}{T_N^*}} \right]$$

$$T_V = 0,5 \cdot T_N^* \left[1 - \sqrt{1 - 4 \frac{T_V^*}{T_N^*}} \right]$$

--> Umrechnung von additiver in multiplikative Form

P-Regler:	V_R	<ul style="list-style-type: none">+ einfach in der Implementierung+ rasche Reaktion- bleibende Regelabweichung bei PT_n-Strecken ($G_W(s)$ und $G_Z(s)$)- bei größeren Verstärkungen Schwingneigung (bei $n > 1$)
I-Regler:	VR bzw. TIR	<ul style="list-style-type: none">+ stationär genaue Regelung ($G_W(s)$ und $G_Z(s)$) durch Integration- in den meisten Anwendungen zu langsamer / zu schwach gedämpfter Regelkreis
PI-Regler:	VR, TN	<ul style="list-style-type: none">+ rasche Reaktion durch P-Anteil+ stationär genaue Regelung ($G_W(s)$ und $G_Z(s)$) durch I-Anteil+ DER Standard-Regler überhaupt (!!!)- Für manche Anwendungen zu langsamer / zu schwach gedämpfter Regelkreis
PDT₁-Regler:	VR, TV, TR	<ul style="list-style-type: none">+ sehr rasche Reaktion durch D-Anteil => sehr schnelle Regelung+ Reduktion der Schwingneigung- bleibende Regelabweichung- in manchen Anwendungen (bei Messrauschen) unruhige Regelung
PIDT₁-Regler:	V_R, T_N, T_V, T_R	<ul style="list-style-type: none">+ sehr rasche Reaktion durch P- und D-Anteil => sehr schnelle Regelung+ Reduktion der Schwingneigung durch D-Anteil+ stationär genau durch I-Anteil- aufwändigster Standard-Regler- in manchen Anwendungen (bei Messrauschen) unruhige Regelung

Umgang mit Stellsignalbegrenzungen

sehr wichtig für die Praxis

für PI-Regler – in der nächsten Lehreinheit Kapitel 5, Teil b

für PIDT1-Regler – im Praktikumsversuch 3

Der Kompensationsregler

Beispiel für einen „Nicht-Standard-Regler“

Vielmehr „modellbasierte Regelungsmethode“ \Leftrightarrow Reglertyp wird an Regelstrecke angepasst

=> in der nächsten Lehreinheit Kapitel 5, Teil b

=> in Praktikumsversuch 3

Kapitel 6 + 7: Stabilität von Regelkreisen und Reglerentwurf