

Kapitel 1 - Grundlagen

Elektrotechnisches Institut – Elektrische Antriebe und Leistungselektronik

Vorlesung

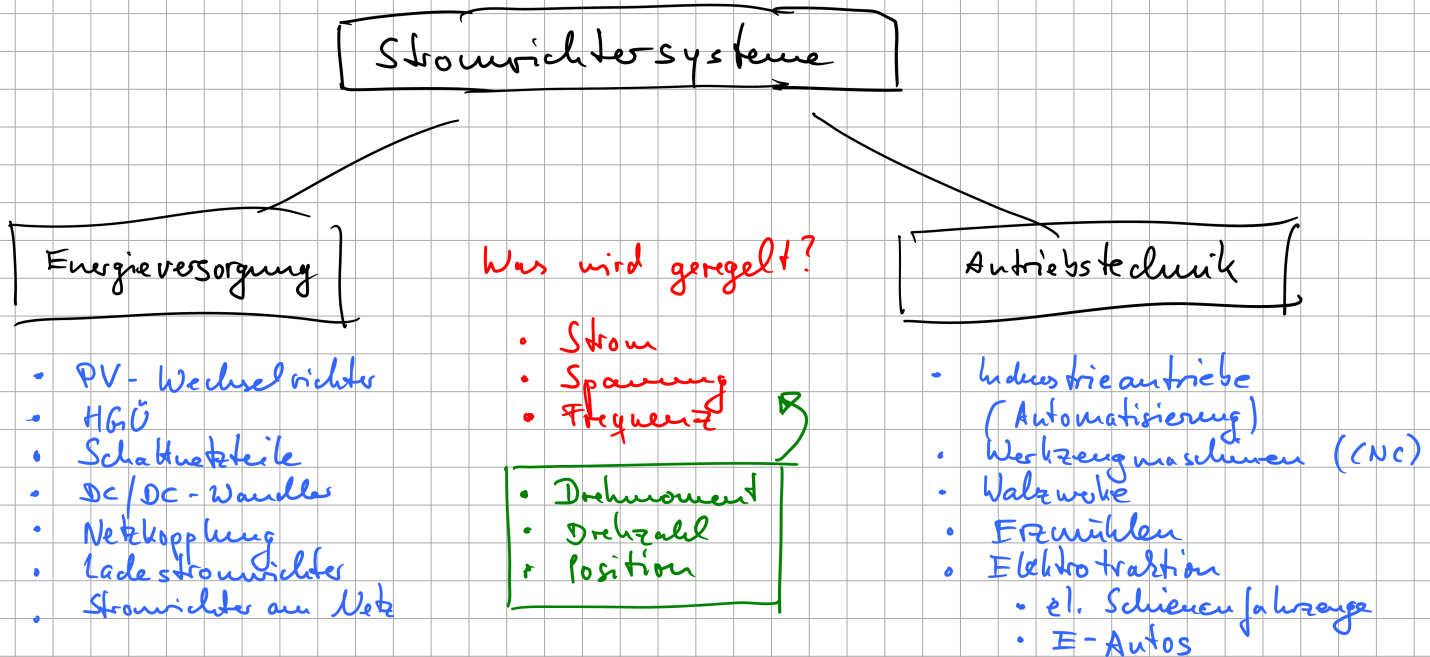
Regelung Leistungselektronischer Systeme

Sommersemester 2022

Dr.-Ing. Andreas Liske

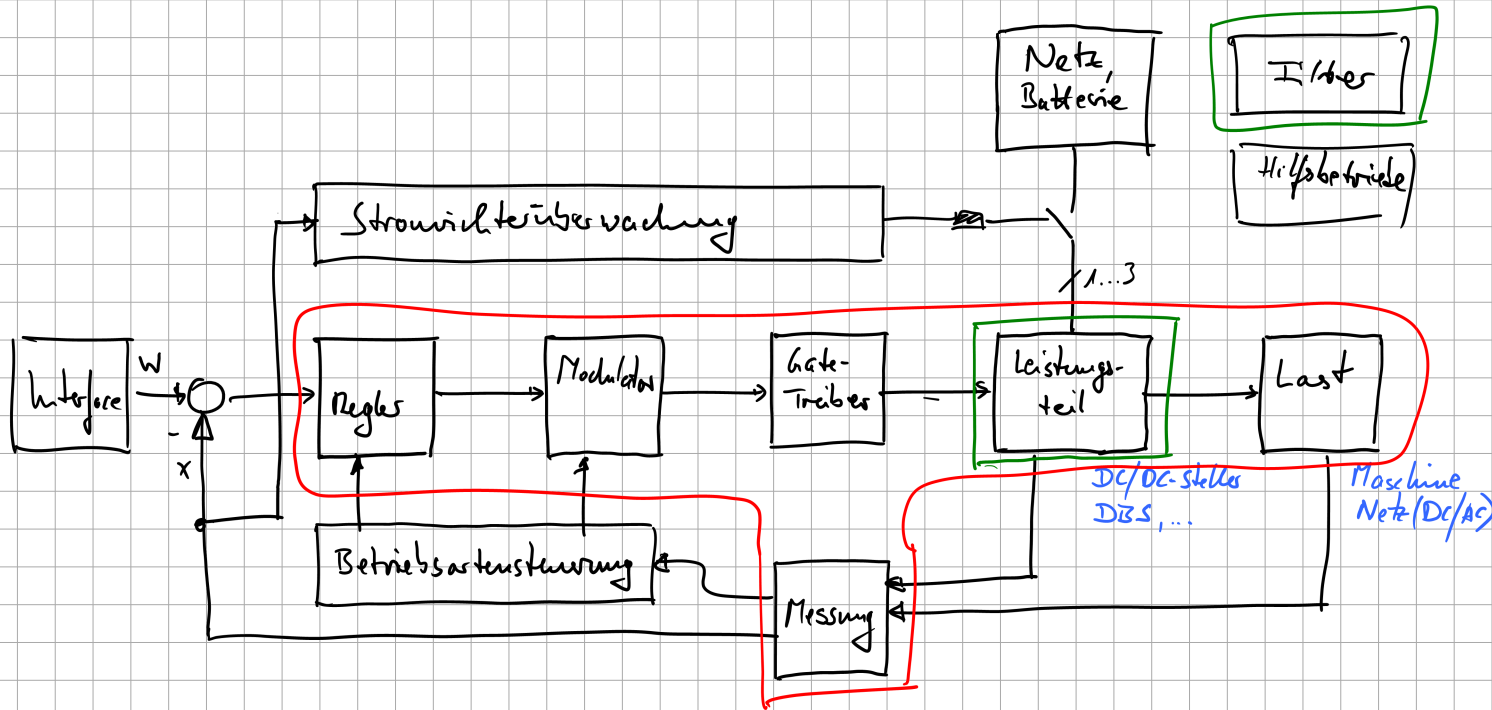
I. Grundlagen

1. Überblick: "Leistungselektronisches System" → Anwendungen



I. Grundlagen

I.1. Überblick: Stromrichtersystem

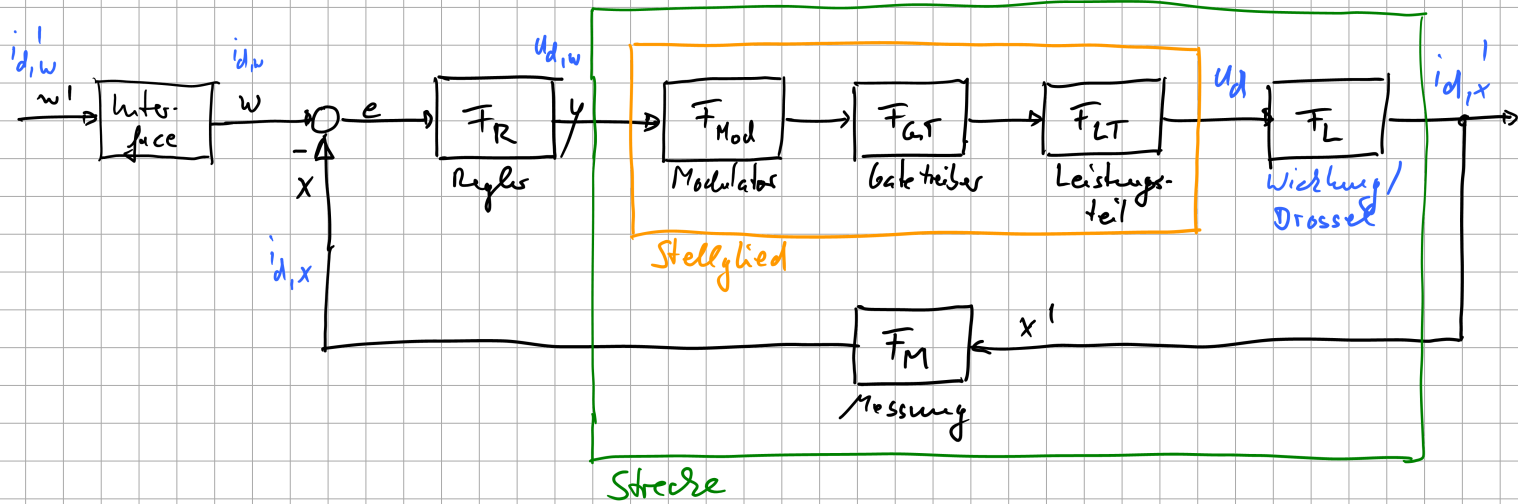


RLS : *Modellbildung & Reglerentwurf*

HLS : *Topologien, Design, ...*

SRST : *Details und techn. Umsetzung*

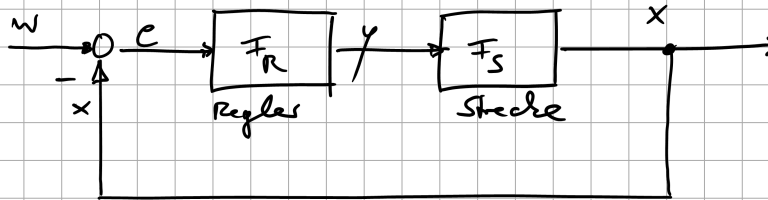
Fig. 2. Regelkreis eines Stromrichters



- Interface wird oft "vorangestellt" / aus der regelungst. Betrachtung ausgeklammert
- Messung wird zur Strecke gezählt:

$$\overline{F}_S = \frac{x}{y} = \overbrace{\overline{F}_M}^{\text{Messung}} \cdot \overbrace{\overline{F}_L}^{\text{last}} \cdot \overbrace{\overline{F}_{SG}}^{\text{Stellglied}}$$

Damit wird der Regelkreis zu:



Begriffsdefinition:

w : Führungsgröße

y : Stellgröße

x : Regelgröße

e : Regeldifferenz

F_x : komplexe Übertragungsfunktion $\rightarrow$ vollst. $F_x(s)$
wird wegen Überständigkeit weggelassen

Anforderungen an den Regelkreis:

1) Stabilität

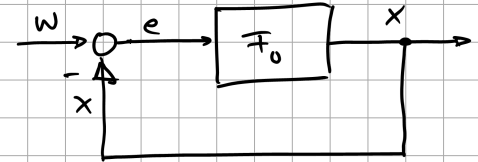
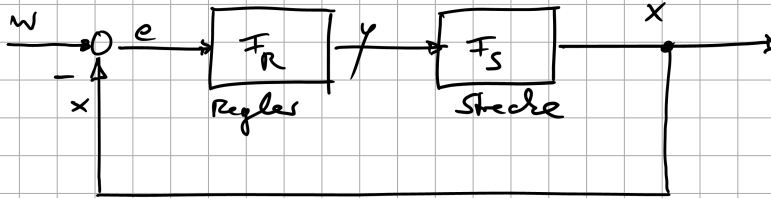
2) Genauigkeit

3) Schnelligkeit

} Kompromiss!

I.2.1. Stabilität

Regelkreis ist ein rückgekoppeltes System:



mit: $V_0 = |F_0| = |F_R \cdot F_S|$ = Verstärkung des offenen Regelkreises

Gegenkopplung : Ausgangssignal wird zum Eingangssignal addiert / gleichphasig addiert
↳ stabil, klingt ab

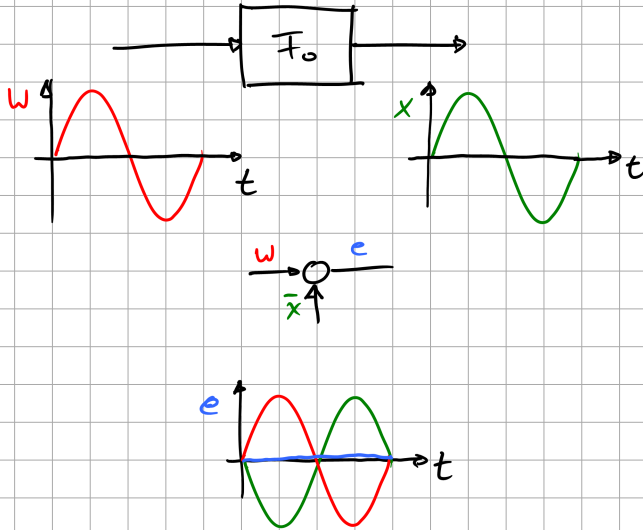
Mitkopplung : Ausgangssignal wird zum Eingangssignal addiert / gleichphasig addiert
↳ instabil, schwingt (auf)

Reale Systeme sind nie unendlich schnell (Tiefpasscharakteristik):

$\Rightarrow$ Mit zunehmender Frequenz nimmt V_0 ab und es kommt zu Phasenverschiebung zwischen Eingangs- und Ausgangssignal.

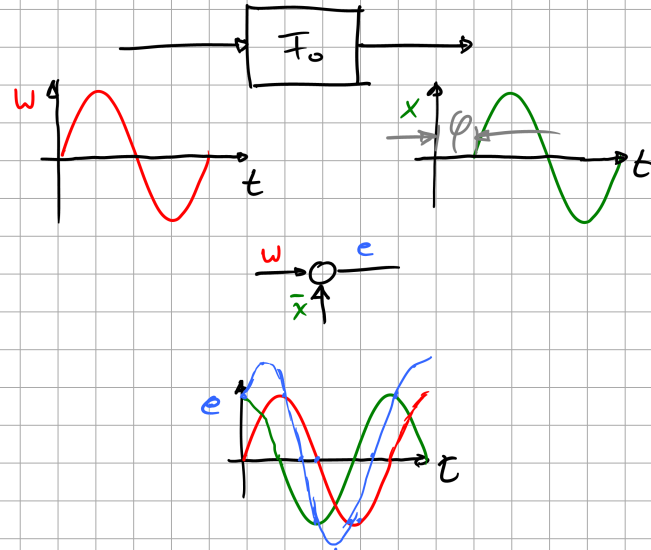
niedrige Frequenz

$$\varphi = 0^\circ$$



hohe Frequenzen

$$\varphi > 0^\circ \text{ (z.B. } 90^\circ)$$



⇒ Bei $\varphi = 180^\circ$ wird (wg. des "-") das Ausgangssignal
gleichphasig zum Eingangssignal addiert.

⇒ aus Gegenkopplung wird Mitkopplung
Ist dabei $V_0 > 1 \Rightarrow$ Signal verstärkt sich selbst / schwingt auf

allg. Schwingbedingung
rückgekoppelter Systeme :

Amplitude : $V_0 > 1$

und Phase : $\varphi = n \cdot 360^\circ \quad n \in \mathbb{N}$

⇒ Stabilitätskriterium (Nyquist) :

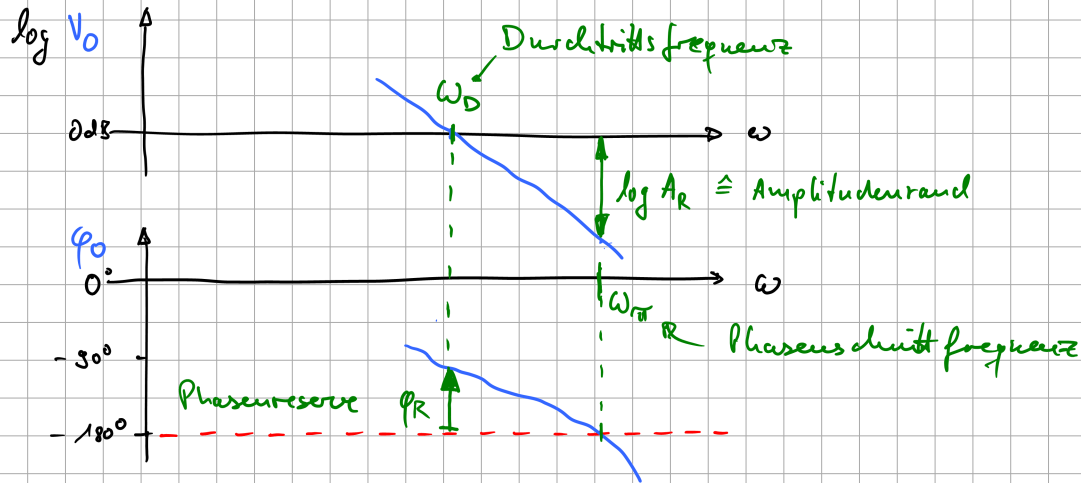
Der geschlossene Regelkreis ist stabil, wenn

$$\begin{array}{ll} V_0 < 1 & \text{bei } \omega_\pi \\ \varphi_R > -180^\circ & \text{bei } \omega_0 \end{array}$$

mit $\omega_\pi = \omega \Big|_{\varphi_0 = -180^\circ}$ (Phasenschnittfrequenz)

mit $\omega_0 = \omega \Big|_{V_0 = 1}$ (Durchtrittsfrequenz)

Anwendung des Nyquist-Kriteriums im Bode-Diagramm:



Ablesen?

Amplitudenreserve: Abstand des Amplitudengangs des offenen Regelkreises von der 0dB-Linie bei der Phasenschnittfrequenz ω_{π} .

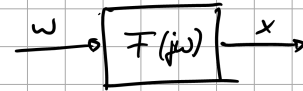
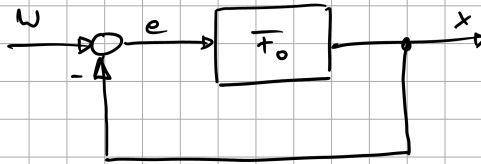
$$A_R = \frac{1}{|F_0|} \Big|_{\omega = \omega_{\pi}}$$

Phasenreserve: Abstand des Phasengangs des offenen Regelkreises zu -180° bei der Durchtrittsfrequenz ω_D .

$$\varphi_R = \varphi_0 + 180^\circ \Big|_{\omega = \omega_D}$$

• angestrebt: $\varphi_R > \sim 50^\circ$ bei ω_D

I.2.2. Genauigkeit



F_o : offener RK

F : geschl. RK

"Genau" $\rightarrow$ Regelgröße $\stackrel{!}{=} \underset{x}{\text{Sollwert}}$

$$\Rightarrow \frac{x}{w} = 1 \quad \Rightarrow \quad |F(jw)| \stackrel{!}{=} 1$$

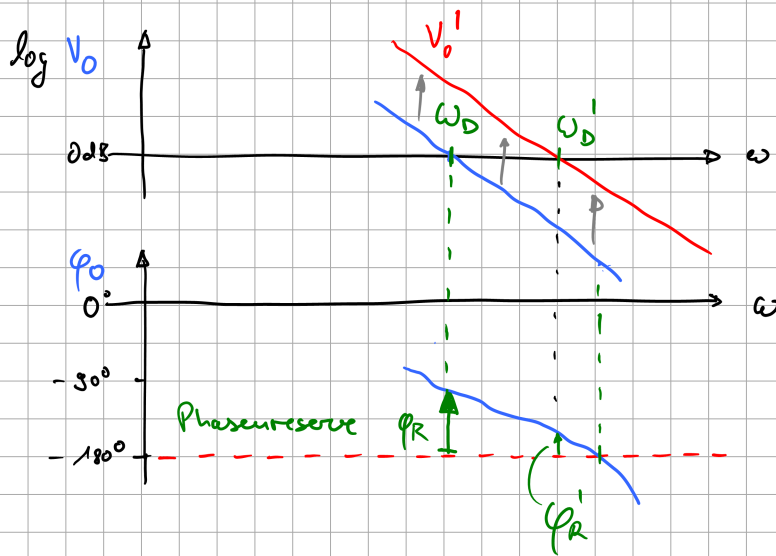
Übertragungsfunktion des geschlossenen Regelkreises:

$$|F(jw)| = \frac{x}{w} = \frac{V_o}{1+V_o} = \frac{1}{\frac{1}{V_o} + 1} \stackrel{!}{=} 1$$

$$\Rightarrow F(jw) \approx 1 \quad \text{für } V_o \gg 1$$

$\Rightarrow$ Für eine hohe Genauigkeit muss die Verstärkung des offenen Regelkreises sehr hoch sein!

Auswirkung von $V_0 \rightarrow \infty$ auf die Stabilität:



$V_0' > V_0$
 $\Rightarrow \omega_0' > \omega_0$
 $\Rightarrow \varphi_R' < \varphi_R$
 $\Rightarrow$ instabiler

$\Rightarrow$ Die Forderung nach Genauigkeit widerspricht der Forderung nach Stabilität!

• "stationäre Genauigkeit": $x = w$ nach Einschwingvorgang, dauerhaft

$\Rightarrow$ für stationäre Genauigkeit $\omega \rightarrow 0$ relevant!

$\rightarrow$ Dort auch kein Konflikt mit Stabilität!

I.2.3 Schnelligkeit

"Schnell genau" : $|F(j\omega)| \stackrel{!}{=} 1$ bis zu möglichst hohen Frequenzen

I.2.4 Zusammenfassung:

Anforderungen an den Regelkreis:

- 1) Stabilität $\Rightarrow$ Phasenreserve $\varphi_R > \sim 50^\circ$ bei ω_D
- 2) Genauigkeit $\Rightarrow V_0$ möglichst groß
- 3) Schnelligkeit $\Rightarrow$ " " " bis zu möglichst großen Frequenzen

Kompromiss!

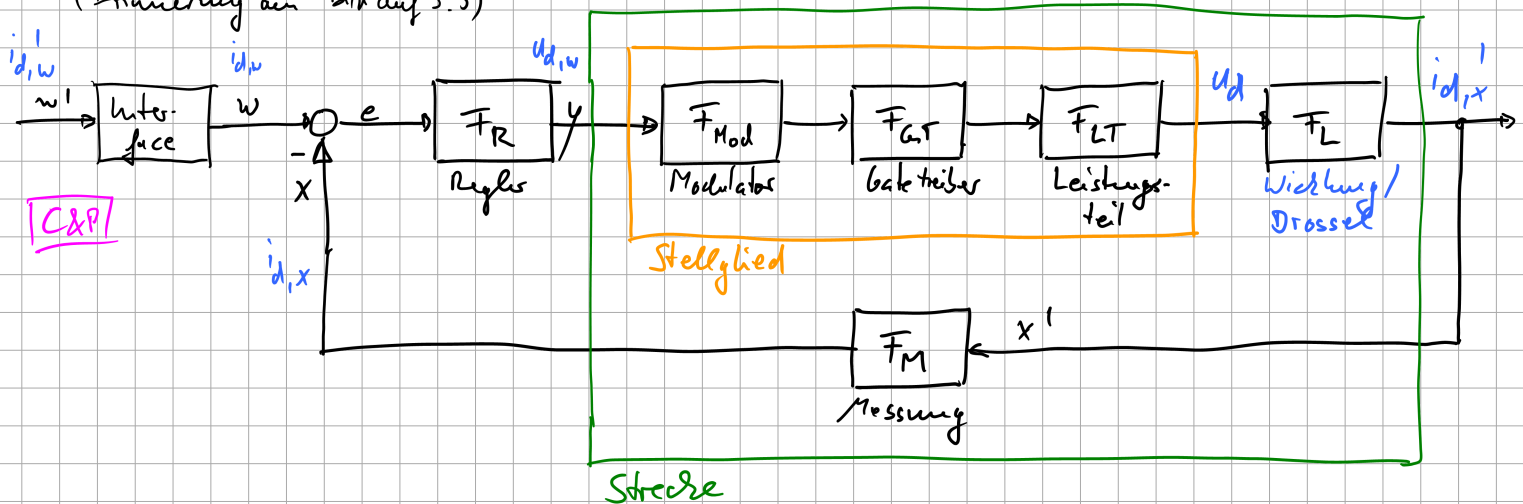
Wo liegt ω_D ?

- Prinzipiell frei durch Reglesparametrierung wählbar ($\underline{T_0 = T_R \cdot T_S}$).
- Wahl so, daß ausreichend φ_R bleibt.

$\Rightarrow$ hängt vom Phasengang der Strecke ab! $\Rightarrow$ D.h. Modellbildung der Strecke ist für alles andere maßgeblich

I.3. Modellierung der Strecke bei Stromrichtern

(Erinnerung an Bild auf S.5)

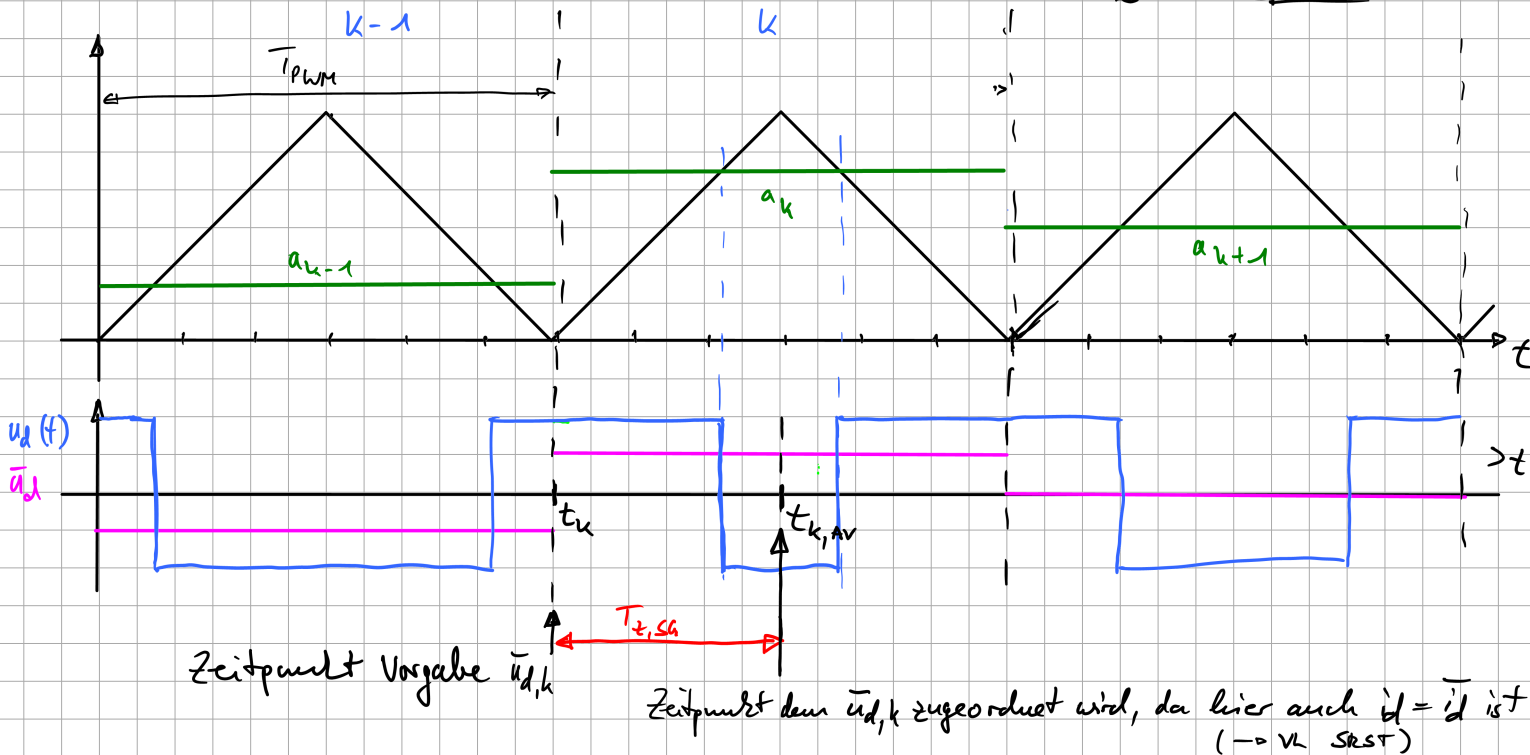


- Modulator & Gate-Treiber werden mit dem Leistungsteil im Stellglied zusammengefasst.

—> möglich, weil sie immer deutlich schneller sind als der Leistungsteil
=> haben keine signalverändernden Auswirkungen, die nicht auch durch den LT umgesetzt werden würde

I. 3. 1. Stellglied

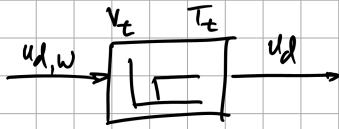
zeitliches Verhalten (am Beispiel einer Halbbrücke)



$\Rightarrow$ Stromrichter als Stellglieder sind Totzeitglieder mit

$$T_{t,SR} = \frac{1}{2} T_{PWM}$$

Totzeitglied



V_t : Proportionalverst. des Totzeitglieds
(meist 1)
 T_t : Totzeit



Übertragungsfunktion:

$$G_t(s) = V_t \cdot e^{-sT_t}$$

Frequenzgang:

$$F_t(j\omega) = V_t \cdot e^{-j\omega T_t}$$

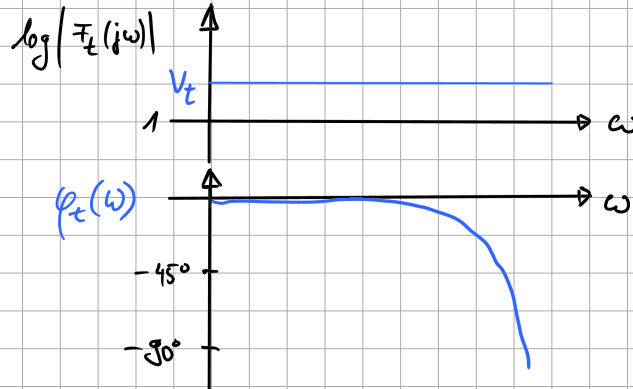
Amplitudengang:

$$|F_t(j\omega)| = V_t$$

Phasengang:

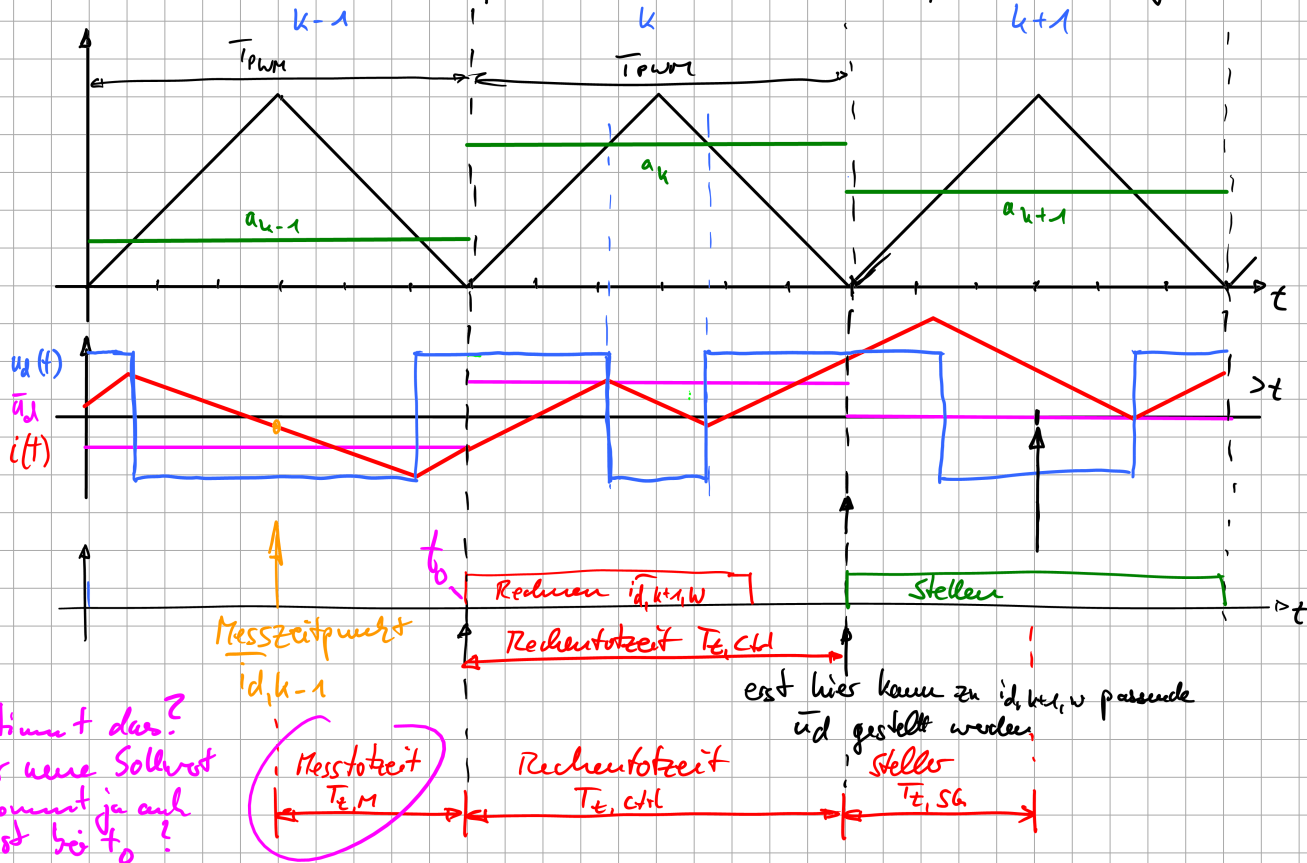
$$\varphi_{T_t}(\omega) = -\omega T_t \sim \omega$$

Bode-Diagramm:



Totzeit-Verhalten des
Stromrichters ist
Grenze für Dynamik
der Regelung!

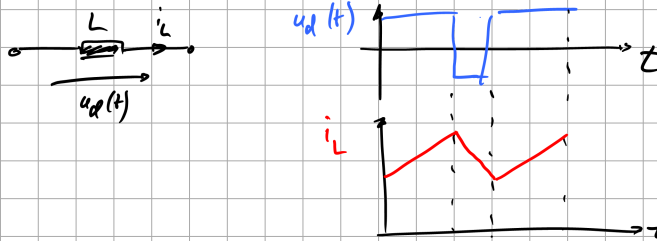
- Weitere Totzeit durch quasizeitkontinuierliche Implementierung



$$T_t = T_{E,m} + T_{E,chl} + T_{E,sg} = 2 T_{pwm} \quad (\text{je nach Implementierung auch } T_t = \frac{3}{2} T_{pwm})$$

I.3.2. Last

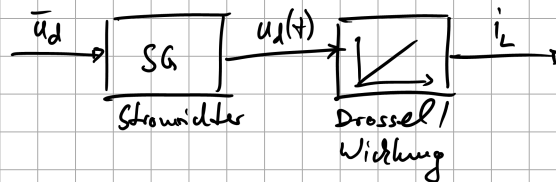
- "Last" nach Stromrichter: Wirkung einer Maschine / Drossel



⇒ getaktete Spannung wird zum Phasenstrom (Maschine) / Drosselstrom aufintegriert:

$$i_L(t) = \frac{1}{L} \int u_d(t) dt$$

⇒ integrales Verhalten, falls der Serienwiderstand vernachlässigbar ist.



- Berücksichtigung des parasitären Serienwiderstands (Wicklungswiderstand):

$$u_d = R_s i_L + L \frac{di_L}{dt}$$

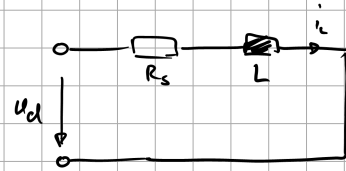
| : R_s

$$\underbrace{\frac{1}{R_s}}_{V_P} u_d = i_L \rightarrow \underbrace{\frac{L}{R_s}}_{T_1} \frac{di_L}{dt}$$

DGL 1. Ordnung

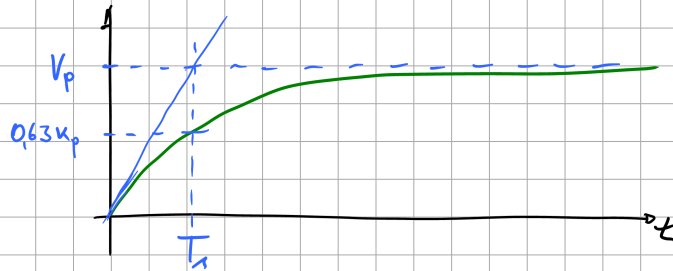
=> PT₁-Glieder mit

$$V_P = \frac{1}{R_s} \quad \text{und} \quad T_1 = \frac{L}{R_s}$$



- Sehr viele Stromregelungen in der LE können so modelliert werden

- Sprungantwort:



nach $T_1 \rightarrow 63\%$

nach $3 \cdot T_1 \rightarrow 95\%$

nach $5 \cdot T_1 \rightarrow \sim 100\%$

I - Glied



T_I : Integrierzeitkonstante



Übertragungsfunktion:

$$G(s) = \frac{1}{s T_I}$$

$$\omega_{DI} = \frac{1}{T_I}$$

Durchtrittskreisfrequenz

Frequenzgang:

$$F(j\omega) = \frac{1}{j\omega T_I}$$

Amplitudengang:

$$|F(j\omega)| = \frac{1}{\omega T_I}$$

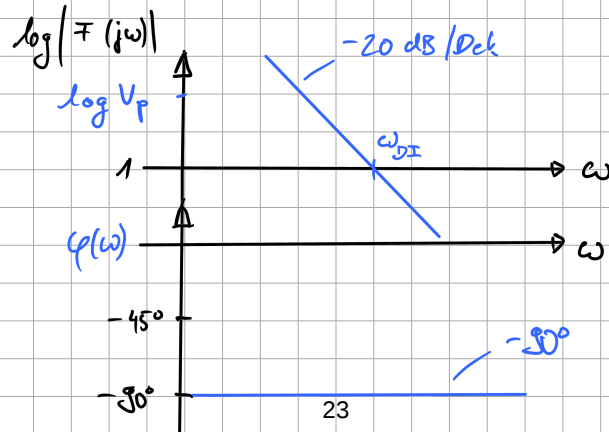
$$\rightarrow \log |F(j\omega)| = -\log T_I - \log \omega$$

Gerade mit
-20 dB/Dek

Phasengang:

$$\varphi(\omega) = -90^\circ$$

Bode - Diagramm:



PT₁ - Glied



V_p : Proportionalverstärkung

T_1 : Verzögerungszeitkonstante



Übertragungsfunktion:

$$G(s) = \frac{V_p}{1 + sT_1}$$

$$\omega_E = \frac{1}{T_1} \quad \text{Eckkreisfrequenz}$$

Frequenzgang:

$$F(j\omega) = \frac{V_p}{1 + j\omega T_1}$$

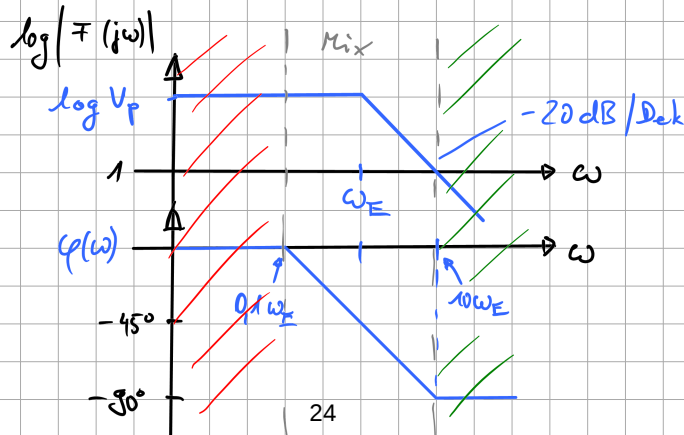
Amplitudengang:

$$|F(j\omega)| = \frac{V_p}{\sqrt{1 + \omega^2 T_1^2}}$$

Phasengang:

$$\varphi(\omega) = -\arctan(\omega T_1)$$

Bode - Diagramme:

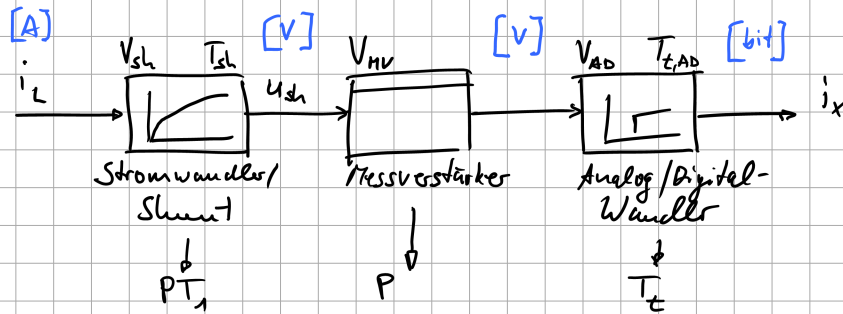


⚡ P - Verhalten bei $\omega < 0,1 \omega_E$

⚡ I - Verhalten bei $\omega > 10 \cdot \omega_E$

I.3.3. Messung

- Messung besteht meist selbst aus einer Kette von Übertragungsgliedern



→ Dynamik der Messkette meist deutlich schneller als f_{PWM} des Stromrichters.

- Entscheidend für Totzeit:

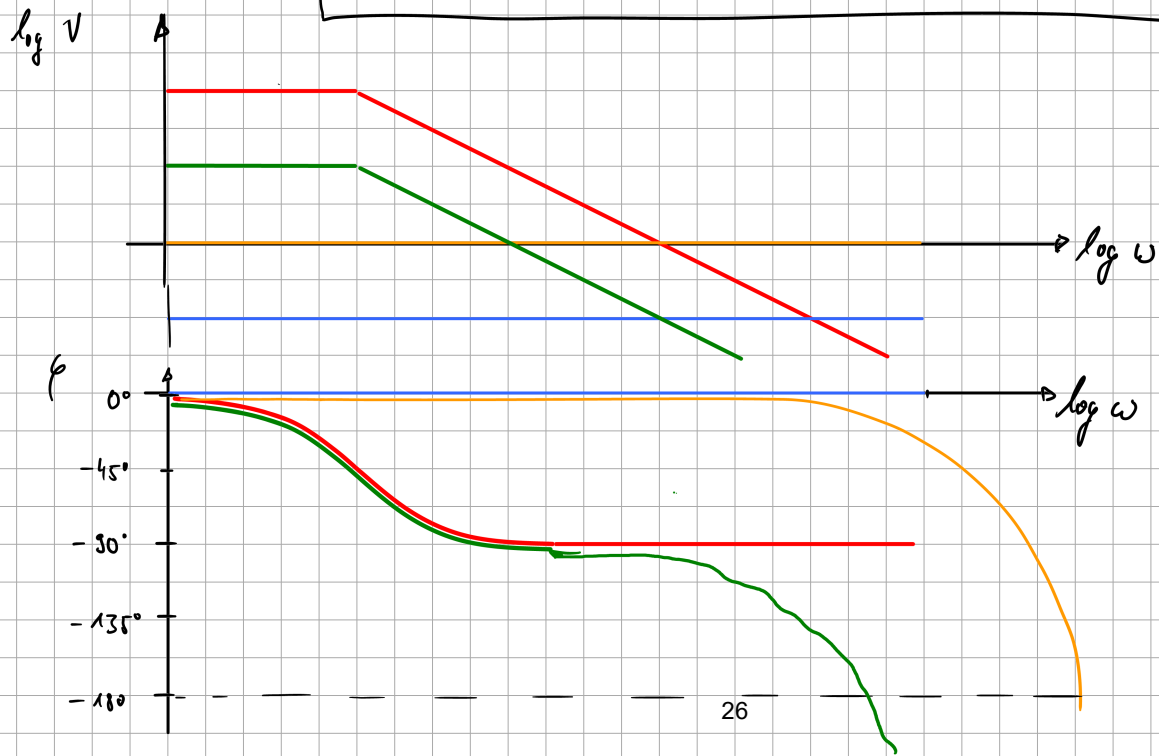
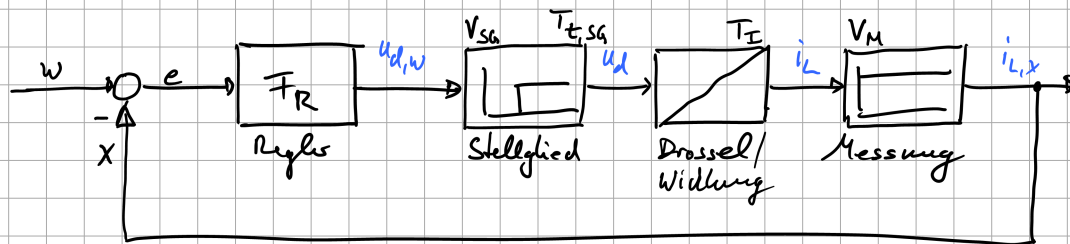
Latenz zwischen Messwertfassung und Zeitpunkt des Eingriffs der Stellgröße.

- Verstärkung

$$V_M = V_{sh} \cdot V_{MV} \cdot V_{AD}$$

⇒ Messung als P-Glied modellieren & Totzeiten zum Stellglied addieren

I. 3. 4. Zusammenfassung Steuermodell



Stellglied

Last (P \cdot T_n)

Messung

Stecke ges.

I. 4. Reglerentwurf

I. 4. 1. Wahl der Durchtrittsfrequenz ω_0

- Last bei ω_0 : integrierendes Verhalten (PT_1 / I)

$$\Rightarrow \varphi_L = -90^\circ$$

- Totzeitglied bei ω_0 :

$$\varphi_{T_t} = -\omega_0 T_t$$

$$a) \omega_0 \stackrel{!}{=} \frac{1}{T_t} \Rightarrow \varphi_{T_t} = \underset{\text{rad}}{-1} = \underset{\text{Grad}}{-57^\circ} \Rightarrow \varphi_R = 180^\circ - 90^\circ - 57^\circ = 33^\circ$$

sehr spartlich

$$b) \omega_0 \stackrel{!}{=} \frac{1}{2 \cdot T_t} \Rightarrow \varphi_{T_t} = -\frac{1}{2} = -28^\circ \Rightarrow \varphi_R = 180^\circ - 90^\circ - 28^\circ = 62^\circ$$

guter Entwurf

$$\varphi_{T_t} \stackrel{!}{=} 180^\circ - 90^\circ - \varphi_R \stackrel{!}{=} -\omega_0 T_t$$

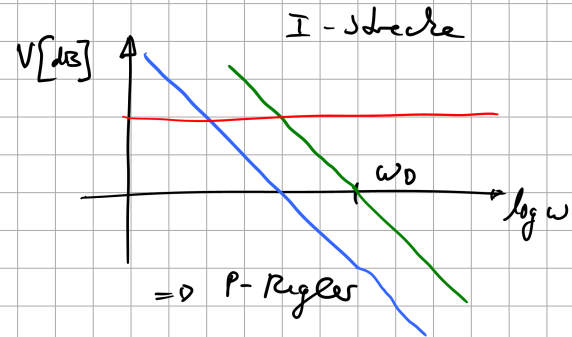
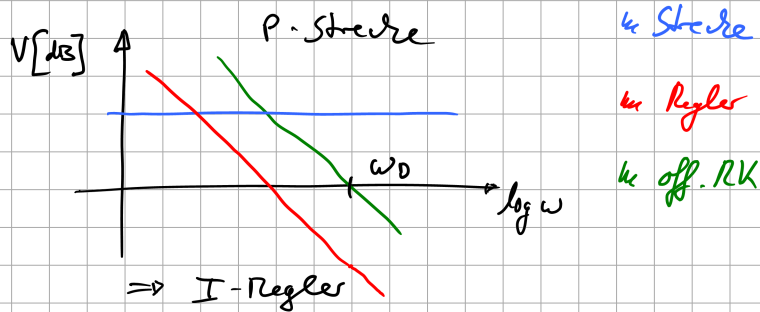
$$\Rightarrow \omega_0 = \frac{\varphi_R + \varphi_L - 180^\circ}{T_t}$$

- Bewährt: $\omega_0 = \frac{1}{2T_t} \dots \frac{1}{3T_t}$

• allg.: ω_0 frei wählbar

I. 4.2. Wahl des Reglers

- angestrebt: einfach integrierendes Verhalten des offenen RL bei ω_D

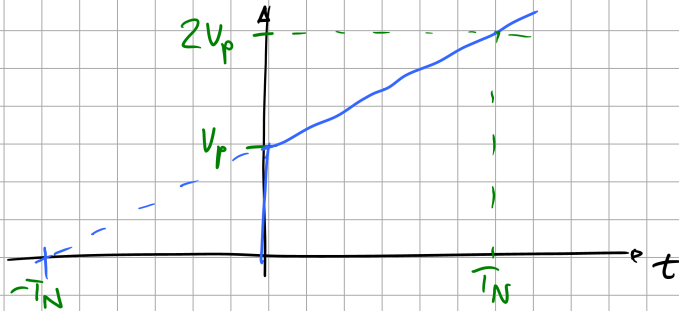


$\rightarrow$ Warum dann immer "PI-Regler"?

$\Rightarrow$ Erweiterung eines P-Reglers um I-Anteil bei niedrigen Frequenzen

- bei ω_D : P-Verhalten $\rightarrow$ Stabilität, Schnelligkeit (P wirkt sofort)
- für $\omega \ll \omega_D$: I-Verhalten $\rightarrow$ stationäre Genauigkeit

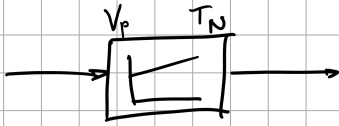
- I-Anteil auch so oft notwendig:
 - Kompensation von Störgrößen / Offsets
 - Wenn P-Anteil nicht ausreicht (begrenzt durch Stabilitätsanforderung)
- Sprungantwort:



$$y = v_p \left[x + \frac{1}{T_N} \int x dt \right]$$

T_N : Nachstellzeit = Zeit, die ein I-Regler braucht, um dieselbe Stellgröße zu erzeugen wie PI in t_0

PI - Regler



V_p : Proportionalverstärkung

T_N : Nachstellzeit



Übertragungsfunktion:

Frequenzgang:

Amplitudengang:

Phasengang:

Bode - Diagramm:

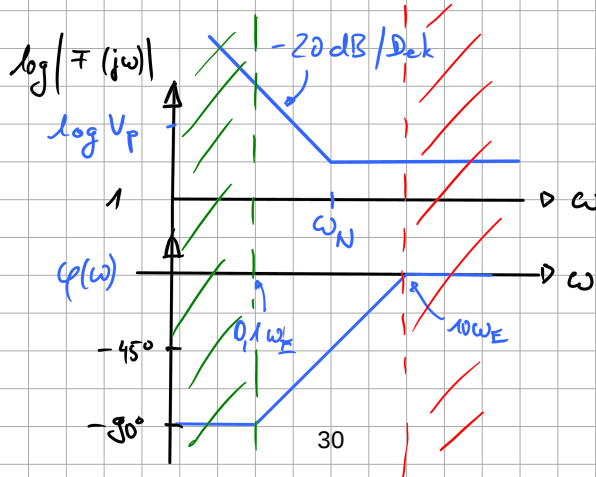
$$G(s) = V_p \left(1 + \frac{1}{sT_N} \right)$$

$$F(j\omega) = V_p \left(1 + \frac{1}{j\omega T_N} \right)$$

$$\omega_N = \frac{1}{T_N}$$

$$|F(j\omega)| = \frac{V_p}{\omega T_N} \sqrt{1 + (\omega T_N)^2}$$

$$\varphi(\omega) = -\arctan \frac{1}{\omega T_N}$$



|| P-Verhalten bei
 $\omega > 10 \cdot \omega_E$

|| I-Verhalten bei
 $\omega < 0,1 \omega_E$

I.4.3. Reglerparametrierung PI-Regler

Allgemein:

- 1) Proportionalverstärkung V_p so, daß das gew. ω_D erreicht wird:

$$V_p = \frac{1}{|F_0|} \Big|_{\omega=\omega_D}$$

"Die Proportionalverstärkung des PI-Reglers entspricht dem Kehrwert der Streckenverstärkung bei der gewünschten Durchtrittsfrequenz."

- 2) I-Anteil darf erst bei niedrigen Frequenzen wirken - werden (gr!)

$$\Rightarrow \omega_N = \frac{1}{T_N} \ll \omega_D$$

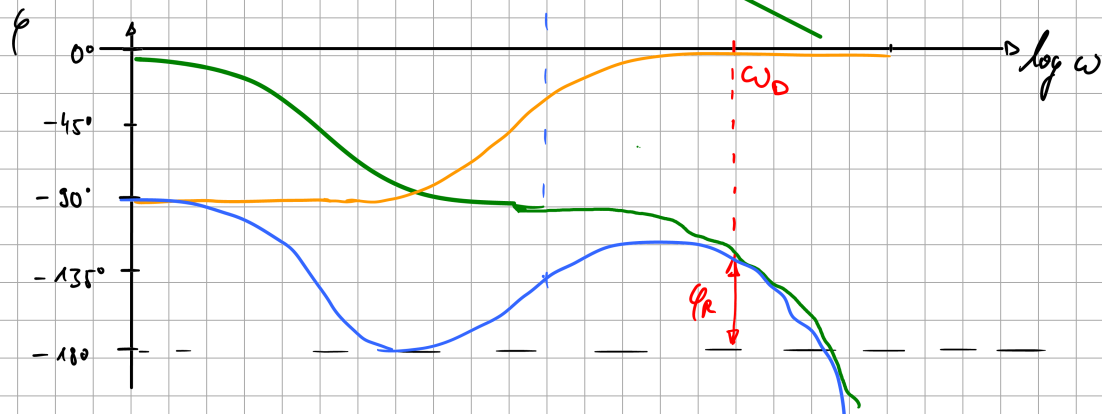
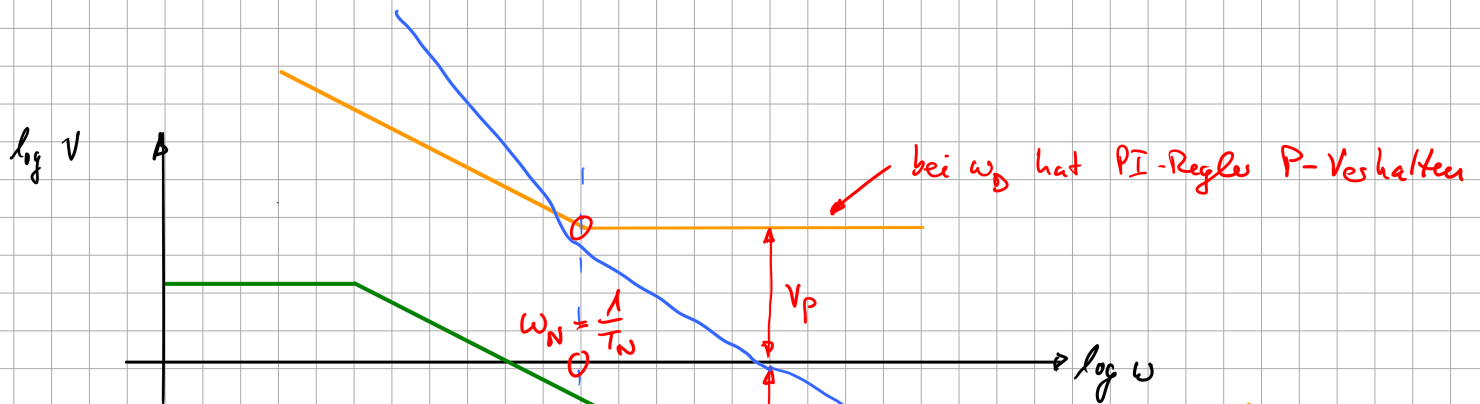
Empfehlung hierzu:

$$\omega_N = \frac{1}{T_N} \leq \frac{\omega_D}{2}$$

$$\text{mit } T_D = \frac{1}{\omega_D}$$

$\hat{=}$

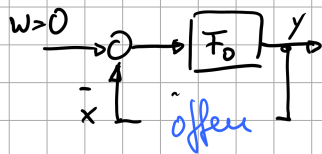
$$T_N \geq 2T_D = 4 \cdot T_L$$



- Regler
- offener Regelkreis
- Strecke

Nachtrag Stabilitätskriterien

- Analytische Analyse / Herleitung: D. Fölling's "Regelungstechnik"
- Schwingbedingung: " y hat gleiche Phase und Amplituden wie x "



$$-x \cdot F_0 = y \Rightarrow F_0 = -\frac{y}{x} \stackrel{\downarrow}{=} -1$$

$$\Rightarrow F_0 = -1 = -1 + j0 \quad \text{ist bei Nyquist}$$

- für Strecken in LES und Maschineneuerung gilt für offene Kreis meist:
 - Pole liegen links der j -Achse
 - max. 2 Pole im Ursprung

Nyquist - Kriterium:

Geschl. Kreis ist stabil, wenn $F_0(j\omega)$ für $0 \leq \omega \leq \infty$ den Punkt $(-1, j0)$ "links liegen" lässt (in Ortskurve),

Einheitskreis $\hat{=} 0\text{ dB-Linie}$

