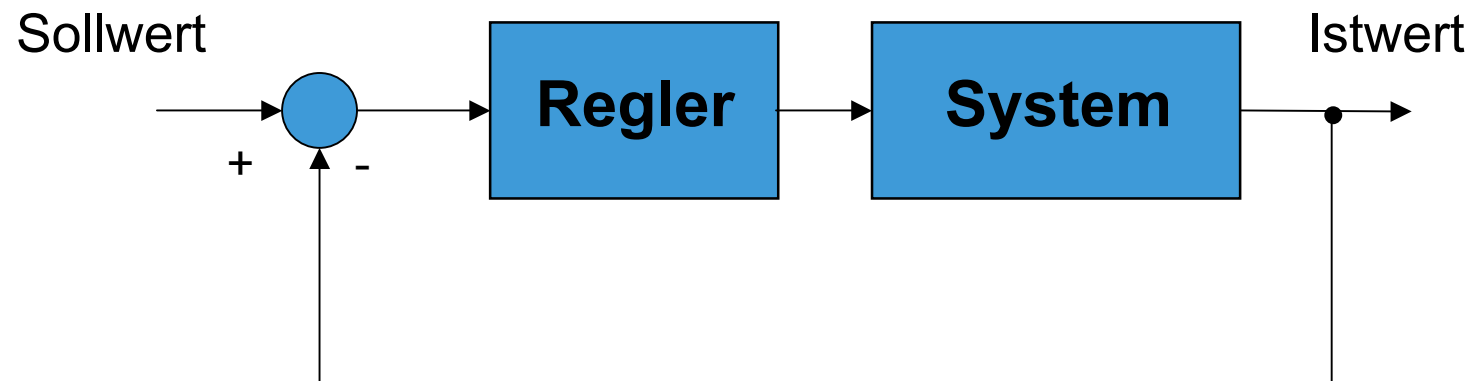


Optimierung von Regelkreisen mit P-, PI und PID Reglern



Infos: Skript Regelungstechnisches Praktikum (Versuch 2) + Literatur

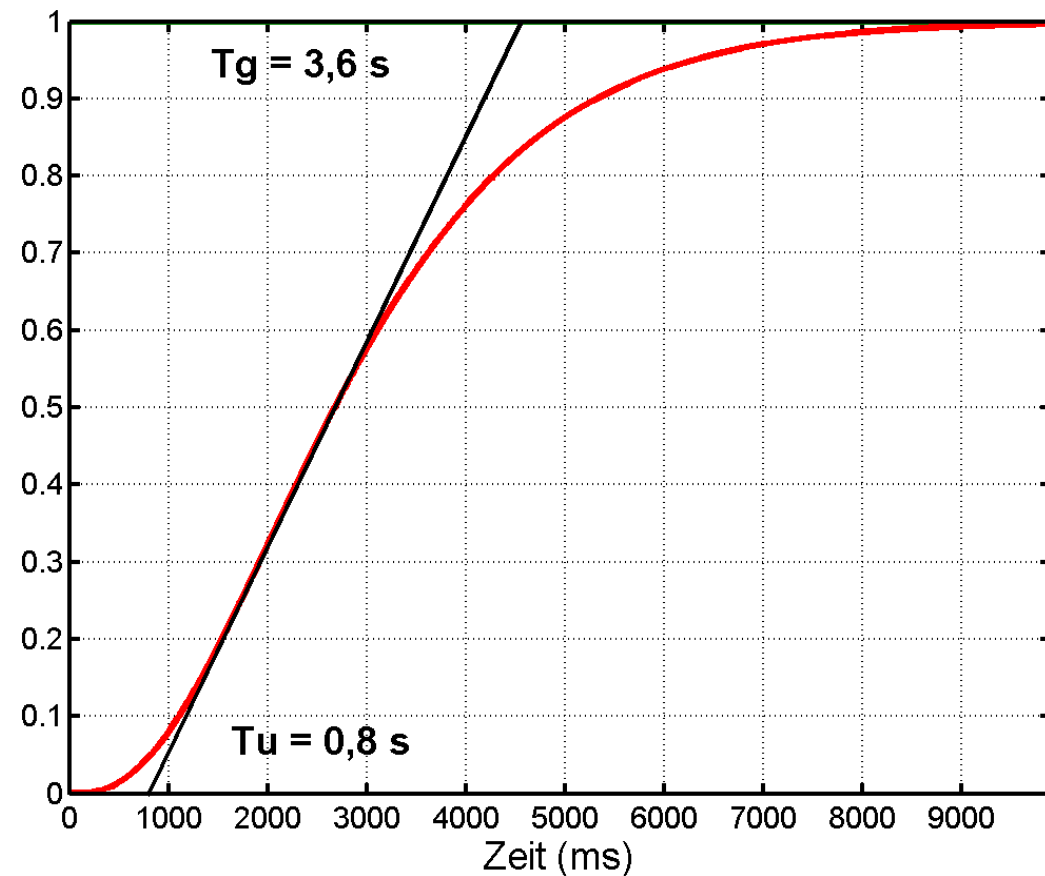
Ziegler und Nichols

- Strecke: Annäherung durch Totzeit- und PT1-Glied in Reihe – entspricht vielen verfahrenstechnischen Regelstrecken
- Verfahren zur Auslegung: Regelung mit P-Regler
 - Verstärkung KR erhöhen bis Dauerschwingung
 - Ablesen KR_{krit} und T_{krit} (Periode der Dauerschwingung)
 - Regler (Achtung Struktur!) nach Tabelle einstellen

Regler	KR	TN=1/KI	TV=KD
P	$0,5 * KR_{krit}$	-	-
PI	$0,45 * KR_{krit}$	$0,83 * T_{krit}$	
PID	$0,6 * KR_{krit}$	$0,50 * T_{krit}$	$0,125 * T_{krit}$

Chien, Hrones und Reswick

- Strecke: Mit Verzögerung und ohne Überschwingung
- Verfahren zur Auslegung:
Kennwerte aus Sprungantwort ablesen:
 - Verzugszeit T_u ,
 - Ausgleichszeit T_g ,
 - Verstärkung K_s
 - Einstellregeln
anwendbar für
 $T_g > 3 \cdot T_u$



Chien, Hrones und Reswick

Einstellregeln für:

Führungsverhalten $\ddot{u}=20\%$

Führungsverhalten,



Störverhalten

Aperiodisch



Überschwingen:

$\ddot{u} = 10\%, 20\%$

Regler	KR	TN=1/KI	TV=KD
P	$0,7 \cdot \frac{T_g}{T_u \cdot K_s}$		-
PI	$0,6 \cdot \frac{T_g}{T_u \cdot K_s}$	$1,0 \cdot T_g$	
PID	$0,95 \cdot \frac{T_g}{T_u \cdot K_s}$	$1,35 \cdot T_g$	$0,47 \cdot T_u$

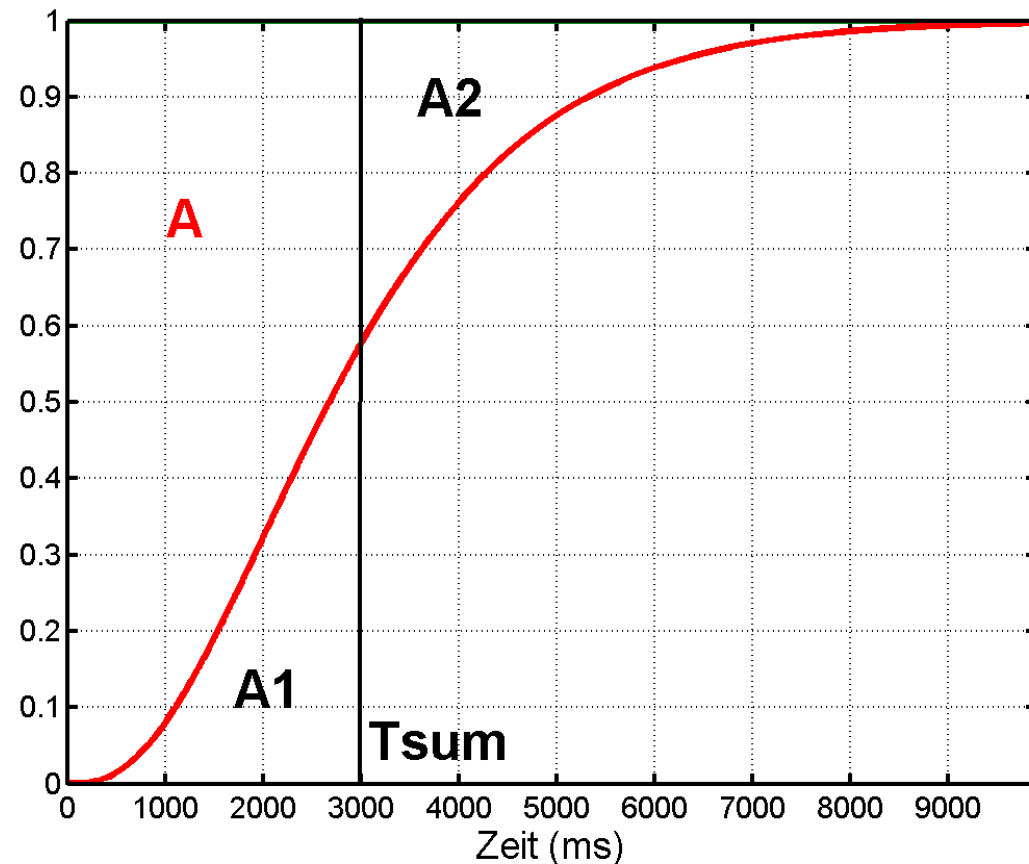
T-Summen-Regel

- Strecke: Sprungantwort beginnt bei Null und hat keine Überschwingung
- Ermitteln der Summenzeitkonstanten, z.B. aus der Fläche $A = T_{\text{sum}} * K$
- Experimentell:
 T_{sum} , wenn $A_1 = A_2$
- Tabelle, z.B. PID:

$$K_R = 0,5 * K_s$$

$$T_N = 0,333 * T_{\text{sum}}$$

$$T_V = 0,167 * T_{\text{sum}}$$



Frequenzbereich

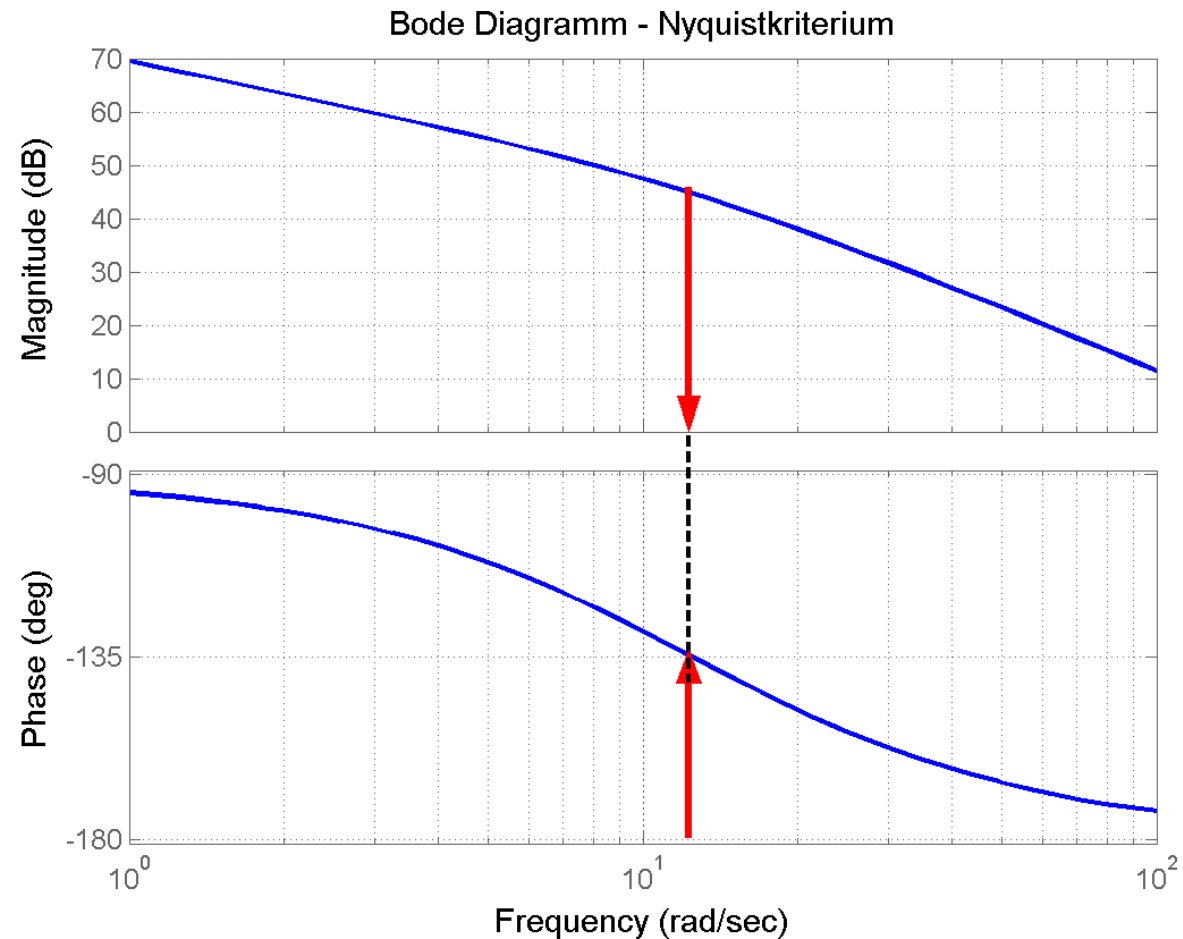
Regler:
$$G_R(s) = k \cdot \left(1 + \frac{1}{T_N \cdot s} + T_V \cdot s\right) = K \frac{(1+T_1s)(1+T_2s)}{s}$$

Wahl Reglernullstellen: Häufig zur Kompensation dominanter (langsamer) Strecken-Zeitkonstanten

Wahl Reglerverstärkung: Siehe Nyquistkriterium, Einstellen Phasenreserve

Frequenzkennlinienverfahren

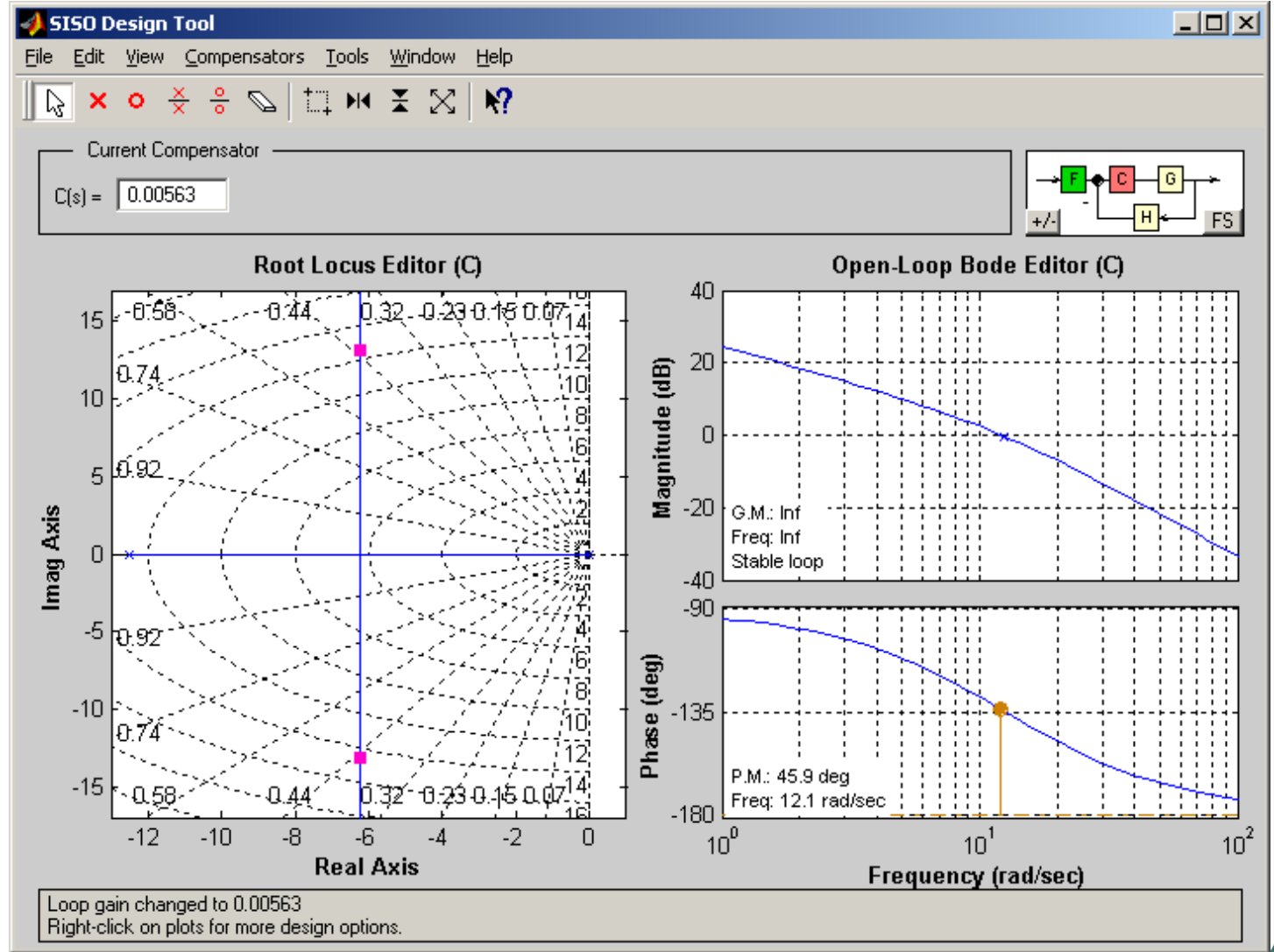
- Wahl der Regler-Zeitkonstanten
- Festlegen Phasenreserve (hier 45°) = Maß für Dämpfung
- Ermitteln Durchtrittsfrequenz (hier 12 rad/s)
- Verschieben Betrag (durch P-Regler) bis Nulldurchgang bei gewünschter Frequenz (hier -45 dB = $1/180$)



Wurzelortskurve

Vorgabe Reglerpol-
und Nullstellen
(offener Regelkreis)

Berechnung Pole
geschlossener
Kreis als Funktion
Reglerverstärkung



Betragsoptimum

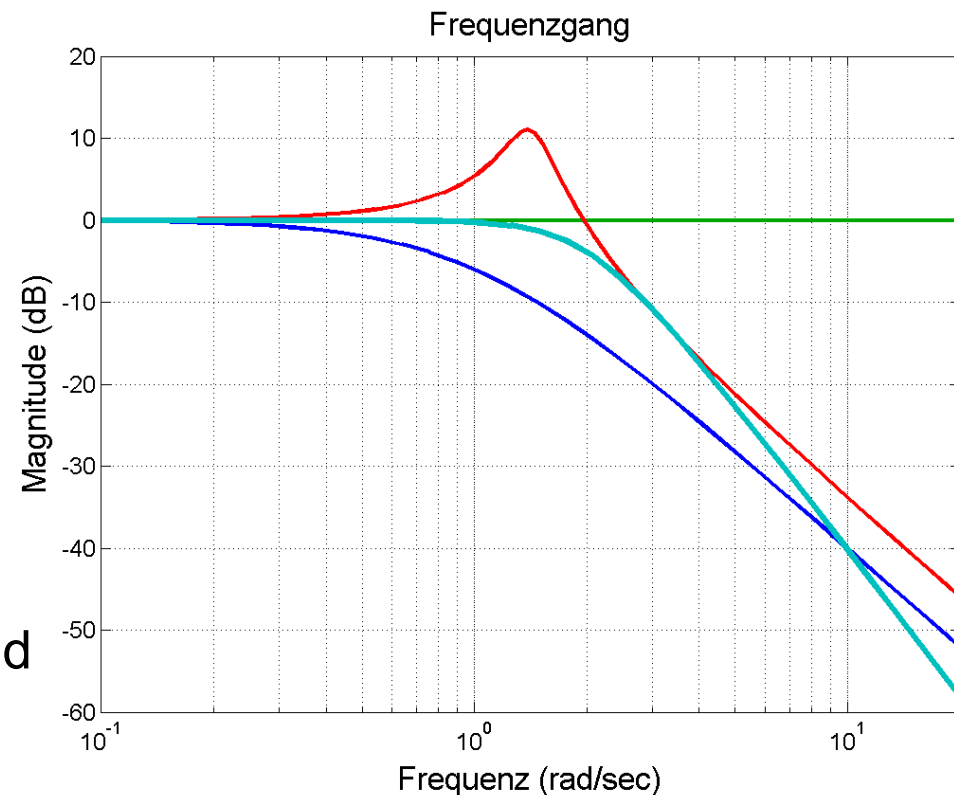
- Idee: Frequenzgang des geschlossenen Regelkreises: Betrag = 1 für möglichst breiten Frequenzbereich

⇒ Kompensation dominanter Zeitkonstanten

- (Vereinfachung von Totzeiten)

⇒ Optimierung nach Tabelle bei bekannter ÜF Regelstrecke

- Nur für proportionale, hinreichend gedämpfte Strecken



Betragsoptimum

ÜF Strecke:
$$G_S(s) = \frac{1}{a_0 + a_1 \cdot s + a_2 \cdot s^2 + \dots} = \frac{1}{A(s)}.$$

ÜF Regler:
$$G_R(s) = k \cdot \left(1 + \frac{1}{T_N \cdot s} + T_V \cdot s\right) = \frac{r_0 + r_1 \cdot s + r_2 \cdot s^2}{2 \cdot s}$$

Führungs-ÜF:
$$F_W(s) = \frac{G_R(s) \cdot G_S(s)}{1 + G_R(s) \cdot G_S(s)}.$$

Frequenzgang
Führungs-ÜF:
$$|F(j\omega)| = \left| \frac{G_R(j\omega) \cdot G_S(j\omega)}{1 + G_R(j\omega) \cdot G_S(j\omega)} \right| = 1$$

Betragsoptimum

... zu lösen: $(a_0^2 - r_0 a_1 + r_1 a_0) \omega^2 + (-2a_0 a_2 + a_1^2 + r_0 a_3 - r_1 a_2 + r_2 a_1) \omega^4 + \dots$
 $\dots + (2a_0 a_4 - 2a_1 a_3 + a_2^2 + r_0 a_5 + r_1 a_4 - r_2 a_3) \omega^6 + \dots = 0$

PI-Regler:

$$r_0 = a_0 \frac{a_1^2 - a_0 a_2}{a_1 a_2 - a_0 a_3}$$

$$r_1 = \frac{a_1 (a_1^2 - a_0 a_2)}{a_1 a_2 - a_0 a_3} - a_0$$

PID-Regler:

$$r_0 = a_0 \frac{a_0 a_1 a_4 - a_0 a_2 a_3 - a_1^2 a_3 + a_1 a_2^2}{a_0 a_1 a_5 - a_0 a_3^2 - a_1^2 a_4 + a_1 a_2 a_3}$$

$$r_1 = - \frac{a_0^2 a_1 a_5 - a_0^2 a_3^2 - 2a_0 a_1^2 a_4 + 2a_0 a_1 a_2 a_3 + a_1^3 a_3 - a_1^2 a_2^2}{a_0 a_1 a_5 - a_0 a_3^2 - a_1^2 a_4 + a_1 a_2 a_3}$$

$$r_2 = \frac{a_0^2 a_2 a_5 - a_0^2 a_3 a_4 - a_0 a_1^2 a_5 + 2a_0 a_1 a_3^2 - a_0 a_2^2 a_3 + a_1^3 a_4 - 2a_1^2 a_2 a_3 + a_1 a_2^3}{a_0 a_1 a_5 - a_0 a_3^2 - a_1^2 a_4 + a_1 a_2 a_3}$$

Symmetrisches Optimum

Strecke: Verzögerung und Integrator (\rightarrow keine Kompensation)
Antriebstechnik

Idee: Maximale Phasenhebung bei Durchtrittsfrequenz

Strecke IT₁: $G(s) = \frac{K}{s \cdot (1 + T_1 s)}$ Regler PI: $G_R(s) = K_R \frac{(1 + T_N s)}{s}$

Wahl T_N aus Phasenreserve φ : $\alpha = \frac{1 + \sin(\varphi)}{\cos(\varphi)} > 1 \Rightarrow$

$$T_N = \alpha^2 \cdot T_1$$

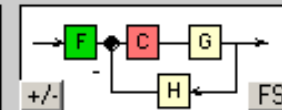
Verstärkung für: $\omega_{\max} = \omega_D = \frac{1}{\sqrt{T_N \cdot T_1}} \Rightarrow$

$$K_R = \frac{1}{K \cdot T_1}$$

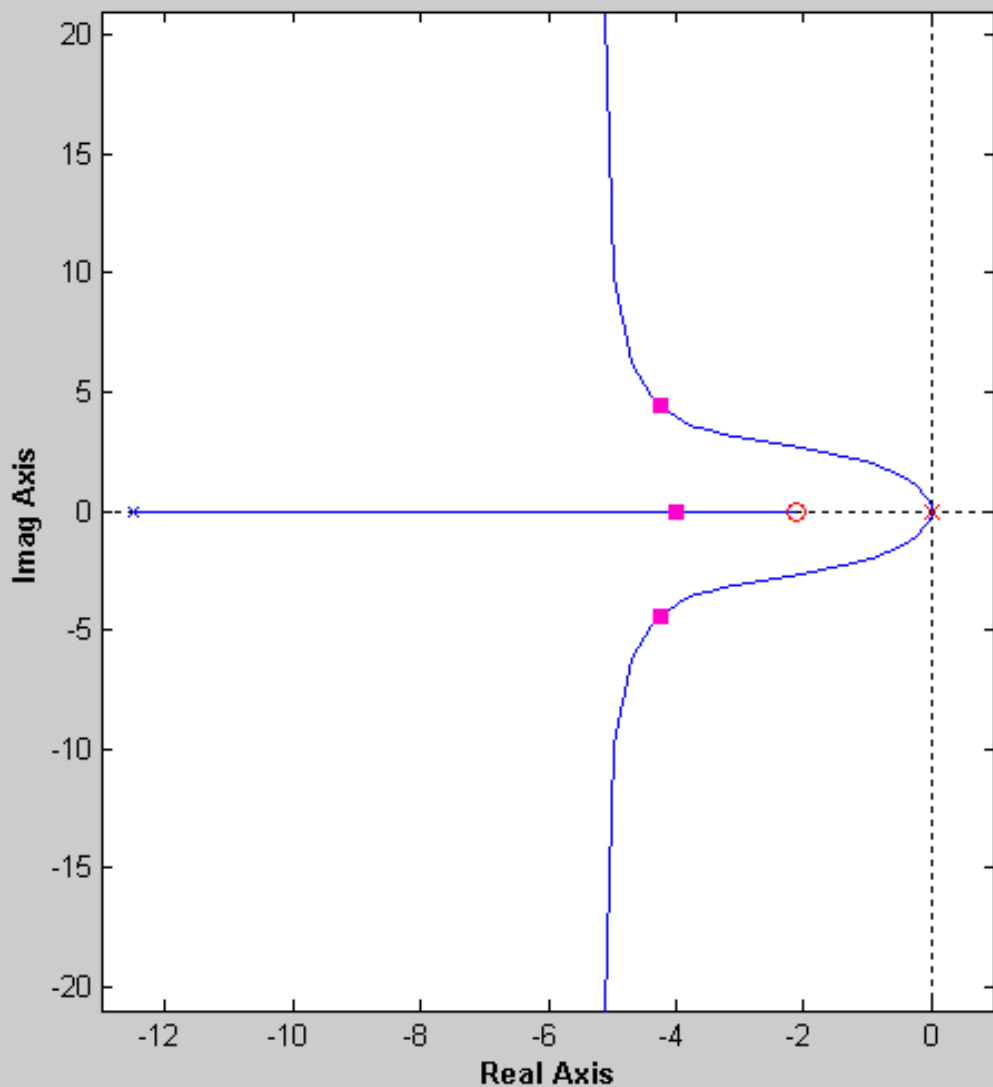


Current Compensator

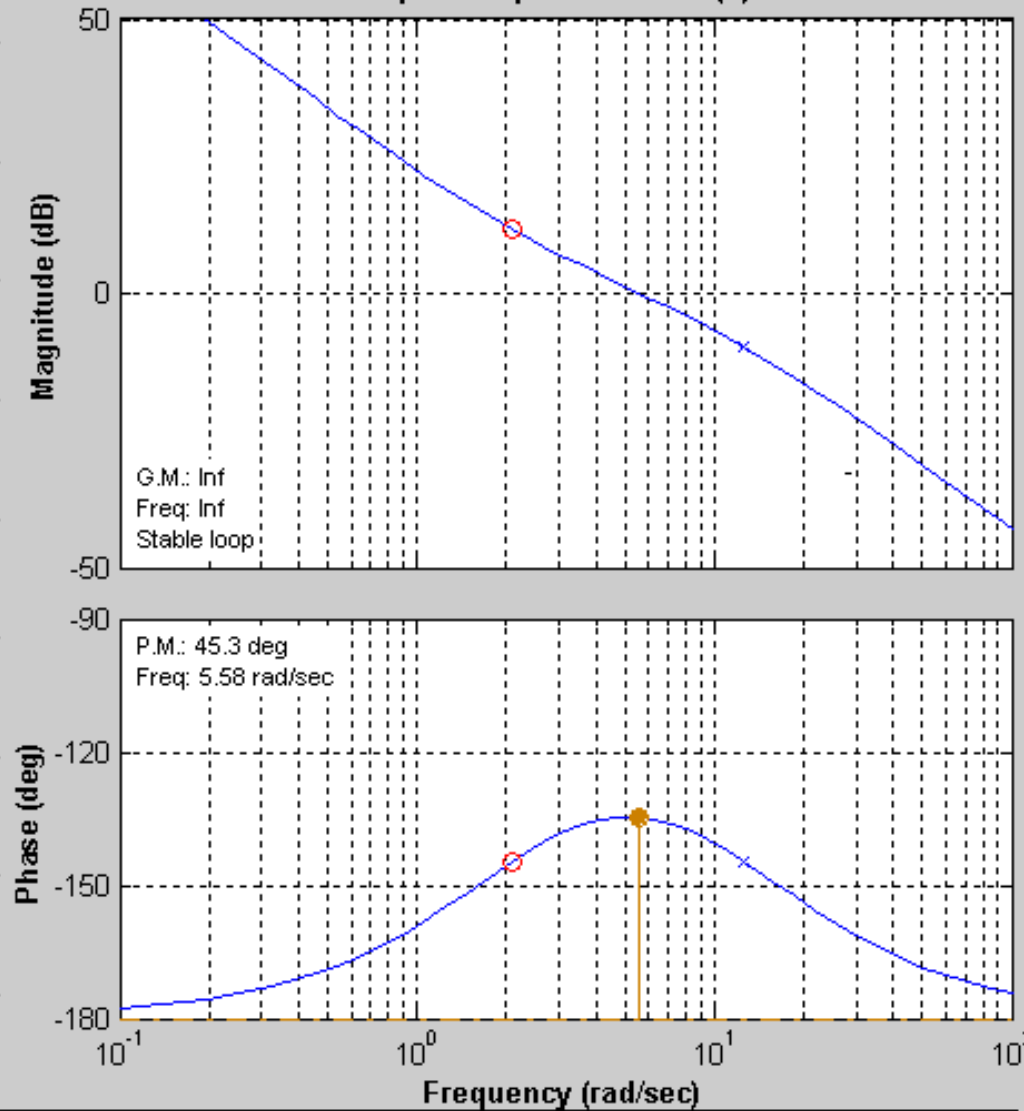
$$C(s) = 0.004 \times \frac{(1 + 0.48s)}{s}$$



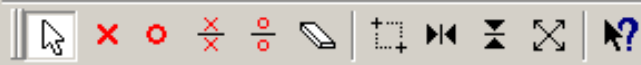
Root Locus Editor (C)



Open-Loop Bode Editor (C)

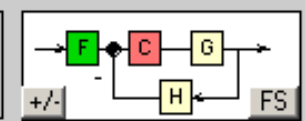


The compensator C has been updated.

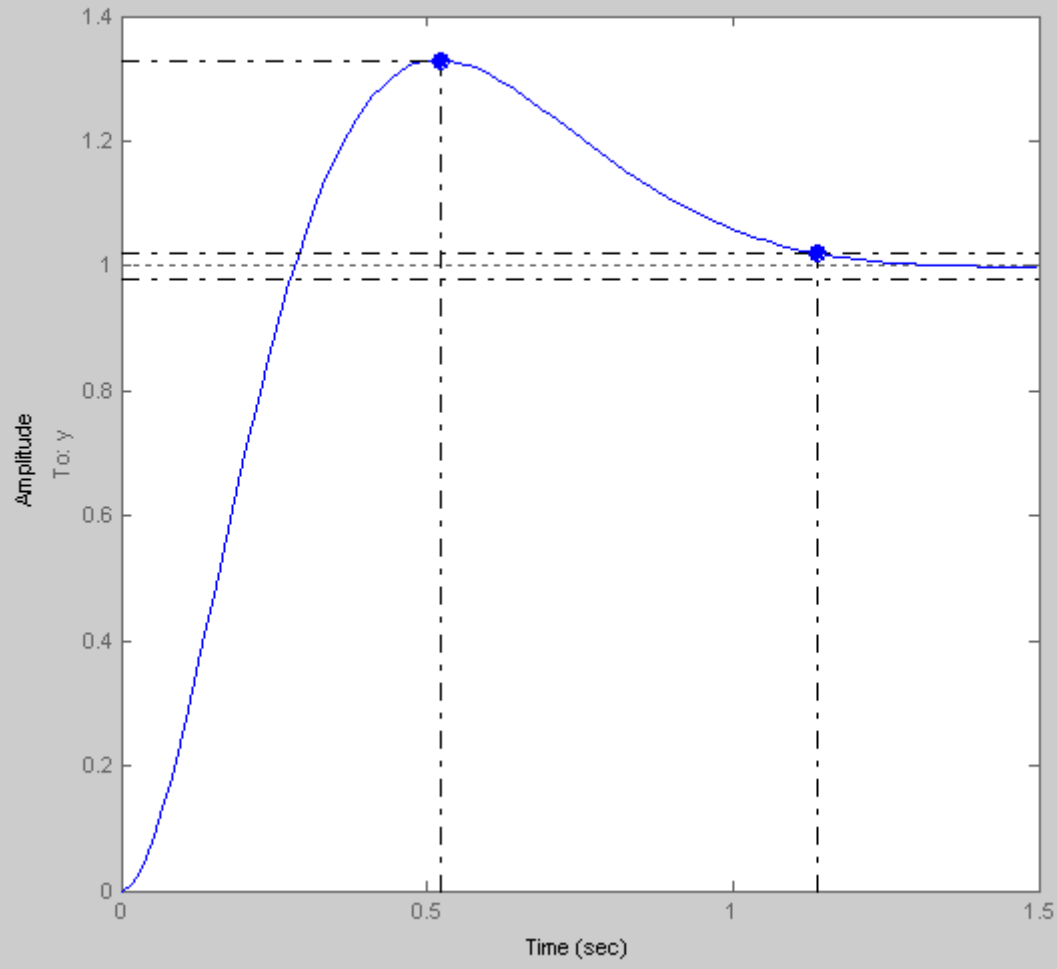


Current Compensator

$$C(s) = 0.004 \times \frac{(1 + 0.48s)}{s}$$

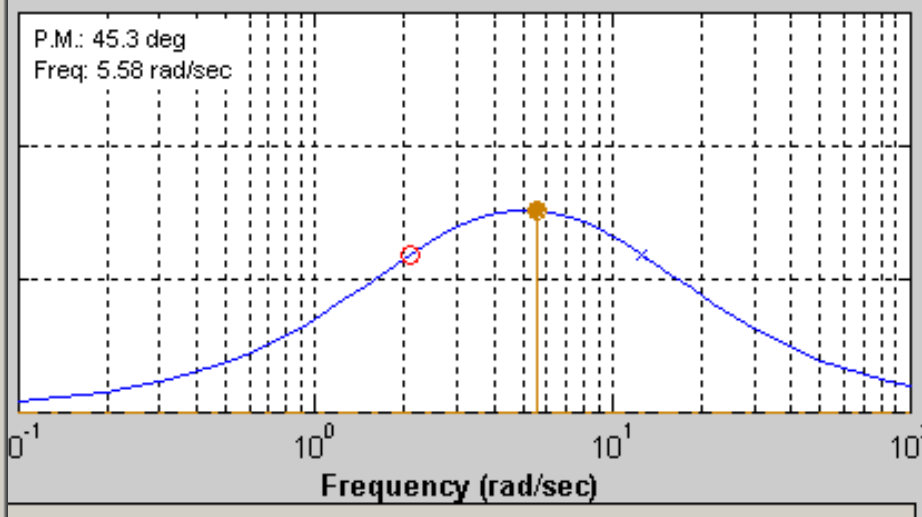
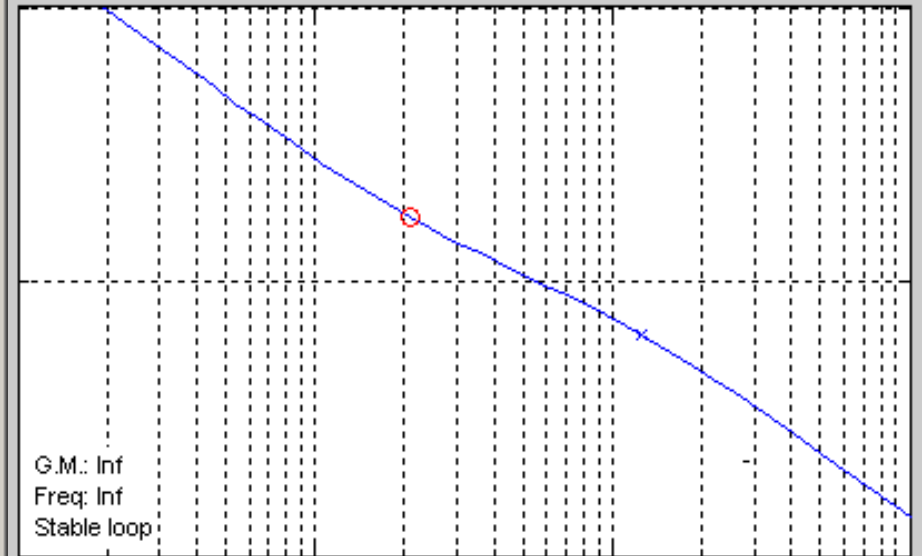


Step Response
From: r



Right-click on the plot areas for more options.

Open-Loop Bode Editor (C)



Symmetrisches Optimum

Weitere Anwendung:

- Strecken mit Integrator und Verzögerung höherer Ordnung
→ Bilden $T_E = \sum T_i$
- Proportionale Strecken mit Verzögerung höherer Ordnung
→ Annahme: Dominantes T = Zeitkonstante I-Glied
- ...

⇒ Einstellregeln nach Tabelle

„Empirische Optimierung PID Regler“

- Abwechselndes Erhöhen \uparrow KP und KD:
 - KP \uparrow bis Überschwingung \rightarrow KD \uparrow bis Überschwingung weg
 - Wiederholen bis Grenze erreicht (durch Störungen, Quantisierung etc.)
- Reduktion \downarrow KP und KD (z.B. 50%), Erhöhen \uparrow KI:
 - Optimierung bis gewünschtes Verhalten erreicht (Überschwingung \leftrightarrow Ausregelzeit)
- Feinjustierung der Parameter (Beachten Hilfestellungen)

„Empirische Optimierung“ – Hilfestellungen

- „Wirkungen“ des P-, I- und D- Anteils separat betrachten; Ziel: Ausgewogenheit
- Zeitkonstante des realen D-Anteils für Wirkung optimieren (Filterung Störungen ↔ Phasendrehung)
- Strukturoptimierung

„Empirische Optimierung“ – Strukturoptimierung

- Begrenzung I-Anteil → „Anti-Wind-Up“
- Kompensation Nichtlinearitäten
 - Anstiegsbegrenzung / Vorgabe Trajektorie
 - Vorsteuerung
 - Invertierung Kennlinien im Regler
- Strukturumschaltung
- Weiterführende Regelungskonzepte
 - Kaskadenregelung
 - Zustandsregelung ...