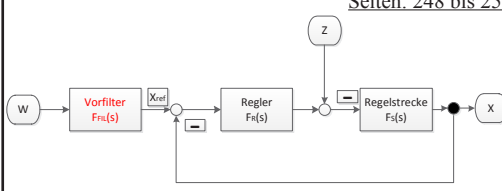


2. Regelungsstrukturen

2.1 Regelungsstrukturen zur Verbesserung des Führungsverhaltens

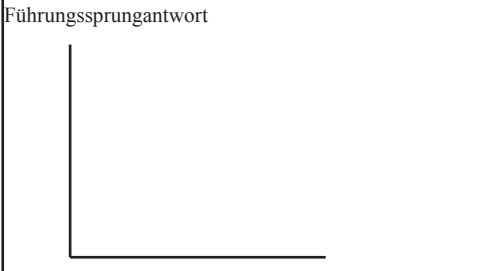
2.1.1 Vorfilter



Seiten: 248 bis 251

$$F_w(s) = F_{FIL} * \frac{F_R * F_S}{1 + F_R * F_S}$$

$$F_z(s) = - \frac{F_S}{1 + F_R * F_S}$$



Vorfilter glättet die Führungsgröße w(t) mit Tiefpaßverhalten
 + gutes Störverhalten für relativ große K_p
 + weniger Überschwinger bei großem K_p
 - langsamer im Führungsverhalten

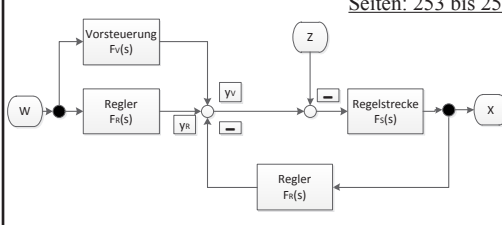
Vorfilterarten:
 - PT_1 System

$$F_{FIL}(s) = - \frac{1}{1 + T_f * s}$$

 - Rampengeber
 - Sinusquadratfilter (sanftes Anfahren und Abbremsen)

Nachteile: Standard-RK mit Vorfilter
 - Ein Stellsignal y wird erst erzeugt wenn schon ein Regelfehler $x_d \neq 0$ aufgetreten ist
 => Regelgröße x(t) ändert sich immer später als $x_{ref}(t)$ bzw. w(t)

2.1.2 Regelkreis mit Vorsteuerung



Seiten: 253 bis 255

$$F_w(s) = \frac{X(s)}{W(s)} = (F_v + F_R) * \frac{F_S}{1 + F_R * F_S}$$

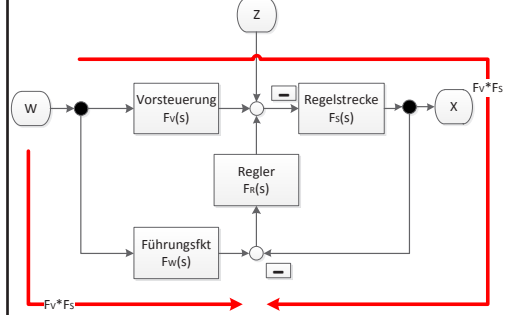
F_z bleibt unverändert
 Ziel: Beschleunigung des Führungsverhaltens

Auslegung der Vorsteuerung F_v :
 $F_w(s) = 1$
 => ideale Vorsteuerung: $F_v(s) = F_s^{-1}(s)$
 ABER: häufig nicht kausal realisierbar
 => statische Vorsteuerung (Näherung)

$$F_v(s) = \frac{1}{F_s(s=0)}$$

Aber: Gefahr das Regler und Vorsteuerung gegeneinander arbeiten => Struktur mit 2 Freiheitsgraden

2.1.3 Struktur mit zwei Freiheitsgraden



Seiten: 251 bis 253

=> Regler nur bei Störverhalten aktiv, d.h. Führungsverhalten unabhängig von F_R
 Führungsverhalten: $F_w(s) = F_v(s) * F_s(s)$
 Störverhalten:

$$F_z(s) = - \frac{F_S}{1 + F_R * F_S}$$

Entwurfsvorgehen: Entwurf der Steuerkette
 1.) $F_w(s) = F_v(s) * F_s(s)$ (Wunschführungsverhalten)
 => Differenzgrad $F_w(s) = \text{Differenzgrad } F_s(s)$
 => stationäre Genauigkeit $F_w(s=0) = 1$
 2.) Vorsteuerung berechnen:

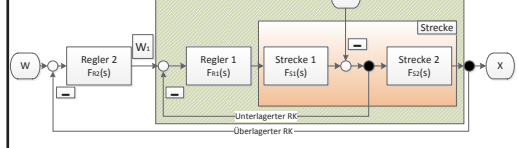
$$F_v(s) = \frac{F_w}{F_s}$$

 3.) Regler F_R nur für gutes Störverhalten entwerfen

2.2 Verbesserung des Störverhaltens

Voraussetzung: zusätzliche Messgröße messbar

2.2.1 Kaskadenregelung



Seiten: 264 bis 267

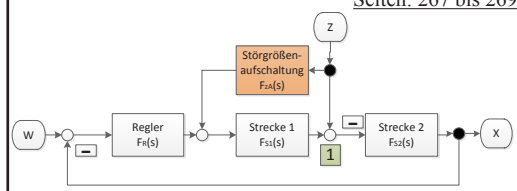
Idee: unterschiedliche Regler für unterschiedliche Streckengeschwindigkeiten
 1.) Inneren Regler F_{R1} an F_{S1} entwerfen
 2.) Äußeren Regler F_{R2} an $F_{S,außen}$ entwerfen

$$F_{s,außen}(s) = \frac{X}{W_1} = F_{S2} * \frac{F_{R1} * F_{S1}}{1 + F_{R1} * F_{S1}}$$

Falls der innere Kreis viel schneller ist als der äußere Teil F_{S2} wird er vernachlässigt: $F_{s,außen} = F_{S2}$

Vorteile:
 - Regler können jeweils an niedriger Streckenordnung entworfen werden => einfacher
 - Störung z wird von unterlagertem RK sehr schnell ausgeglichen, bevor sie sich auf x auswirkt

2.2.2 Störgrößenaufschaltung



Seiten: 267 bis 269

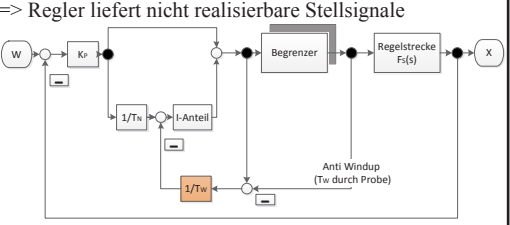
Voraussetzung: Störgröße z ist messbar
 Idee: F_{zA} so auslegen, dass sich die Signalpfade in Punkt 1 kompensieren
 => $F_{zA} * F_{S1} = 1$

$$F_{zA, ideal}(s) = \frac{1}{F_{S1}}$$

Arten:
 1.) ideale Aufschaltung, nicht kausal
 2.) nur stationäre Kompensation $F_{S1}(s=0)$
 3.) näherungsweise dynamische Kompensation d.h. zwei schnelle Pole hinzufügen (deutlich schneller als Nullstellen) + Korrekturfaktor für das stationäre Verhalten annullieren

2.3 Vermeidung des Reglerüberlaufs (Windup)

Seiten: 240 bis 242

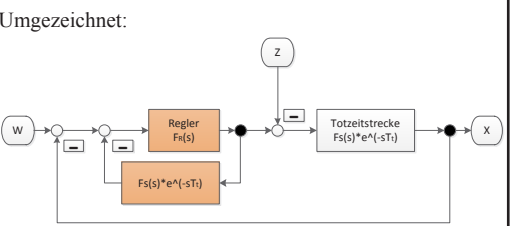
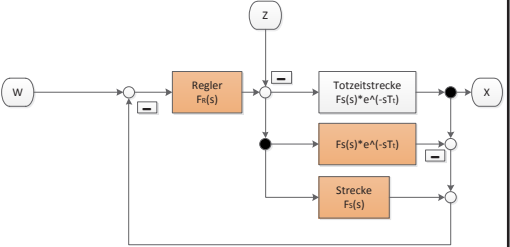


Problem: ungünstiges Zusammenwirken von Regler-I-Anteil und Stellbegrenzung
 => Regler liefert nicht realisierbare Stellsignale
 Abhilfe durch Anti-Windup-Struktur
 => In den Regler das Wissen der Stellsignalgrenzen einbauen und bei Stellbegrenzung den I-Anteil anhalten
 Bei Stellbegrenzung ist der RK offen => Probleme bei nicht stabilem $F_O(s)$

2.4 Regelung von Totzeitstrecken

Seiten: 260 bis 262

= Vorhandene Ausgangssignalverzögerung (= Totzeit) T_t
 Übertragungsfunktion: $F_{Totzeit}(s) = e^{-T_t * s}$
 1.) Smith Regler
 = Reglerentwurf an einer Totzeitfreien Strecke
 => Verbesserung des Führungs- und Störverhaltens, aber Verhalten ist wenig robust und ungenau bei großer Totzeit

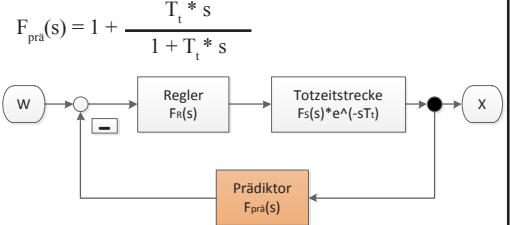


Umgezeichnet:
 2.) Prädiktor
 Idee: Totzeit durch Vorhersagen aufheben

$$x(t+T_t) = x(t) + x'(t) * T_t$$

$$F_{pra} = 1 + T_t * s \quad (\text{ideales PD-System})$$

=> kausal realisiert mit Polstelle



Regler F_R wird an F_S entworfen
 ABER: Rauschen wird durch Differenzierer verstärkt

3. Reglereinstellverfahren

3.1 Analytische Bestimmung der Regelparameter (Annahme: $F_S(s)$ ist bekannt)

3.1.1 Pol-/Nullstellenkompensation (dyn. Kompensation)

Seiten: 229 bis 234

Idee: Kompensation der größten Streckenzeitkonstanten durch Regelnullstellen

Bsp:

$$F_O(s) = \frac{1 + T_R * s}{T_R * s} * \frac{8}{(1+2s)*(1+4s)}$$

=> $T_R = 4$
 Aber: Kompensation nur im Führungsverhalten wirksam
 Nicht anwenden bei:
 - Instabilen Polen
 - Integrierenden Strecken

3.1.2 Kompensationsregler

Seiten: 257 bis 259

Idee: Wunschführungsverhalten $F_W(s)$ vorgeben und nach $F_R(s)$ auflösen

$$F_R(s) = \frac{1}{F_S(s)} * \frac{F_W(s)}{1 - F_W(s)}$$

Führungsverhalten:
 - stationär genau wenn $F_W(s=0) = 1$ und Diffgrad $\{F_W = F_S\}$ vorgegeben

Nicht für:
 - instabile Strecken
 - nicht minimalphasige Strecken (mind. eine Nullstelle rechts in der s-Halbebene)

Alternatives Verfahren gemäß Buch S.257 bis 258

Gegeben: Toleranzband & Ausregelzeit

$$F_W(s) = \frac{1}{(1+s/\alpha)^r}$$

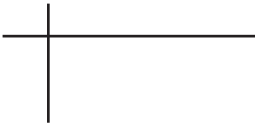
r = Streckengrad
 α aus Graph Seite 258 mit $t = T_{aus} \Rightarrow \alpha$ bestimmen
 s = Eintrittsgrenze ins Fehlerband = Wert $h(t)$



3.1.3 Reglereinstellung nach dem Betragsoptimum

Seiten: 238 bis 240

Idee: Man erhält ein gutes Führungsverhalten bei kleiner Ausregelzeit T_{AN} wenn der Führungs-Amplitudengang $|F_W(j\omega)| = 1$ ist, für eine möglichst große Bandbreite.



Bestimmung der Parameter des Regler gemäß Tabelle S.239 in Abhängigkeit der Strecke

3.1.4 Reglereinstellung durch Parameteroptimierung (im SS2012 nicht Prüfungsrelevant)

Seiten: 234 bis 237

Führungssprungantwort



Regelgütefunktional:
 $J = \int_0^\infty [w - x(t)]^2 dt$

- Gütefunktional J in Abhängigkeit der noch unbekanntem Reglerparameter berechnen
 $J(K_p, T_n)$
- Minimum von J suchen
 $\frac{dJ(K_p, T_n)}{dK_p} = 0$
 $\frac{dJ(K_p, T_n)}{dT_n} = 0$
 => auflösen nach den optimalen Reglerparametern

3.2 Empirische Einstellregeln

Annahme: $F_S(s)$ unbekannt

3.2.1 Reglereinstellung nach Ziegler-Nichols

Seiten: 242 bis 244

Methode 1: für NICHT schwingungsfähige Systeme (PT_1 -Strecken)

- Schritt: Streckensprungantwort aufnehmen
-

2. Schritt: Durch Wendetangenverfahren die Parameter eines Totzeit PT_1 Streckenmodells bestimmen

$$F_S(s) = \frac{K_S}{1 + T_1 * s} * e^{-T_t * s}$$

3. Schritt: Reglerparameter gemäß Tabelle 8.2 im Buch auf Seite 243 bestimmen

Methode 2: Schwingversuche

für alle Strecken anwendbar, die den Schwingversuch aushalten

- Schritt: Einen RK mit P-Regler aufbauen
- Schritt: Verstärkung K_p erhöhen bis der RK Dauerschwingungen ausführt
 => Kritische Verstärkung $K_{p,krit}$
 => Kritische Periodendauer T_{krit}
- Schritt: Reglerparameter gemäß Tabelle 8.3 im Buch auf Seite 244 bestimmen

3.2.2 Reglereinstellung nach Chien, Hrones und Reswick

Seiten: 244 bis 245

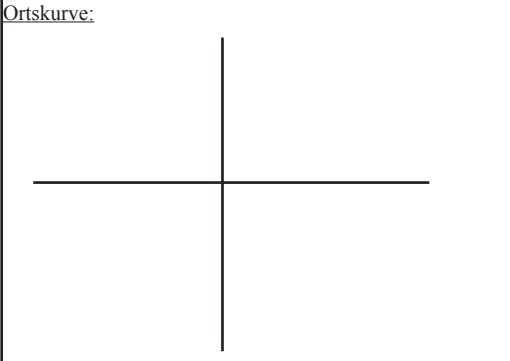
- Schritt: Streckensprungantwort aufnehmen
- Schritt: Wendetangenverfahren durchführen
- Schritt: Parametereinstellung gemäß Tabelle 8.4 im Buch auf Seite 245 bestimmen

4. Reglersynthese im Bode-Diagramm

Grundlagen Seiten: 163, 183

Darstellung des offenen RK

Char. Gleichung: $F_o(j\omega) = -1$
 Kritischer Punkt $-1 \Rightarrow 0\text{dB} / -180^\circ$



Stabiler RK = $\varphi_{\text{rand}} > 0$ & $A_{\text{Rand}} > 1$

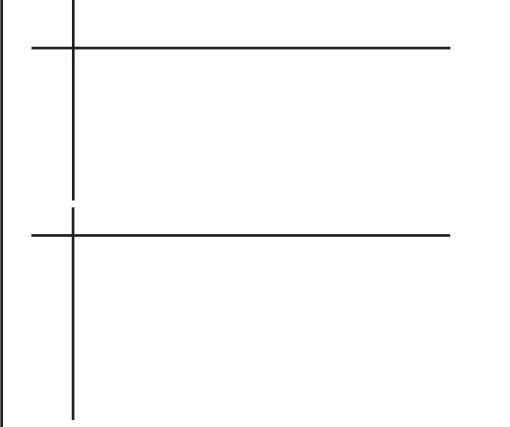
$$A_{\text{Rand}} = \text{Amplitudenrand} = \frac{1}{|F_o(j\omega_{\text{krit}})|}$$

$\angle F_o(j\omega_{\text{krit}}) = -180^\circ$

$\varphi_{\text{rand}} = \text{Phasenrand } |F_o(j\omega_D)| = 1 \text{ (} \equiv 0\text{dB)}$
 $\omega_D = \text{Durchtrittsfrequenz}$

$D \sim \varphi_{\text{rand}}$

Bode Diagramm:



Bode Diagramme von Strecken
 Seiten: 164 bis 176

Bode Diagramme von Reglern
 Seiten: 176 bis 182

Übersicht
 Seiten: 410 bis 413

4.1 Entwurfsanforderung im Bode Diagramm

Seiten: 184 bis 189

- 1.) Stabilität $\varphi_{\text{rand}} > 0$
- 2.) „gutes Führungsverhalten“
 - Stationäre Genauigkeit
 - Schnelligkeit
 - Dämpfung
- 3.) Robustheit

a) Stationäre Genauigkeit im Führungsverhalten
 - I-Anteil im RK
 \Rightarrow Amplitudengang beginnt mit -20dB/Dek Gefälle
 \Rightarrow Phasengang beginnt bei -90°

b) Schnelligkeit

$$\text{Anregelzeit } T_{\text{AN}} = \frac{\pi}{\omega_D}$$


$$D = \frac{\sin(\varphi_{\text{rand}})}{2 * \sqrt{[\cos(\varphi_{\text{rand}})]}}$$

Gutes Führungsverhalten für $\varphi_{\text{rand}} = 50^\circ \dots 60^\circ$

Gutes Störverhalten für $\varphi_{\text{rand}} = 30^\circ$

4.2 Bode Diagramme zeichnen

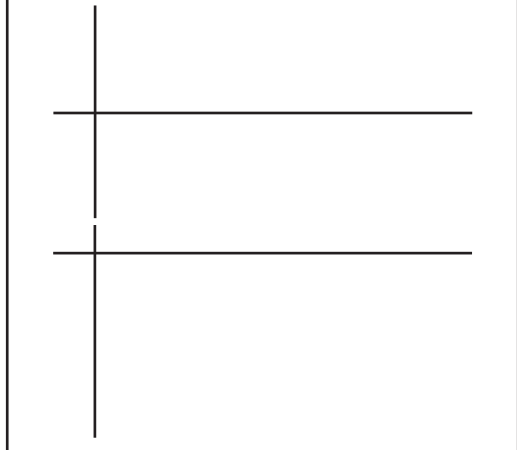
Siehe RT1 Formelblatt bzw. Streckenübersicht

4.3 Approximation von Führungs- und Störampplitudengang

Seiten: 187 bis 188

$$|F_w(j\omega)| = \begin{cases} F_o(j\omega) & = 1 \text{ für } \omega < \omega_D \\ 1 + F_o(j\omega) & = |F_o(j\omega)| \text{ für } \omega > \omega_D \end{cases}$$

$$|F_z(j\omega)| = \begin{cases} F_s(j\omega) & = |1/F_R(j\omega)| \text{ für } \omega < \omega_D \\ 1 + F_o(j\omega) & = |F_s(j\omega)| \text{ für } \omega > \omega_D \end{cases}$$



4.4 Grenzen der Regelgüte

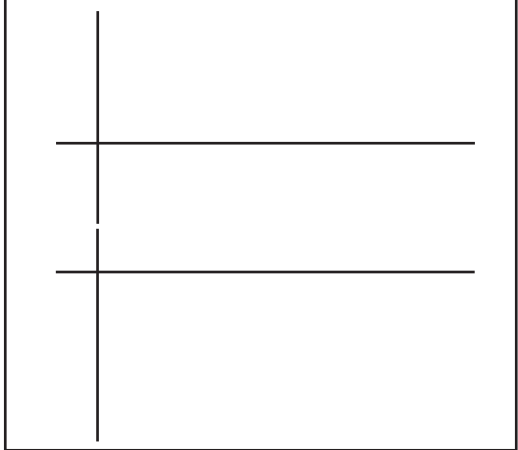
Nicht Prüfungsrelevant

4.5 Das symmetrische Optimum

Seiten: 194 bis 199

= Einstellverfahren für integrierende Strecken / Regler
 Keine dynamische Kompensation durchführen da sonst ein grenzstabiler RK entsteht

\Rightarrow Einstellung gemäß Tabelle 6.1 auf Seite 199 in Abhängigkeit der Strecke und des Reglers
 $T_\Sigma = \text{Summe der Zeitkonstanten des Systems}$



5. Reglersynthese mit der Wurzelortskurve

5.1 Definition WOK

Seiten: 203

Char. Gl: $1 + K_p * F_o(s) = 0$

=> Variation von K_p

WOK = Grafische Darstellung der Lösungen („Wurzeln“) der Char. Gl. in der s-Ebene in Abhängigkeit von der Reglerverstärkung K_p , die verändert wird.

5.2 Zeichnen der WOK

Seiten: 205 bis 207

Siehe Zeichenblatt

Bsp: PT_2 -Strecke + P-Regler

$$F_o(s) = \frac{4}{(s+2) * (s+4)}$$

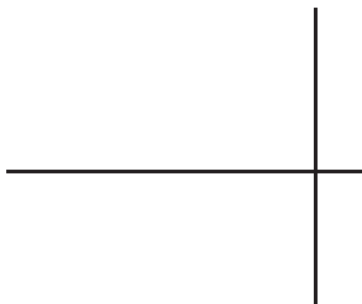
1. Regel:

$n = 2; m = 0$

=> Alle Pole und Nst von $F_o(s)$ in der s-Ebene eintragen, WOK hat 2 Äste die ins unendliche Streben

3. Regel:

Wurzelort zwischen den Polen



4. + 5. Regel:

Asymptoten = Geraden an die sich die Äste, die ins Unendliche laufen, anschmiegen

Asymptoten Schnittpunkt: $s_w = (-2-4) / (2-0) = -3$

Asymptoten Winkel: $\varphi_i = (2i + 1) * (\pi/2)$

=> $\varphi_0 = \pi/2$ $\varphi_1 = 3/2 * \pi$

6. Regel:

Verzweigungspunkte

$$-\sum_{i=1}^2 \frac{1}{s_v - s_{oi}} = -\frac{1}{s_v + 2} - \frac{1}{s_v + 4} = 0$$

=> $s_v = -3$ (zufällig gleicher wert wie s_w)

7. Regel:

Reglerverstärkung für Doppelpol in -3

$$F_o(s) = \frac{b_0 + b_1 * s + \dots + b_m * s^m}{a_0 + a_1 * s + \dots + a_n * s^n}$$

$Q = b_m / a_n \Rightarrow Q = 4 / 1 = 4$

$$K_p(s) = \frac{1}{Q} \prod_{i=1}^2 |s - s_{oi}| \quad (s = \text{betrachteter Punkt})$$

Pole des offenen RK

$$K_p(s) = \frac{1}{4} |-3 - (-2)| * |-3 - (-4)| = 1/4$$

Alternative Q Bestimmung (andere Funktion):

$$F_o(s) = \frac{4s + 1}{(3s + 2) * (1/2s + 1)}$$

=> Alle Faktoren vor s ausklammern

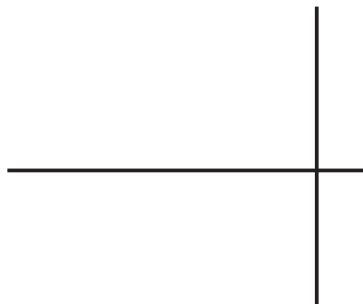
$$F_o(s) = \frac{4}{3 * 1/2} * \frac{s + 1/4}{(s + 2/3) * (s + 2)} = Q$$

zu 5.2 Zeichnen der WOK

Seiten: ???

Wurzelortskurve

Char. Gl: $1 + K_p * F_o(s) = 0$



Elementare WOK Regeln

1.) Die ins unendliche laufenden WOK-Äste verteilen sich gleichmäßig über die 360° des zur Verfügung stehenden Raums

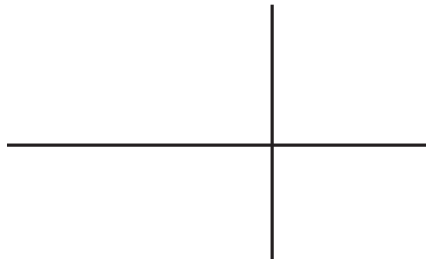
2.) Die Pole / WOK-Äste stoßen sich gegenseitig ab. Von Nullstellen werden sie angezogen.

Beispiel: Regelung der instabilen Schwebestrecke

$$F_s(s) = \frac{1}{s^2 - 1}$$

1.) PI Regler

$$F_R(s) = K_p * \frac{1 + T_N * s}{T_N}$$



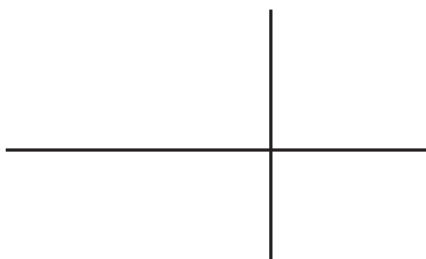
2.) Realer PD Regler

$$F_R(s) = K_p * \frac{1 + T_V * s}{1 + T_D * s}$$

$T_D \ll T_V$



3.) PID Regler



5.3 Entwurfsanforderungen in der s-Ebene

Seiten: 210 bis 223

Führungssprungantwort



1.) Stabilität => alle Pole links

2.) Dämpfung

$$D = \cos \varphi = \frac{|\ln \ddot{u}|}{\sqrt{\pi^2 + (\ln \ddot{u})^2}}$$

3.) Anregelzeit

$$T_{AN} = \frac{\pi}{\omega_0}$$

Dominanz von Polen

1.) Je näher ein Pol am Ursprung liegt, umso wichtiger ist er für das Zeitverhalten

2.) Je näher ein Pol bei einer Nullstelle liegt, umso unwichtiger ist er für das Zeitverhalten

=> Bei Systemen höherer Ordnung führt man evtl. eine Ordnungsreduktion durch

6. Nichtlineare Regelkreise

6.1 Eigenschaften nichtlinearer Regelkreise

Seiten: 291 bis 293

Definition: Lineares System

= Verstärkungssatz („Verdopplung Eingang = Verdopplung Ausgang“)

+ Überlappungsgesetz



Nichtlineares System

Die Reihenfolge der Blöcke darf nicht vertauscht werden



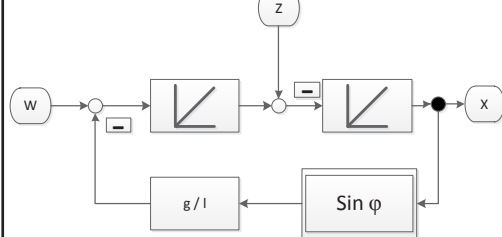
Stabilität nichtlinearer Systeme:

Beispiel: Pendel-Nichtlinearer BSB

hängendes Pendel => Stabile Ruhelage bei $\varphi = 0$

mit Einzugsbereich $-\pi < \varphi < \pi$

stehendes Pendel => instabile Ruhelage: $\varphi = \pi$



=> Stabilität gilt nicht mehr global

=> RK evtl nur in einem Einzugsbereich

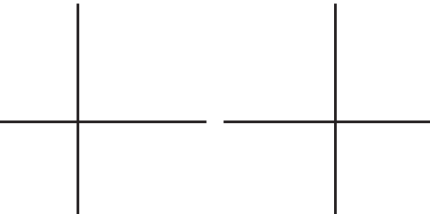
=> Ein nichtlineares System verhält sich in jedem Betriebspunkt anders

6.2 Beispiele nichtlinearer Regler

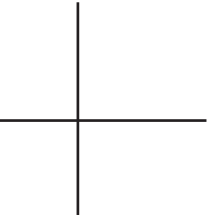
Seiten: 301 bis 306

Neu: Regelung durch stabile Schwingung

Zweipunktregler



Dreipunktregler

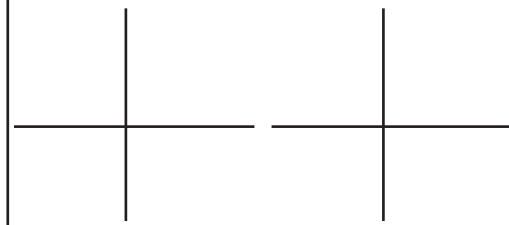


6.2 Beispiele nichtlinearer Strecken

Seiten: 292

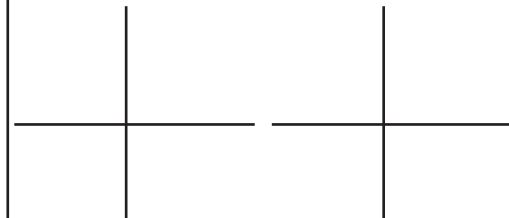
Begrenzer

Reibung



Tote Zone

Getriebe



6.3 Die Harmonische Balance zur Stabilitätsprüfung nichtlinearer Regelkreise

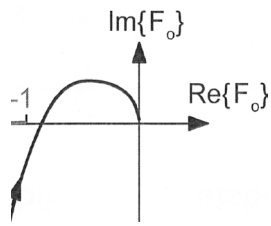
Seiten: 294 bis 299

Lineare RK - Nyquist Kriterium



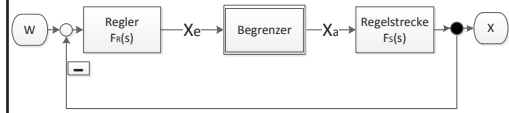
Char. Gl.: $1 + F_o(j\omega) = 0 \Rightarrow F_o(j\omega) = -1$

Ortskurve stabiler RK

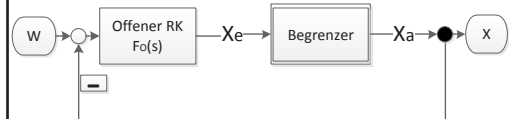


Harmonische Balance

1.) Schritt: Nichtlinearer RK, hier: mit Begrenzer

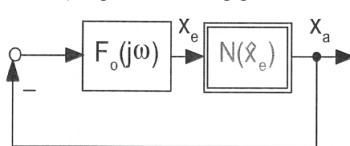


2.) Schritt: Lineare Blöcke zusammenfassen



X_a enthält Oberschwingungen, diese werden vernachlässigt

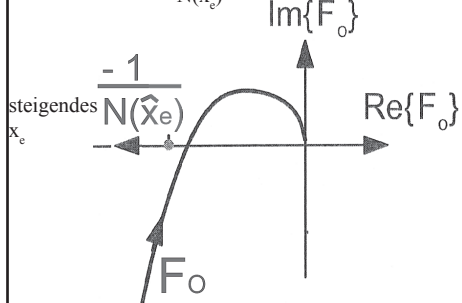
3.) Schritt: Beschreibungsfunktion $N(\hat{x}_e)$ anstelle des Begrenzers (Amplitudenabhängige Verstärkung)



Aber: N ist immernoch nichtlinear

=> Char. Gl.: $1 + N(\hat{x}_e) * F_o(j\omega) = 0$

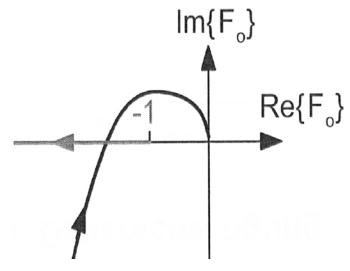
$$F_o(j\omega) = \frac{-1}{N(\hat{x}_e)}$$



zu 6.3 Das Zweiortskurvenverfahren

Seiten: 308 bis 315

= Interpretation der Lagebeziehung zwischen der Ortskurve $F_o(j\omega)$ und der negativ inversen Beschreibungsfunktion $-1/N(\hat{x}_e)$



1.) Schneiden sich die Ortskurven, so gibt es Dauerschwingungen (wie z.B. hier)

2.) Diese Dauerschwingungen können stabil oder instabil sein.

- Aus $\text{Im}\{F_o(j\omega_{krit})\} = 0$ kann die Schwingfrequenz berechnet werden
- Aus $F_o(j\omega_{krit}) = -1/N(\hat{x}_e)$ lässt sich die Amplitude \hat{x}_{ei} berechnen

zu 6.3 Berechnung der Beschreibungsfunktion

Beispiel Begrenzer

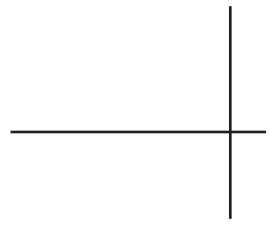
Seiten: 298 bis 299

Rechnung siehe Buch

Plausibilitätstest:

1.) $x_e = x_m \Rightarrow \alpha_1 = \pi/2 \Rightarrow N(x_e = x_m) = 0$
 $\Rightarrow 1/N(x_e = x_m) = -1$

2.) $x_e = \infty \Rightarrow \alpha_1 = 0 \Rightarrow N(x_e \rightarrow \infty) = 0$
 $\Rightarrow 1/N(x_e \rightarrow \infty) = -\infty$



Weitere Berechnungen im Buch:

Vorlast - Seite 300-301

Idealer Zweipunktregler - Seite 301-302

Zweipunktregler mit Hysterese - Seite 302-305

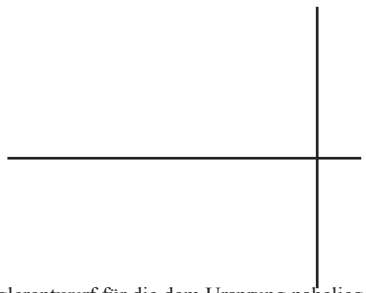
Dreipunktregler - Seite 305-306

Magnetisierungskennlinie - Seite 306-307

zu 6.3 Zwei Methoden zum Umgang mit Streckenichtlinearitäten

Seiten: ???

1.) Strecken an mehreren wichtigen Betriebspunkten linearisieren - PN-Diagramm der Strecke

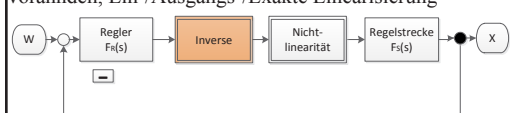


=> Reglerentwurf für die dem Ursprung naheliegenden

2.) Nichtlineare Kennlinie an Strckeneingang

= Nichtlinearität durch Inverse Funktion aufheben

=> Verallgemeinerung für alle nichtlinearen Strecken vorhanden, Ein-/Ausgangs-/Exakte Linearisierung



6.4 Schaltende Regler

Nicht Prüfungsrelevant

Seiten: 324 bis 329 (idealer Zweipunktregler)