

1 Grundlagen

Linearisierung um Arbeitspunkt:

$$x_a(t) = x_{a,AP} + \Delta x_a(t) \approx x_{a,AP} + \sum \left(\frac{\partial f}{\partial x_{ei,AP}} \cdot \Delta x_{ei}(t) \right)$$

Mechanisches Modell:

$$F_G = m \cdot g$$

Für kleine Winkel α gilt: $\sin(\alpha) = \alpha$
rollende Kugel:

$$m_{eff} = M_{Kugel} + m_{virtuellRotation}$$

$$v = r \cdot \dot{\omega}$$

$$M = J \cdot \dot{\omega}$$

Rotation in Flüssigkeit:

$$M = M_{Träg} + M_{Brems} = J \cdot \dot{\omega} + k_{Flüssigkeit} \cdot \omega$$

2 Systemtechnik

2.1 Modellbildung

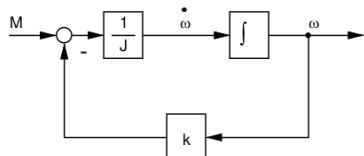
Hinweise zum aufstellen der Differentialgleichung eines Systems:

1. Bestimmung der Ein- und Ausgangsgrößen
2. Suche nach dem beschreibenden Gleichgewicht
3. In der Gleichung dürfen nur Konstanten, sowie die Ein- und Ausgangsgrößen in beliebiger Ableitung vorkommen
4. Andere Variablen müssen durch erlaubte Größen ersetzt werden (Dazu können i.a. physikalische Gleichungen benutzt werden)

2.2 Signalflussplan/Blockschaltbild

Erzeugung des Signalflussplans aus der Zugehörigen DGL.

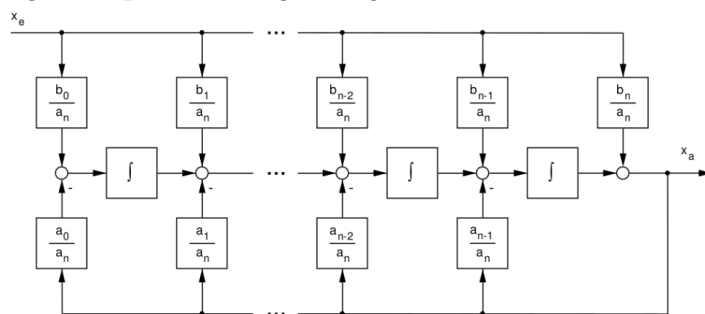
für technische Realisierung gilt: $m < n$;
Dgl. nach höchster Ableitung der Ausgangsgröße auflösen
höchste Ableitung der Ausgangsgröße geht auf den Eingang des ersten Integrators
(Laplace-Trans ersetzt das Integrieren mit einer Division mit „s“)



Erzeugung des Signalflussplans eines Systems mit der Dgl.:

$$\begin{aligned} a_n^{(n)} x_a + \dots + a_2 \ddot{x}_a + a_1 \dot{x}_a + a_0 x_a \\ = b_n^{(n)} x_e + \dots + b_2 \ddot{x}_e + b_1 \dot{x}_e + b_0 x_e \end{aligned}$$

Signalflussplan kann allgemein gezeichnet werden:



2.3 Stabilität

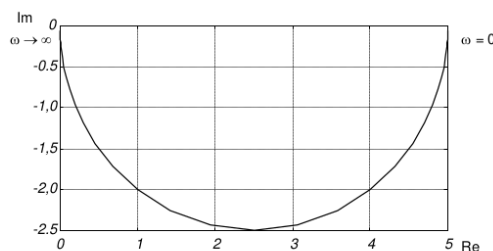
BIBO-Stabilität (Bounded Input/ Bounded Output-> begrenzt):

ein dynamisches System ist stabil, wenn gilt:

für ein begrenztes x_e gibt es immer ein begrenztes x_a

2.4 Ortskurven und Frequenzkennlinien

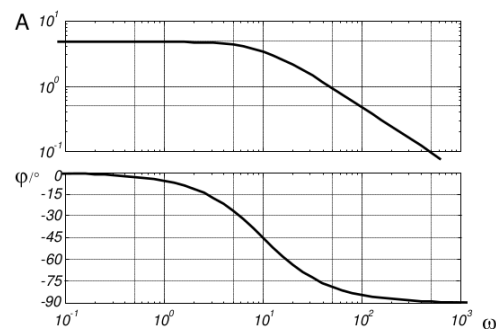
Ortskurvendarstellung:



Für wachsendes ω werden die komplexen Werte $F(j\omega)$ in die komplexe F-Ebene eingetragen und zur Ortskurve verbunden.

Jeder Ortskurvenpunkt kann jetzt als Zeiger gedeutet werden.

Bodediagrammdarstellung:



Der Amplitudengang $A(\omega)$ wird in doppeltlogarithmischer Darstellung aufgetragen, der Phasengang $\varphi(\omega)$ halblogarithmisch. Gemeinsame Abszisse ist ω .

Bei diesem Beispiel (PT1-Glied) ist deutlich der Tiefpass-Charakter zu erkennen.

Verkettete Funktionen im Bodediagramm resultieren als Produkt der Einzelübertragungsfunktionen.

D.h. Verstärkung wird multipliziert und Phasenverschiebung addiert. Das heißt: Sowohl Phasengang (halblogarithmische Darstellung) und Amplitudengang (logarithmische Darstellung) werden graphisch addiert!

2.5 $F(s)$ in Pol- und Nullstellenform

Zähler- und Nennerpolynom von $F(s)$ besitzt Nullstellen. Diese sind von a_v und b_u abhängig.

Nullstellen des Zählers sind Nullstellen von $F(s)$

Nullstellen des Nenners sind Polstellen von $F(s)$

Wenn Pole s_{pv} und Nullstellen $s_{N\mu}$ bekannt, kann man $F(s)$ mit dem Faktor Q in faktorisierte Form darstellen.

$$F(s) = Q \cdot \frac{\prod_{\mu=1}^m (s - s_{N\mu})}{\prod_{v=1}^n (s - s_{pv})} \quad \text{mit } Q = \frac{b_m}{a_n}$$

Die Stabilität von $F(s)$ kann anhand der Lage der Pole s_{pv} in der s-Ebene beurteilt werden.

$F(s)$ ist stabil, wenn alle Pole s_{pv} in der linken s-Halbebene liegen.

Instabile Pole in der Rechten Halbebene lassen sich nicht durch Reihenschaltung mit entsprechender Nullstelle kompensieren!

Bedeutung Polstelle:

Pole bewirken ein zeitverzögertes Verhalten. je weiter links sie sich befinden, desto schneller ist der Einschwingvorgang.

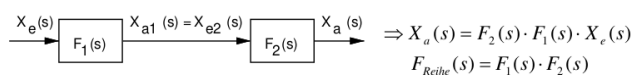
=> Wenn Pole deutlich weiter links liegen als andere, kann man sie ohne großen Fehler vernachlässigen.

Bedeutung Nullstelle:

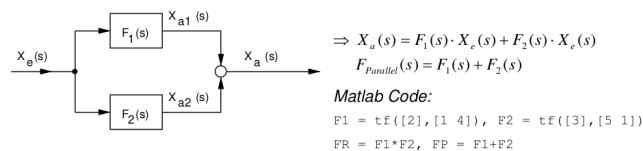
NS bewirken ein differenzierendes Verhalten (Beschleunigung des Systems) Einfluss weit links in der s-Ebene kann häufig vernachlässigt werden.

2.6 Signalflussplanalgebra

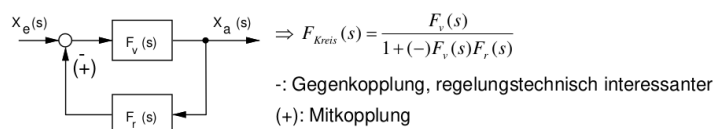
Kettenstruktur:



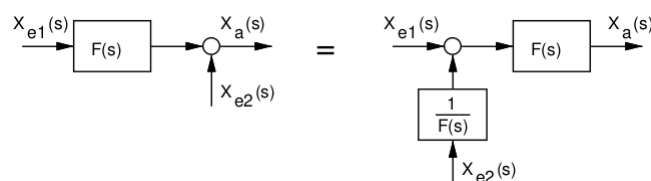
Parallelstruktur:



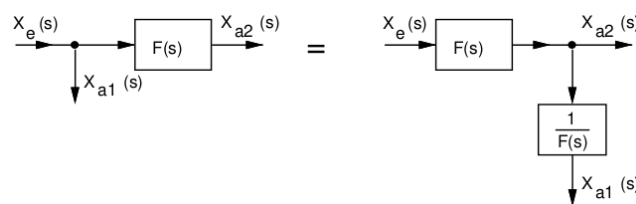
Kreisstruktur:



Verschieben einer Additionsstelle:



Verschieben einer Verzweigung:



3 Zusammenwirken mehrerer Systeme

3.1 Regelkreis

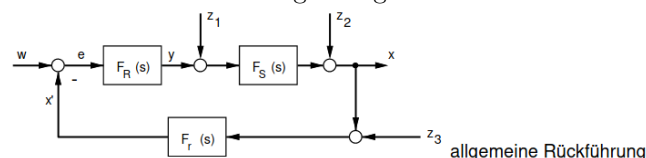
Anforderungen:

Stabilität: Regelkreis muss stabiles Verhalten zeigen (gilt auch für instabile Systeme)

Gutes Führungsverhalten: Die Differenz zw. Sollwert $w(t)$ und Istwert $x(t)$ muss schnell klein werden.

Gutes Störverhalten: Einfluss von Störgrößen soll vermindert werden.

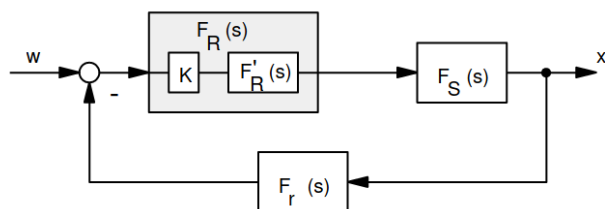
Grundstruktur deseinschleifigen Regelkreises



Regler	$F_R(s)$	Regelstrecke $F_S(s)$	bleibende Regeldifferenz e (oder x_d)	
			für $x_e = a \cdot \sigma(t)$ (Sprung) mit Rückführverstärkung K_r	für $x_e = a \cdot t$ (Rampe) mit Einheitsrückführung
P (D)	K_p	P-Verhalten (P, PT1, PT2, ...)	$a \frac{1}{1 + K_p \cdot K_S \cdot K_r}$	∞
I	$\frac{K_I}{s}$		0	$a \frac{1}{K_I \cdot K_S}$
PI (D)	$K_p + \frac{K_I}{s}$		0	$a \frac{1}{K_I \cdot K_S}$
I ²	$\frac{K_I}{s^2}$	I-Verhalten (I, PI, IT1, ...)	0	0
P (D)	K_p		0	$a \frac{1}{K_p \cdot K_S}$
I	$\frac{K_I}{s}$		0	0
PI (D)	$K_p + \frac{K_I}{s}$		0	0

3.2 Wurzelortskurven (WOK)-Verfahren

Reglerfunktion F_R in Reglerverstärkung und Reglerdynamik aufspalten: $F_R = K \cdot F'_R$



$$\Rightarrow F_w(s) = \frac{F_R \cdot F_S}{1 + F_R \cdot F_S \cdot F_r}$$

Dabei ist $F_o = F_R \cdot F_S \cdot F_r$ die Übertragungsfunktion des offenen Regelkreises. F_o kann auch in faktorisierte Form angegeben werden:

$$\begin{aligned} F_w(s) &= F_R(s) \cdot F_S(s) \cdot F_r(s) \\ &= K \cdot F'_R(s) \cdot F_S(s) \cdot F_r(s) \\ &= K \cdot Q \cdot \frac{\prod_{u=1}^m (s - s_{\text{Nou}})}{\prod_{v=1}^n (s - s_{\text{pov}})} \end{aligned}$$

Für eine Polstelle, muss der Nenner von $F_w(s)$ Null werden:

$$\frac{F_R(s) \cdot F_S(s)}{1 + F_o(s)} \Rightarrow 1 + F_o(s) \stackrel{!}{=} 0$$

Daraus folgt:

$$\begin{aligned} \Rightarrow 1 + K \cdot Q \cdot \frac{\prod_{M=1}^m (s - s_{\text{Nou}})}{\prod_{v=1}^n (s - s_{\text{por}})} \\ \Rightarrow \frac{\prod_{v=1}^n (s - s_{\text{pov}})}{\prod_{u=1}^m (s - s_{\text{Nou}})} \stackrel{!}{=} -K \cdot Q \end{aligned}$$

Entspricht: $\frac{\text{Summe des Abstands aller Polstellen zum gesuchten Punkt}}{\text{Summe des Abstands aller Nullstellen zum gesuchten Punkt}}$

3.3 Konstruktion der WOK

1. Alle n Äste der WOK beginnen mit $K=0$ in den n Polen s_{pov} des offenen Regelkreises.
2. m Äste der WOK enden für $K \rightarrow \pm\infty$
3. n - m Äste der WOK enden für $K \rightarrow \pm\infty$ im Unendlichen
4. Die n-m ins Unendliche strebende Äste der WOK haben Asymptoten, die
 - a) im Wurzelschwerpunkt

$$S_w = \frac{\sum_{v=1}^n s_{pov} - \sum_{u=1}^m s_{Nou}}{n - m}$$

beginnen und die dabei

b) mit der reellen Achse die Winkel

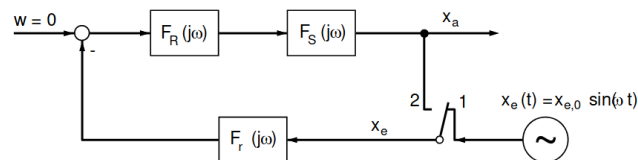
$$\varphi_k = \frac{(2k-1) \cdot 180^\circ}{n-m} \text{ für } KQ > 0 \text{ bzw.}$$

mit $k = 1, 2, 3, \dots, n-m$

5. Die Punkte der WOK liegen entweder auf der reellen Achse, oder symmetrisch zur reellen Achse
6. Ein Punkt s auf der reellen Achse ist dann ein Punkt der WOK, wenn sich bei $KQ > 0$ ($KQ < 0$) rechts von ihm eine ungerade (gerade) Anzahl von Polen s_{pov} und (+) Nullstellen s_{Nou} befindet.

Achtung: WOK ist nicht anwendbar, wenn es sich um nicht rationale Übertragungsfunktionen handelt. (z.B. Regelkreis mit Totzeitverhalten!)

3.4 Nyquist Kriterium



Frequenzgangfunktion des offenen Regelkreises:

$$F_o(j\omega) = F_r(j\omega) \cdot F_R(j\omega) \cdot F_S(j\omega)$$

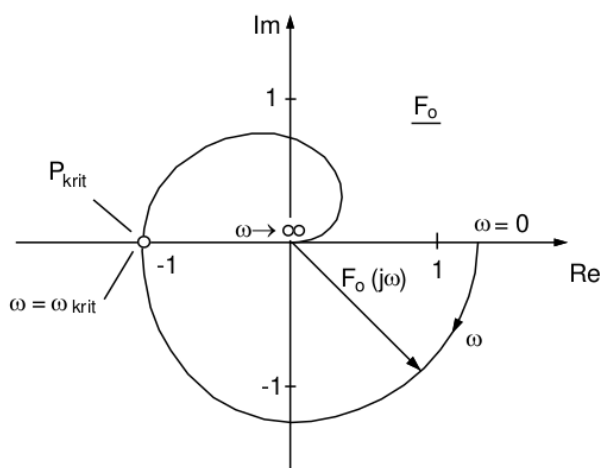
Ausgangssignal:

$$x_a(t) = -F_r(j\omega) \cdot F_R(j\omega) \cdot F_S(j\omega) \cdot x_{e,0} \sin(\omega t) = -F_o(j\omega) \cdot x_e(t)$$

Regler und seine Parameter werden so gewählt, dass $\omega = \omega_{krit}$ gilt:

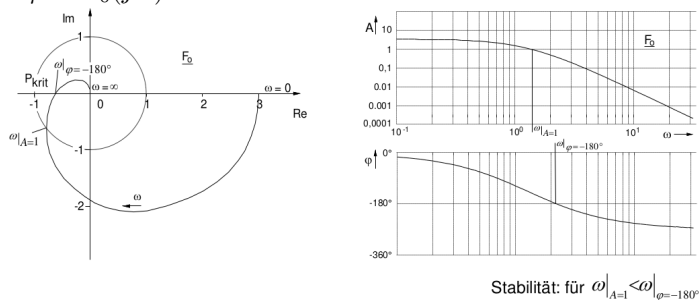
$$-F_o(j\omega_{krit}) = 1 \text{ oder } F_o(j\omega_{krit}) = -1 \text{ (Schwingbedingung)}$$

Die Schwingbedingung ist erfüllt, wenn die Ortskurve von $F_1(j\omega)$ durch den kritischen Punkt ($P_{krit} = -2 + j0$) der komplexen F_0 -Ebene geht. An diesem Punkt kann man ω_{krit} ablesen (damit kann der Regelkreis Dauerschwingungen ausführen). Für größere ω ist das System instabil, für kleinere stabil.



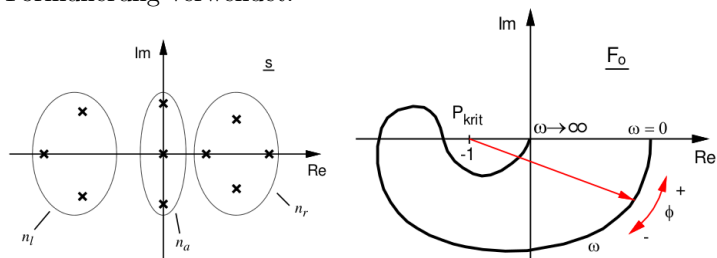
Falls $F(s)$ des offenen Kreises keine Pole in der rechten Halbebene hat und nur max. 2 im Ursprung der s -Ebene, ist der Regelkreis stabil, wenn der kritische Punkt von ω immer links von $s = -1 + 0j$ liegt. (gilt immer wenn der offene Kreis stabil ist)

Zur Auswertung des Nyquist-Kriteriums im Bode Diagramm, spaltet man die Ortskurve nach Betrag $A = |F_0(j\omega)|$ und Phase $\varphi = \angle F_0(j\omega)$



Stabilität: für $\omega|_{|A|=1} < \omega|_{\varphi=-180^\circ}$

Falls die Bedingung nicht funktioniert, wird die allgemeine Formulierung verwendet:



Der geschlossene Regelkreis ist stabil, wenn der Fahrstrahl von $P_{krit} = -1 + j0$ zu $F_0(j\omega)$ für wachsendes ω von $+0$ bis $+\infty$ eine Winkeländerung $\Delta\phi_{soll} = n_r \cdot 180^\circ + n_a \cdot 90^\circ$ erfährt.

n_r : Anzahl der Pole rechts der imaginären Achse

n_a : Anzahl der Pole auf der imaginären Achse

Phasenrad/Phasenreserve:

Aus Bodediagramm ablesen: Bei Verstärkung von 1,

Winkeln von -180° nach oben rechnen

Für befriedigendes Verhalten bei Störungen gilt: $\varphi_R \geq 30^\circ$

Für gutes Verhalten (überschwingungsarm) gilt: $\varphi_R \approx 60^\circ$

Für gutes Verhalten (überschwingungsfrei) gilt: $\varphi_R \geq 80^\circ$

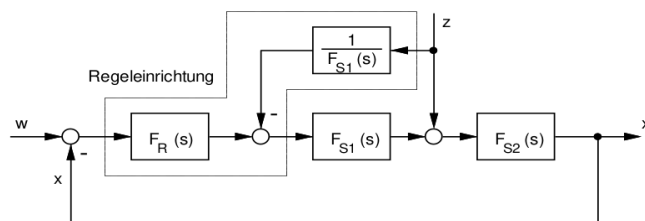
3.5 Einstellregler Ziegler/Nichols

3.6 Maßnahmen zur Verbesserung des Regelkreisverhaltens und Erweiterungen der Regelkreisstruktur

Störgrößenaufschaltung:

Falls Angriffsort einer Störgröße bekannt, kann man wie im Bild kompensieren.

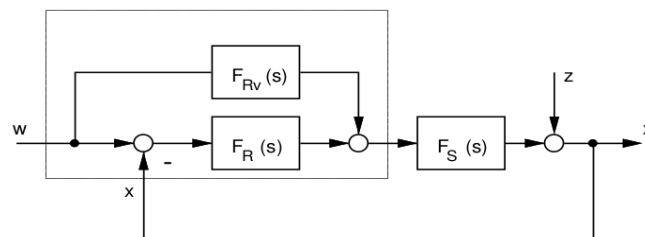
Vorteil: einfacher Reglerentwurf, deutlich schnellere Ausregelung.



Vorsteuerung:

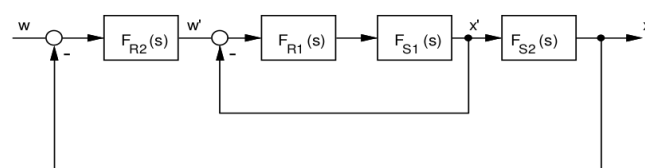
Geeignet, falls kein Kompromiss für gutes Stör- und Folgeverhalten.

Regler ist auf gutes Störverhalten ausgelegt. Mit F_{Rv} wird ein schnelles Folgen auf Führungssignale $w(t)$ erreicht.



Kaskadenregelung:

Ineinander geschachtelte Regelkreise (innere Regelkreise „schneller“). „Innere“ Störungen können bereits innen ausgeregt werden. Können von Innen nach Außen in Betrieb genommen werden.

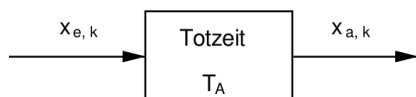


4 Digitale Regler

4.1 Allgemeines

4.2 z-Transformation

Wert der bei $t = k \cdot T_A$ ausgegeben wird, wird bei $t = (k-1) \cdot T_A$ eingelesen. (Verzögerung um einen Abtastschritt):



	Kontinuierlich	Zeitdiskret
Zeitbereich	$x_a(t) = x_e(t - T_A)$	$x_{a,k} = x_{e,k-l}$
Bildbereich	$X_a(s) = e^{-sT_A} \cdot X_e(s)$ (Laplace-Transformation)	$X_a(z) = z^{-l} \cdot X_e(z)$ (z-Transformation)

Bei der z-Transformation entspricht $e^{-s \cdot T_A}$ der Laplace-Transformation dem Ausdruck z^{-1} . Bzw $z \triangleq e^{s \cdot T_A}$
Transformation vom s-Bereich in den z-Bereich:

$$s \triangleq e^{s \cdot T_A}$$

Vorwärtsdifferenzenquotient

$$s \triangleq \frac{z-1}{T_A}$$

⇒ Der digitale Regler kann folgend berechnet werden:

$$F(z) = F(s) \Big|_{s=\frac{z-1}{T_A}}$$

Tustinsche Formel

$$s \triangleq \frac{2}{T_A} \cdot \frac{z-1}{z+1}$$

Rückwärtsdifferenzenquotient

5 Systembeschreibung im Zustandsraum

5.1 Allgemein (Mehrgrößensystem MIMO)

$$\dot{\vec{x}}(t) = A\vec{x}(t) + B\vec{u}(t); \quad x(0) = x_0; \quad \vec{y}(t) = C\vec{x}(t) + D\vec{u}(t) \quad (1)$$

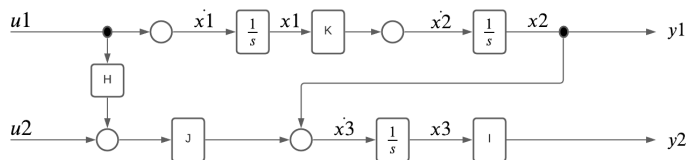


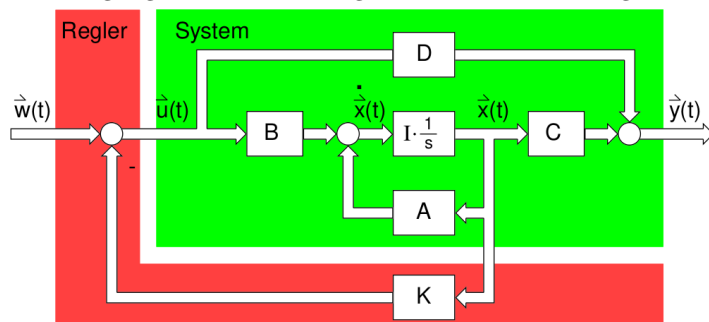
Abbildung 1: Signalflussplan

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= 0 \cdot x_1 + 0 \cdot x_2 + 0 \cdot x_3 + 1 \cdot u_1 + 0 \cdot u_2 \\ \dot{x}_2 &= K \cdot x_1 + 0 \cdot x_2 + 0 \cdot x_3 + 0 \cdot u_1 + 0 \cdot u_2 \\ \dot{x}_3 &= 0 \cdot x_1 + 0 \cdot x_2 + 0 \cdot x_3 + H \cdot J \cdot u_1 + J \cdot u_2 \\ \dot{y}_1 &= 0 \cdot x_1 + 1 \cdot x_2 + 0 \cdot x_3 + 0 \cdot u_1 + 0 \cdot u_2 \\ \dot{y}_2 &= 0 \cdot x_1 + 0 \cdot x_2 + l \cdot x_3 + 0 \cdot u_1 + 0 \cdot u_2 \end{aligned}$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ K & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad C = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & l \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \\ H \cdot J & J \end{bmatrix} \quad D = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Polfestlegung durch vollständige Zustandsrückführung



Durch die freie Wahl von K können alle n Pole des Systems beliebig platziert werden.

5.2 Programmtechnische Umsetzung

Zähler und Nenner der z-Übertragungsfunktion durch die höchste Potenz teilen

```
while(1){
    waitinterrupt();
    xout2 = xout1;
    xout1 = xout;
    xin2 = xin1;
    xin1 = xin;
    input(xin);
    xout = k*xout2 - j*xin1 + o*xout1;
    output(xa);
}
```