

kleine Zustände hat System:
 $G(s) \rightarrow$ Grad des Nenners
 DGL $\rightarrow$ Ordnung (höchste Abl.)

relatives Grad β :
 Nennegrad - Zählergrad

$G(s) = H(s) \cdot S \rightarrow$ Sprung
 (H(s) = Laplace Transf. der Sprungantwort)

Lineares System mit Ordnung n hat genau n Polstellen

Ordnung Zählerpolynom = Nennerpolynom
 $\Leftrightarrow$ Sys **springfähig**

Bedingung stabiles System $\Rightarrow$ Impulsantwort = 0

Impulsantwort = Ableitung Sprungantwort

$\{b_0, b_1, \dots, b_n, a_1, a_2, \dots, a_n\}$ bei Umformung auf RNV ändern sich die EW des Systems

Regulierungsnormform (Schreibweise)

$$\dot{x} = \underbrace{\begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ -a_0 & -a_1 & -a_2 & \dots & -a_{n-1} \end{bmatrix}}_A x + \underbrace{\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ \dots \\ 0 \end{bmatrix}}_B u$$

$$y = \underbrace{\begin{bmatrix} b_0 & b_1 & b_2 & \dots & b_{n-1} \end{bmatrix}}_C x + \underbrace{d}_{b_n}$$

ZRD $\rightarrow G(s) = C^T (sI - A)^{-1} b + d$

DGL $\rightarrow$ ZRD:

- nach höchsten Abl. auflösen
- $x_1 = y, x_2 = \dot{y} = x_1, x_3 = \ddot{y} = \dot{x}_1$
- in Matrix:

$$a_1 x_2 = a_1 x_1 + a_0 x_1 + b_1 \dot{y} + b_0 y$$

$\hookrightarrow$ asymptotisch stabil ($\Leftrightarrow$ alle EW < 0)

instabil $\Leftrightarrow \min \operatorname{Re}(\lambda) > 0$ oder mehrfach $\operatorname{Re}(\lambda) = 0$

grenzstabil $\Leftrightarrow \forall \operatorname{Re}(\lambda) \leq 0$ und $\forall \operatorname{Re}(\lambda) = 0$ sind A-fach (keine Diagonale)

wenn kein Realteil = EW auf Im-Achse

Stabilitätskriterium LTI-System:

$\rightarrow$ asymptotisch stabil: $\int_0^\infty |g(t)| dt < \infty$

$\rightarrow$ grenzstabil: FB Schwingung

$\rightarrow$ instabil: $\int_0^\infty |g(t)| dt = \infty$

Berechnungsvorgehens für $y(t)$ für alle ZRD:

$$x(t) = e^{A(t-t_0)} x(t_0) + \int_{t_0}^t e^{A(t-\tau)} B u(\tau) d\tau$$

$$y(t) = C e^{A(t-t_0)} x(t_0) + \int_{t_0}^t C e^{A(t-\tau)} B u(\tau) d\tau + D u(t)$$

Impulsantwort eines Systems: Bsp: $\frac{1}{s}$ (System als DGL gegeben)

$$g(t) = \mathcal{L}^{-1}\{G(s)\}$$

$$= \mathcal{L}^{-1}\left\{\frac{1}{s}\right\} = \mathcal{L}^{-1}\left\{\frac{1}{s^2 + 2s + 1}\right\} = \mathcal{L}^{-1}\left\{\frac{1}{(s+1)^2}\right\} = t e^{-t}$$

$$= \mathcal{L}^{-1}\left\{\frac{1}{(s+1)^2}\right\} = \mathcal{L}^{-1}\left\{\frac{1}{(s+1)^2}\right\} = t e^{-t}$$

$$= \mathcal{L}^{-1}\left\{\frac{1}{(s+1)^2}\right\} = \mathcal{L}^{-1}\left\{\frac{1}{(s+1)^2}\right\} = t e^{-t}$$

$$= \mathcal{L}^{-1}\left\{\frac{1}{(s+1)^2}\right\} = \mathcal{L}^{-1}\left\{\frac{1}{(s+1)^2}\right\} = t e^{-t}$$

$$= \mathcal{L}^{-1}\left\{\frac{1}{(s+1)^2}\right\} = \mathcal{L}^{-1}\left\{\frac{1}{(s+1)^2}\right\} = t e^{-t}$$

$$= \mathcal{L}^{-1}\left\{\frac{1}{(s+1)^2}\right\} = \mathcal{L}^{-1}\left\{\frac{1}{(s+1)^2}\right\} = t e^{-t}$$

Sprungantwort:
 Totzeit $\rightarrow e^{-sT}$
 Überschwingen $\rightarrow$ komplex konj. Pole
 Startwert 0 $\rightarrow$ Nennegrad $>$ Zählergrad
 Startwert $x = 20 \log |G(0)|$
 Pol $> 0 \rightarrow$ Wachstum gegen ∞

Bode diagramm:
 Ordg. Zähler-Ordg. Nenner. Wert bei $\pm \infty$
 Endsteigung: $-20 \frac{dB}{\text{Dec}}$ (je Pol -20 dB)
 Phase bei $\omega \rightarrow \infty$: je Polpaar $+180^\circ$ je Null. -180°
 Einbruch bei Null im Zähler
 Start 0° wenn $G(0) > 0$, -180° wenn $G(0) < 0$

Zeitkonstante Verstärkung
 $T^2 y + 2dT \dot{y} + y = Ku$
 Dämpfung

Stabilität (Bis):

$\rightarrow$ asymptotisch stabil, wenn alle Pole in linker S-Halbebene liegen

$= \operatorname{Re}(p_i) < 0$ für alle Pole p_i

$\hookrightarrow$ notwendige Determinanten (FS)

$a_0 - a_1$: 1) $a_0 > 0$ 2) $a_0 a_1 - a_2 a_0 > 0$ stabil

oder mit Tabelle:

$$\begin{matrix} s^4 & a_4 & a_2 & a_0 \\ s^3 & a_3 & a_1 & \\ s^2 & b_4 & b_2 & \\ s^1 & c_4 & & \\ s^0 & a_0 & & \end{matrix}$$

$$b_2 = \frac{a_2 a_0 - a_1^2}{a_3}$$

$$c_4 = \frac{b_4 a_1 - a_2 b_2}{b_2}$$

$$b_4 = \frac{a_4 a_0 - a_2 a_2}{a_3}$$

$$c_4 = \frac{b_4 a_1 - a_2 b_2}{b_2}$$

$$b_2 = \frac{a_2 a_0 - a_1^2}{a_3}$$

$$c_4 = \frac{b_4 a_1 - a_2 b_2}{b_2}$$

$$b_4 = \frac{a_4 a_0 - a_2 a_2}{a_3}$$

$$c_4 = \frac{b_4 a_1 - a_2 b_2}{b_2}$$

$$b_2 = \frac{a_2 a_0 - a_1^2}{a_3}$$

$$c_4 = \frac{b_4 a_1 - a_2 b_2}{b_2}$$

$$b_4 = \frac{a_4 a_0 - a_2 a_2}{a_3}$$

$$c_4 = \frac{b_4 a_1 - a_2 b_2}{b_2}$$

$$b_2 = \frac{a_2 a_0 - a_1^2}{a_3}$$

$$c_4 = \frac{b_4 a_1 - a_2 b_2}{b_2}$$

$$b_4 = \frac{a_4 a_0 - a_2 a_2}{a_3}$$

$$c_4 = \frac{b_4 a_1 - a_2 b_2}{b_2}$$

$$b_2 = \frac{a_2 a_0 - a_1^2}{a_3}$$

$$c_4 = \frac{b_4 a_1 - a_2 b_2}{b_2}$$

$$b_4 = \frac{a_4 a_0 - a_2 a_2}{a_3}$$

$$c_4 = \frac{b_4 a_1 - a_2 b_2}{b_2}$$

$$b_2 = \frac{a_2 a_0 - a_1^2}{a_3}$$

$$c_4 = \frac{b_4 a_1 - a_2 b_2}{b_2}$$

$$b_4 = \frac{a_4 a_0 - a_2 a_2}{a_3}$$

$$c_4 = \frac{b_4 a_1 - a_2 b_2}{b_2}$$

$$b_2 = \frac{a_2 a_0 - a_1^2}{a_3}$$

$$c_4 = \frac{b_4 a_1 - a_2 b_2}{b_2}$$

$$b_4 = \frac{a_4 a_0 - a_2 a_2}{a_3}$$

$$c_4 = \frac{b_4 a_1 - a_2 b_2}{b_2}$$

Asymptotische Steigung: $20(n-m) \frac{dB}{\text{Dec}}$
 Bsp: $G(s) = \frac{3s(s+1)}{(s+10)^2} e^{-8s}$ } Grad 2 = n
 } Grad 3 = m
 $20(2-3) \frac{dB}{\text{Dec}} = -20 \frac{dB}{\text{Dec}} \rightarrow \lim_{\omega \rightarrow \infty} \frac{dA_4(\omega)}{d\omega} = -20 \frac{dB}{\text{Dec}}$

asymptotischer Phasenwinkel einer Übertragungsfkt.:
 Zähler: $s+1 \rightarrow +90^\circ$
 $s-a \rightarrow -90^\circ$
 in Zähler nur -4! Winkel +180°
 Nenner: $s+a \rightarrow +90^\circ$
 $s-a \rightarrow -90^\circ$

Integrator $\frac{1}{s}$ zu System hinzufügen $\rightarrow$ Phase wird $-20 \frac{dB}{\text{Dec}}$ verschoben

G(s) Aussagen Systemantwort:
 Impulsantwort: $\lim_{s \rightarrow \infty} s G(s)$
 Sprungantwort: $\lim_{s \rightarrow 0} G(s)$
 oder $\lim_{s \rightarrow 0} s G(s)$
 bei instabilem System Sprungantwort $\rightarrow 0$

Diagramm $G(j\omega)$ zeichnen:

1. s=0 einsetzen $\rightarrow$ Startwert auf Re-Achse

2. komplex konj. Pole oder Start bei $-\infty$

$\hookrightarrow$ Bewegung nach rechts

Sprungantwort von $g(t)$:

$$y(t) = \int_0^t g(\tau) d\tau$$

$$u(t) = \delta(t) \rightarrow u(t-\tau) = 1 \text{ für } \tau \leq t$$

$$g(t) * \delta(t) = \int_0^t g(\tau) d\tau$$

$$u(t) = \delta(t) \rightarrow u(t-\tau) = 1 \text{ für } \tau \leq t$$

$$g(t) * \delta(t) = \int_0^t g(\tau) d\tau$$

$$u(t) = \delta(t) \rightarrow u(t-\tau) = 1 \text{ für } \tau \leq t$$

$$g(t) * \delta(t) = \int_0^t g(\tau) d\tau$$

$$u(t) = \delta(t) \rightarrow u(t-\tau) = 1 \text{ für } \tau \leq t$$

$$g(t) * \delta(t) = \int_0^t g(\tau) d\tau$$

$$u(t) = \delta(t) \rightarrow u(t-\tau) = 1 \text{ für } \tau \leq t$$

$$g(t) * \delta(t) = \int_0^t g(\tau) d\tau$$

$$u(t) = \delta(t) \rightarrow u(t-\tau) = 1 \text{ für } \tau \leq t$$

$$g(t) * \delta(t) = \int_0^t g(\tau) d\tau$$

$$u(t) = \delta(t) \rightarrow u(t-\tau) = 1 \text{ für } \tau \leq t$$

$$g(t) * \delta(t) = \int_0^t g(\tau) d\tau$$

$$u(t) = \delta(t) \rightarrow u(t-\tau) = 1 \text{ für } \tau \leq t$$

$$g(t) * \delta(t) = \int_0^t g(\tau) d\tau$$

$$u(t) = \delta(t) \rightarrow u(t-\tau) = 1 \text{ für } \tau \leq t$$

$$g(t) * \delta(t) = \int_0^t g(\tau) d\tau$$

$$u(t) = \delta(t) \rightarrow u(t-\tau) = 1 \text{ für } \tau \leq t$$

$$g(t) * \delta(t) = \int_0^t g(\tau) d\tau$$

$$u(t) = \delta(t) \rightarrow u(t-\tau) = 1 \text{ für } \tau \leq t$$

$$g(t) * \delta(t) = \int_0^t g(\tau) d\tau$$

$$u(t) = \delta(t) \rightarrow u(t-\tau) = 1 \text{ für } \tau \leq t$$

$$g(t) * \delta(t) = \int_0^t g(\tau) d\tau$$

$$u(t) = \delta(t) \rightarrow u(t-\tau) = 1 \text{ für } \tau \leq t$$

$$g(t) * \delta(t) = \int_0^t g(\tau) d\tau$$

$$u(t) = \delta(t) \rightarrow u(t-\tau) = 1 \text{ für } \tau \leq t$$

$$g(t) * \delta(t) = \int_0^t g(\tau) d\tau$$

$$u(t) = \delta(t) \rightarrow u(t-\tau) = 1 \text{ für } \tau \leq t$$

$$g(t) * \delta(t) = \int_0^t g(\tau) d\tau$$

System diagonalisierbar:
 $\Leftrightarrow \forall \lambda$: geo Vielfachheit = algeb. Vielfachheit
 Bei 2x2: $\begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix}$
 für * 0 nicht diag!

Def. Laplace:

$$\mathcal{L}\{f(t)\} = \int_0^\infty f(t) e^{-st} dt$$

$$\mathcal{L}^{-1}\left\{\frac{1}{(s+2)^2}\right\} = t e^{-2t}$$

$$\mathcal{L}^{-1}\left\{\frac{1}{(s+2)^2}\right\} = t e^{-2t}$$

$$\mathcal{L}^{-1}\left\{\frac{1}{(s+2)^2}\right\} = t e^{-2t}$$

$$\mathcal{L}^{-1}\left\{\frac{1}{(s+2)^2}\right\} = t e^{-2t}$$

$$\mathcal{L}^{-1}\left\{\frac{1}{(s+2)^2}\right\} = t e^{-2t}$$

$$\mathcal{L}^{-1}\left\{\frac{1}{(s+2)^2}\right\} = t e^{-2t}$$

$$\mathcal{L}^{-1}\left\{\frac{1}{(s+2)^2}\right\} = t e^{-2t}$$

$$\mathcal{L}^{-1}\left\{\frac{1}{(s+2)^2}\right\} = t e^{-2t}$$

$$\mathcal{L}^{-1}\left\{\frac{1}{(s+2)^2}\right\} = t e^{-2t}$$

$$\mathcal{L}^{-1}\left\{\frac{1}{(s+2)^2}\right\} = t e^{-2t}$$

$$\mathcal{L}^{-1}\left\{\frac{1}{(s+2)^2}\right\} = t e^{-2t}$$

$$\mathcal{L}^{-1}\left\{\frac{1}{(s+2)^2}\right\} = t e^{-2t}$$

$$\mathcal{L}^{-1}\left\{\frac{1}{(s+2)^2}\right\} = t e^{-2t}$$

$$\mathcal{L}^{-1}\left\{\frac{1}{(s+2)^2}\right\} = t e^{-2t}$$

$$\mathcal{L}^{-1}\left\{\frac{1}{(s+2)^2}\right\} = t e^{-2t}$$

$$\mathcal{L}^{-1}\left\{\frac{1}{(s+2)^2}\right\} = t e^{-2t}$$

$$\mathcal{L}^{-1}\left\{\frac{1}{(s+2)^2}\right\} = t e^{-2t}$$

$$\mathcal{L}^{-1}\left\{\frac{1}{(s+2)^2}\right\} = t e^{-2t}$$

$$\mathcal{L}^{-1}\left\{\frac{1}{(s+2)^2}\right\} = t e^{-2t}$$

$$\mathcal{L}^{-1}\left\{\frac{1}{(s+2)^2}\right\} = t e^{-2t}$$

$$\mathcal{L}^{-1}\left\{\frac{1}{(s+2)^2}\right\} = t e^{-2t}$$

$$\mathcal{L}^{-1}\left\{\frac{1}{(s+2)^2}\right\} = t e^{-2t}$$

$$\mathcal{L}^{-1}\left\{\frac{1}{(s+2)^2}\right\} = t e^{-2t}$$

Gesamtauftragungsfkt. Blockschaltbild:

$\rightarrow$ parallel addieren

$\rightarrow$ in Reihe multiplizieren

Feedback Loop Regeln:

$\rightarrow$ im Nenner nur einmal 1+...

$\rightarrow$ mehrere Loops werden addiert

$\rightarrow$ wenn nicht 1 steht, dann 1...

Gibt es ZRD des Systems, bei der Matrix

Diagrammform hat 2:

$\rightarrow$ ja, wenn alle EW unterschiedlich sind

$\rightarrow$ EW = Polstellen des Übertragungsfkt., jede Matrix mit verschiedenen versch. EW ist diagonalisierbar, deshalb 2 so eine ZRD.

$\rightarrow$ gibt es nicht, wenn beide gegebenen Matrizen unterschiedliche EW haben

Anzahl Pole kann $<$ Anzahl EW

char. Polynom ZRD: $p(s) = \det(sI - A)$

geschlossene Form $u(t)$ einer Sprungfkt.:

$$u(t) = u(-\infty) + \sum_{k=1}^n \Delta u_k \cdot \theta(t - t_k)$$

$$u(t) = u(-\infty) + \sum_{k=1}^n \Delta u_k \cdot \theta(t - t_k)$$

$$u(t) = u(-\infty) + \sum_{k=1}^n \Delta u_k \cdot \theta(t - t_k)$$

$$u(t) = u(-\infty) + \sum_{k=1}^n \Delta u_k \cdot \theta(t - t_k)$$

$$u(t) = u(-\infty) + \sum_{k=1}^n \Delta u_k \cdot \theta(t - t_k)$$

$$u(t) = u(-\infty) + \sum_{k=1}^n \Delta u_k \cdot \theta(t - t_k)$$

$$u(t) = u(-\infty) + \sum_{k=1}^n \Delta u_k \cdot \theta(t - t_k)$$

$$u(t) = u(-\infty) + \sum_{k=1}^n \Delta u_k \cdot \theta(t - t_k)$$

$$u(t) = u(-\infty) + \sum_{k=1}^n \Delta u_k \cdot \theta(t - t_k)$$

$$u(t) = u(-\infty) + \sum_{k=1}^n \Delta u_k \cdot \theta(t - t_k)$$

$$u(t) = u(-\infty) + \sum_{k=1}^n \Delta u_k \cdot \theta(t - t_k)$$

$$u(t) = u(-\infty) + \sum_{k=1}^n \Delta u_k \cdot \theta(t - t_k)$$

$$u(t) = u(-\infty) + \sum_{k=1}^n \Delta u_k \cdot \theta(t - t_k)$$

DGL für Moden $\rightarrow$ modale ZRD:

1) $\dot{x}_1 + 4x_1 = 8u \Leftrightarrow \dot{x}_1 = -4x_1 + 8u$

$\dot{x}_2 + 7x_2 = -15u \Leftrightarrow \dot{x}_2 = -7x_2 - 15u$

$y(t) =$

Wie lässt sich um Taylorlinearisierung einer Fkt. handeln?
 → Linearisierung um Arbeitspunkt x_0 erhält man, indem man
 Taylorreihe nach linearem Term abbricht:
 $f(x) \approx f(x_0) + f'(x_0)(x - x_0)$

DGL um Ruhelage x_s linearisieren:

$\Delta x = x - x_s$ bei $x_0 = 0: \Delta x = x$
 $\Delta \dot{x} = \dot{x} - \dot{x}_s$
 $\Delta \ddot{x} = \ddot{x} - \ddot{x}_s$

Bestimmung Ruhelage: $\ddot{x} = 0, \dot{x} = 0, x = 0$

partielle Ableitungen nach $x, \dot{x}$ berechnen,
 x_s einsetzen, dann in Taylor einsetzen

$\Delta \ddot{x} = f(x_s, \dot{x}_s) + \frac{\partial f}{\partial x} \Big|_{x_s, \dot{x}_s} \Delta x + \frac{\partial f}{\partial \dot{x}} \Big|_{x_s, \dot{x}_s} \Delta \dot{x}$

Bsp.: $\ddot{x} = -\alpha(1 - x^2)x + x = 0$

$\Leftrightarrow f(x, \dot{x}) = \ddot{x} = -\alpha(1 - x^2)x + x$

$\frac{\partial f}{\partial x} = \alpha(1 - 2x)x - \alpha \rightarrow$ bei $x_0 = 0: -\alpha$

$\frac{\partial f}{\partial \dot{x}} = \alpha(1 - x^2) \rightarrow$ bei $x_0 = 0: \alpha$

$\Rightarrow \Delta \ddot{x} = -\alpha \Delta x + \alpha \Delta \dot{x} \Leftrightarrow \ddot{x} - \alpha \dot{x} + \alpha x = 0$

ERD aus Zustandsgrößen $X(s)$: Bsp:

- geg. $x_1(s), x_2(s), Y(s)$
 $x_1(s)$ nach $(s+1)x_1(s) = k u(s)$
 $x_2(s) = \frac{6}{s+2} u(s) \Leftrightarrow (s+2)x_2(s) = 6 u(s)$
 $x_1 + 2x_2 = 2 u(s)$
 $x_1 = -2x_2 + 2 u(s)$
 $x_2 = -2x_1 + 6 u(s)$
 $x = \begin{bmatrix} -6 & 0 \\ 0 & -2 \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} 2 \\ 6 \end{bmatrix} u$
- $\dot{x} = x$
 $\dot{x}(t) = x(t)$
 $\dot{x}(t) = x(t)$
 $\dot{x}(t) = x(t)$
- nach $\dot{x}$ umstellen
- Regelnormalform

Inverse 2x2 Matrix:

$A = \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix}$
 $A^{-1} = \frac{1}{ad-bc} \begin{pmatrix} d & -b \\ -c & a \end{pmatrix}$

bei stabilen lin. Sys.
 alle Einträge e^{At}
 beschränkt für $t > 0$

$\ln(1) = 0$
 $\ln(e) = 1$

Transitionsmatrix bestimmen:

- Ähnlichkeitstransformation
- inverse Laplace transformierte

$\dot{x} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} x \Rightarrow e^{At} = \cos(t)I + \sin(t)A$
 $\dot{x} = \begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix} x \Rightarrow e^{At} = \begin{pmatrix} e^{at} & b \frac{e^{at}-e^{dt}}{a-d} \\ c \frac{e^{at}-e^{dt}}{a-d} & e^{dt} \end{pmatrix}$
 $\dot{x} = \begin{bmatrix} a & b \\ 0 & d \end{bmatrix} x \Rightarrow e^{At} = \begin{pmatrix} e^{at} & b \frac{e^{at}-e^{dt}}{a-d} \\ 0 & e^{dt} \end{pmatrix}$

Bedeutung Transitionsmatrix e^{At} :

- Wie sich System auch ohne Eingang u entwickelt
- Fundamentallösung, homogene Lösung

$\dot{x} = \begin{bmatrix} a & 0 \\ 0 & b \end{bmatrix} x \Rightarrow e^{At} = \begin{pmatrix} e^{at} & 0 \\ 0 & e^{bt} \end{pmatrix}$
 $\dot{x} = \begin{bmatrix} a & a \\ 0 & a \end{bmatrix} x \Rightarrow e^{At} = \frac{e^{at}(1 - \lambda_2 t) - e^{a_2 t}(1 - \lambda_1 t)}{\lambda_1 - \lambda_2}$
 $\dot{x} = \begin{bmatrix} a & b \\ 0 & d \end{bmatrix} x \Rightarrow e^{At} = e^{at} \cdot \begin{bmatrix} 1 & b \frac{e^{at}-e^{dt}}{a-d} \\ 0 & e^{dt} \end{bmatrix}$

P-Regler:

- Vorteile:**
 - schnell, einfach,
 - erhöht Schleifenverstärkung
 - besonders geeignet: wenn schnelle Reaktion wichtig
 ↳ System ist Typ $\geq 1 \Rightarrow \geq 1$ Pole bei 0
- Nachteile:**
 - bleibender Fehler Typ 0 System
 - schwache Störumdrückung

PID-Regler:

- Vorteile:**
 - D reduziert Überschwingung
 - flexible Anpassung, genauer
 - besonders geeignet: gut bekanntes Modell, Genauigkeit wichtig
 ↳ bei Typ 0 - kein Pol bei 0
- Nachteile:**
 - empfindlich auf Messrauschen
 - aufwendige Parametrierung

PI-Regler:

- Vorteile:**
 - Integrator → kein stationärer Regelfehler bei Sprung = 0
 - gute Störumdrückung bei konstanten Störungen
- Nachteile:**
 - geringere Stabilitätsreserven,
 - da -90° Phase durch Integrator
 - Gefahr Überschwingung / Schwingungen
- wann ist PID besonders gut?
 - System ist Typ 0 (0 Pole bei $s=0$) → bleibender Fehler!
 ↳ wird von Integrator des PI korrigiert

Berechnung Matrix L:

$L = \det(sI - (A-LC))$ → $p(s)$ mit gewünschten EW gleichsetzen, Koeffizientenvergleich

Frequenzgang Übertragungsfkt.:

- Nenner so weit wie mögl. faktorisieren
- $s = j\omega$ setzen ($\rightarrow G(j\omega)$)

Amplitudengang Übertragungsfkt.:

$|G(j\omega)|$ berechnen $\frac{1}{\sqrt{1+\omega^2}}$
 $G(j\omega) = \frac{1}{(j\omega+3)(j\omega+2)} = -\frac{1}{\omega^2}$
 $G(j\omega) = \frac{1}{4} \frac{(1-\omega^2+j\omega)(j\omega-5)}{(1-\omega^2+j\omega)(j\omega+4)}$
 $A(\omega) = \frac{\omega}{\sqrt{(1-\omega^2)^2 + \omega^2} \sqrt{\omega^2 + 25}}$

Phasengang $\varphi(\omega) = \arg(G(j\omega))$

wenn $G(s) = K \cdot \frac{\prod(s+z_i)}{\prod(s+p_i)}$ → $\varphi(\omega) = \arg(K) + \sum_i \arg(s+z_i) - \sum_i \arg(s+p_i)$

arctan bestimmen

$\arg(j\omega+1)^2 = \arg(j\omega+1) + \arg(j\omega+1) = 2 \arctan\left(\frac{\omega}{1-\omega^2}\right)$
 $\arg(a+j\omega) = \arctan\left(\frac{\omega}{a}\right)$, $\arg\left(\frac{1}{a}\right) = -\frac{\pi}{2}$
 $\arg\left(\frac{1}{a+j\omega}\right) = -\arctan\left(\frac{\omega}{a}\right)$

Wieso wird Phasengang mit arctan berechnet?:

Phase komplexer Zahl = Winkel zu Re-Achse in komplexer Halbebene.
 Achsenabschnitte $\hat{=}$ Re oder Im-Teil, → Winkel in Δ -Dreieck für kompl. Zahl auf Einheitskreis wird berechnet durch $\varphi = \arctan\left(\frac{\text{Im}}{\text{Re}}\right)$

Laplace-transformierte von fct) aus Skizze:

$m \frac{e^{-as}}{s^2}$
 a = Zeitpunkt, ab dem diese Steigung verläuft (dort Steigungsänderung)
 m = Steigungswertwechsel $m_{neu} - m_{alt}$



$x(t)$ für const. Eingang $u(t) = u_0$:

$x(t) = e^{At} x(0) + \int_0^t e^{A(t-\tau)} B u_0 d\tau$
 substituieren $s = t - \tau$

ERD in $\mathbb{R}^{2 \times 2}$: Trans. Matrix T_R zu

Transformation auf Regelungsnormalform:
 $T_R = \begin{bmatrix} sI_k & 0 \\ 0 & sI_k \end{bmatrix}^{-1} = \begin{bmatrix} 1/s & 0 \\ 0 & 1/s \end{bmatrix}$ wobei: sI_k = Steuerbarkeitsm.
 $[B \ AB \ A^2B \ \dots \ A^{n-1}B]$ = $[0 \ 1] [B \ AB]^{-1}$
 Bedingung: $[B \ AB]$ hat vollen Rang, det $\neq 0$

Ähnlichkeitstransformation: EW gleich, EV verändert

Linearisierung:

- jeden Teil ableiten - d Teil
 - y_0 bzw. u_0 einsetzen
 - Zusammenfassen
- Bsp.: $4\ddot{y} + \cos(y) + y = 2(u-1)^2$
 $y_0 = \frac{\pi}{2}, u_0 = 1$
 $8\ddot{y} + \Delta y \rightarrow 0$
 $-\sin(y) \Delta y \rightarrow -\sin(\frac{\pi}{2}) \Delta y = -\Delta y$
 $-\sin(y+y_0) \Delta y \rightarrow -\sin(\frac{\pi}{2}) \Delta y = -\Delta y$
 $4(u-1) \Delta u \rightarrow 0$
 $\Rightarrow -\Delta y - \Delta y = 0$

$\int_0^t f(\tau) d\tau = \frac{1}{s} f(s)$

$f(x)$	$\frac{1}{s} \cos^2(x)$	$\tan(x)$	$\frac{1}{1+x^2}$
$\int f(x) dx$	$\tan(x)$	$-\ln \cos(x) $	$\arctan(x)$

	0	$\frac{\pi}{6}$	$\frac{\pi}{4}$	$\frac{\pi}{3}$	$\frac{\pi}{2}$	$\frac{2\pi}{3}$	$\frac{3\pi}{4}$	$\frac{5\pi}{6}$	π	$\frac{7\pi}{6}$	$\frac{5\pi}{4}$	$\frac{4\pi}{3}$	$\frac{3\pi}{2}$	$\frac{5\pi}{3}$	$\frac{7\pi}{4}$	$\frac{2\pi}{3}$	2π
D	0	30°	45°	60°	90°	120°	135°	150°	180°	210°	225°	240°	270°	300°	315°	330°	360°
sin	0	$\frac{1}{2}$	$\frac{\sqrt{2}}{2}$	$\frac{\sqrt{3}}{2}$	1	$\frac{\sqrt{3}}{2}$	$\frac{\sqrt{2}}{2}$	$\frac{1}{2}$	0	$-\frac{1}{2}$	$-\frac{\sqrt{2}}{2}$	$-\frac{\sqrt{3}}{2}$	-1	$-\frac{\sqrt{3}}{2}$	$-\frac{\sqrt{2}}{2}$	$-\frac{1}{2}$	0
cos	1	$\frac{\sqrt{3}}{2}$	$\frac{\sqrt{2}}{2}$	$\frac{1}{2}$	0	$-\frac{1}{2}$	$-\frac{\sqrt{2}}{2}$	$-\frac{\sqrt{3}}{2}$	-1	$-\frac{\sqrt{3}}{2}$	$-\frac{\sqrt{2}}{2}$	$-\frac{1}{2}$	0	$\frac{1}{2}$	$\frac{\sqrt{2}}{2}$	$\frac{\sqrt{3}}{2}$	1
tan	0	$\frac{1}{\sqrt{3}}$	1	$\sqrt{3}$	-	$-\sqrt{3}$	-1	$-\frac{1}{\sqrt{3}}$	0	$\frac{1}{\sqrt{3}}$	1	$\sqrt{3}$	-	$-\sqrt{3}$	-1	$-\frac{1}{\sqrt{3}}$	0