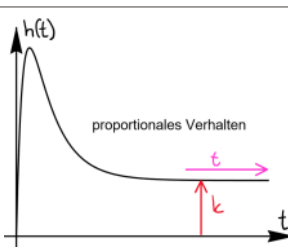
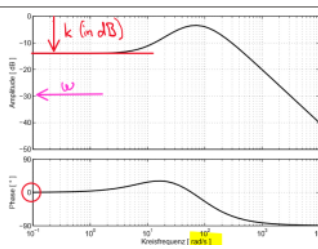
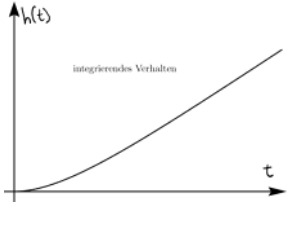
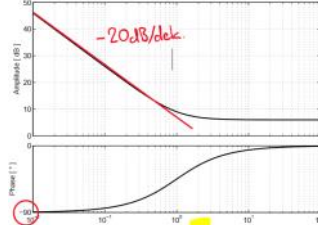
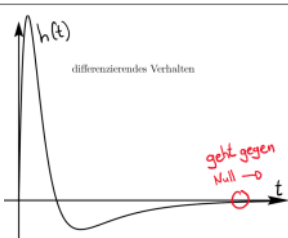
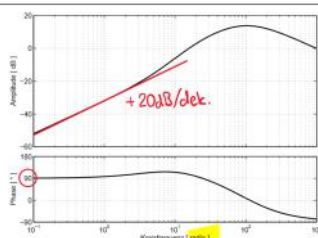


## Systemidentifikation

### Grundsätzliche Systemverhalten

|   | Sprungantwort                                                                     | Bodeplot                                                                          | Anmerkungen                                                                         |
|---|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| P |  |  | $G(s) = \frac{\dots + s + \beta}{\dots + s + \alpha}$<br><br>Bode, Start mit Gerade |
| I |  |  | $G(s) = \frac{(\dots)}{s \cdot (\dots)}$                                            |
| D |  |  | $G(s) = \frac{s \cdot (\dots)}{(\dots)}$                                            |

Die kleinen Frequenzen sind aussagekräftig

### Wichtige Aspekte bei der Systemidentifikation

- Es lassen sich auch instabile Systeme identifizieren müssen aber über ein Regler stabilisiert werden.
- Ein System liefert nur über den Frequenzbereich Informationen, über den es auch angeregt wird.
- Die Systemanregung sollte so hoch wie möglich gewählt werden, folgendes ist zu beachten:
  - Das System muss im linearen Bereich arbeiten (Begrenzung/Sättigung beachten)
  - Das System muss sicher betrieben werden
  - Für unterschiedliche Frequenzbereiche müssen evtl. verschiedene Anregungen gewählt werden und der Gesamt Frequenzgang danach zusammengesetzt werden.
- Als Systemanregung kommen verschiedene Signalformen in Frage, z.B. logarithmisch ansteigende Chirp-Signale
- Werte des gewonnenen Frequenzganges können überprüft werden, indem die ermittelte Funktion an einer Stelle  $\omega$  ausgewertet wird.

### Vorgehen

- Arbeite von links nach rechts im Bodeplot (kleine zu grossen Frequenzen)

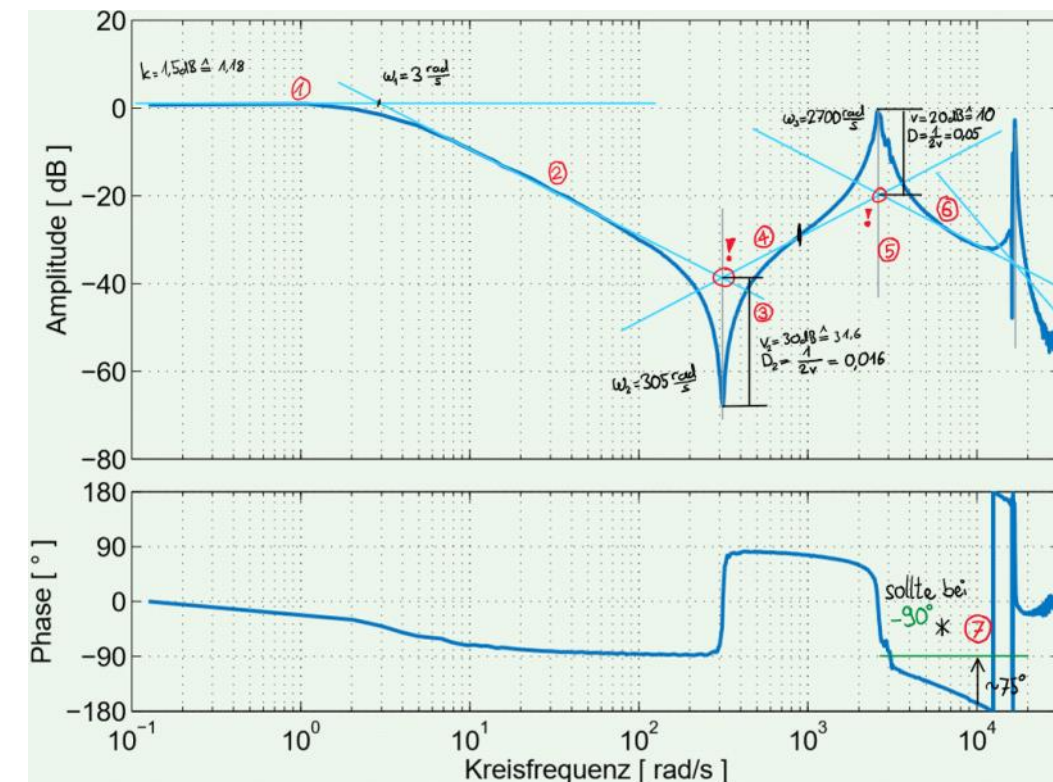
- Identifiziere grundsätzliches Systemverhalten:
  - Bei **proportionalen Systemen**: lese das Gain direkt bei kleinen Frequenzen ab
  - Bei **integrierenden Systemen**: Schneide erste Asymptote mit 0dB Linie und lese Frequenz  $\omega_0$  ab.  $G_1(s) = \frac{\omega_0}{s}$
  - Bei **differenzierenden Systemen**: Schneide erste Asymptote mit 0dB Linie und lese Frequenz  $\omega_0$  ab.  $G_1(s) = \frac{s}{\omega_0}$
- Identifiziere nächsten Knick:
  - Abknicken des Amplitudengang bei  $\omega_i$  nach **oben** um +20dB/dek wird durch eine Nullstelle verursacht.  

$$\frac{s + \omega_i}{\omega_i} = \frac{1}{\omega_i} \cdot s + 1$$
  - Abknicken des Amplitudengang bei  $\omega_i$  nach **unten** um -20dB/dek wird durch eine Nullstelle verursacht.  

$$\frac{\omega_i}{s + \omega_i} = \frac{1}{\frac{1}{\omega_i} \cdot s + 1}$$
  - Bei eng aufeinanderliegenden Knicken muss mit dem Wendepunkt gearbeitet werden.

Der **Schnittpunkt** mit der **vorherigen Asymptote** ergibt die **Frequenz  $\omega_i$**

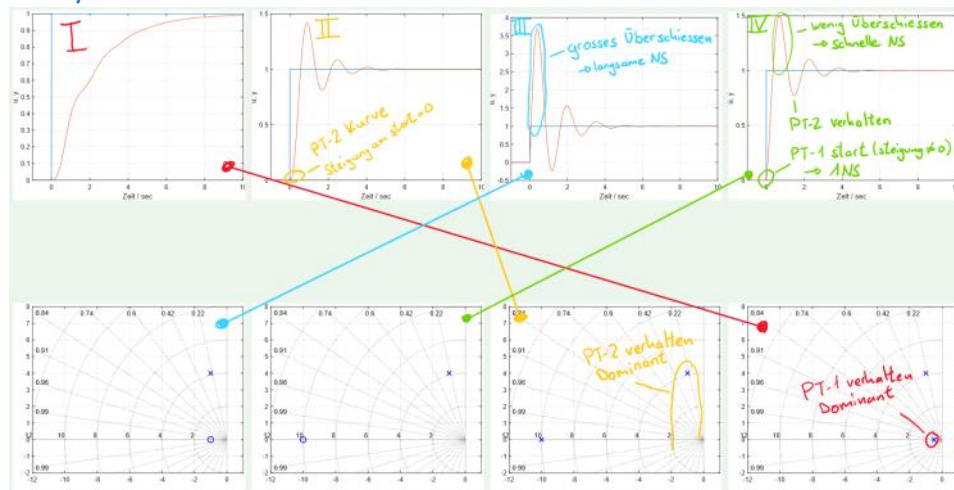
- Bei Resonanzen ist  $\omega_i$  bei der Spitze.
  - Die Dämpfung ist  $D = \frac{1}{2v}$ , wobei v dem abstand zwischen spitze und schnittpunkt der asymptoten entspricht.
  - $G_{Resonanz}(s) = \frac{\omega_i^2}{s^2 + 2 \cdot D \cdot \omega_i \cdot s + \omega_i^2}$
  - $G_{Anti-Resonanz}(s) = G_{Resonanz}(s)^{-1}$
- Wiederhole Schritt 2 & 3
- Totzeit:
  - Suche Stelle wo aus Amplitudengang der Frequenzgang klar bestimmt werden kann (eher hochfrequentig da grössere Differenz)
  - Bestimme zu bestimmter Frequenz  $\omega_\Delta$  die Differenz zwischen Phasengang und theoretischem Phasengang
  - $Tt = \frac{\Delta Phase \cdot \frac{180}{\pi}}{\omega_\Delta}$
  - $G_{Tt}(s) = e^{-Tt \cdot s}$
- Multipliziere alle Funktionen



|                                                                                                                                                                                                                                                                        |                                                                       |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|
| Schritt 1 & 2:<br>1. Proportionales System $k = 1.18$<br>2. -20dB/dek linie an blaue Kurve anfügen<br>--> Differenzierend mit $\omega_1 = 3 \text{ rad/s}$                                                                                                             | $G_1 = 1,18 \cdot \frac{3}{s + 3}$                                    |
| Schritt 3:<br>• Spitze => $\omega_2 = 305 \text{ rad/s}$ (graue Linie)<br>• Distanz schnitt hellblaue und graue linie zu Spitze $v_2 = 31.6$<br>• Dämpfung $D = \frac{1}{2v_2} = 0.016$<br>• Anti-Resonanz                                                             | $G_2 = \frac{s^2 + 2 \cdot 0.016 \cdot 305 \cdot s + 305^2}{305^2}$   |
| Schritt 4 & 5:<br>4. +20dB/dek durch Schnittpunkt<br>5. Resonanz<br>• Spitze => $\omega_3 = 2700 \text{ rad/s}$ (graue Linie)<br>• Distanz schnitt hellblaue und graue linie zu Spitze $v_3 = 10$<br>• Dämpfung $D = \frac{1}{2v_3} = 0.05$                            | $G_3 = \frac{2700^2}{s^2 + 2 \cdot 0.05 \cdot 2700 \cdot s + 2700^2}$ |
| Schritt 6 & 7:<br>• -20 dB/dek (von Resonanz)<br>• Theoretische Phase bestimmen:<br>P = 0°, D = -90°<br>A-Res = +180°, Res = -180°<br>=> -90°<br>• Bei $\omega_{Tt} = 10^4$ Phase ~-165°<br>• $\Delta \text{Phase} = \sim 75^\circ \Rightarrow Tt = 0.00013 \text{ s}$ | $G_4 = e^{-0.00013 \cdot s}$                                          |
| Zusammenführen                                                                                                                                                                                                                                                         | $G = G_1 \cdot G_2 \cdot G_3 \cdot G_4$                               |

Diese Funktion G ist in etwa korrekt bis zu  $\sim 13000 \text{ rad/s}$ . Danach käme noch mal eine Resonanz und in höheren Frequenzen wurde es nicht mehr gemessen

## Pol- / Nullstellen

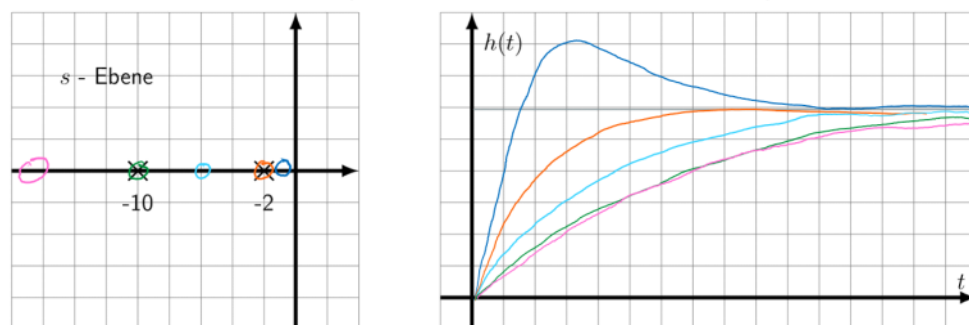


- I. Es dominiert die PS bei  $s = -0.5 \rightarrow$  annähernd PT1 Verhalten
- II. Der schnelle Pol bei  $-10$  hat wenig Einfluss  $\rightarrow$  fast PT2 Verhalten bestimmt durch die beiden komplex Konj. PS
- III. Starkes Überschossen, dies liegt an der langsamen NS
- IV. Wenig Einfluss der schnellen NS, der Sprung startet jedoch mit einer Steigung

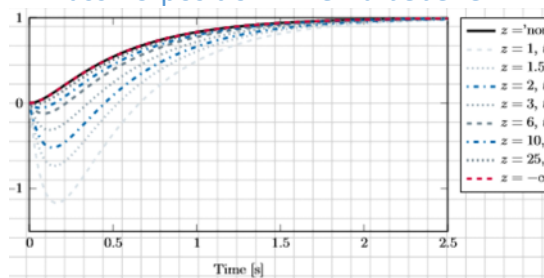
Generell gilt:

Die Nullstelle werden dadurch beeinflusst, wo Aktorik / Sensorik an einem System angebracht ist

## Einfluss NS-position linke Halbebene



## Einfluss NS-position linke Halbebene

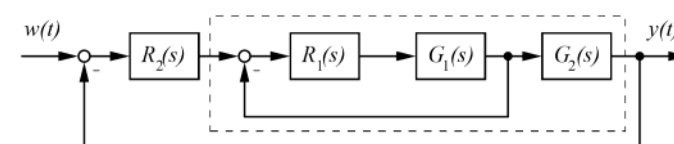


## Kaskadenregelung

Eine **Kaskadenregelung** besteht aus mehreren ineinander verschachtelten Regelkreisen. Dabei gilt:

- Der **äußere Regelkreis** regelt die Hauptgröße (z. B. die Position).
- Die **inneren Regelkreise** regeln Hilfsgrößen (z. B. Geschwindigkeit oder Strom), die dem äußeren Regelkreis untergeordnet sind.

Jeder Regelkreis erhält seinen Sollwert vom nächst äußeren Regelkreis.



Kaskadenstruktur

- Eine **Parametrierung** / Inbetriebnahme erfolgt stets von **innen nach aussen**
- Die **Dynamik nimmt von innen nach aussen hin ab**.
  - $\rightarrow$  Die Bandbreite wird gegen aussen hin kleiner.
- Bei instabilen Systemen ist man bestrebt, dass das System durch den inneren Regelkreis stabil wird.
- Der **innere Regelkreis regelt Störungen** bereits weitgehend aus

## Beispiel Kugelwippe

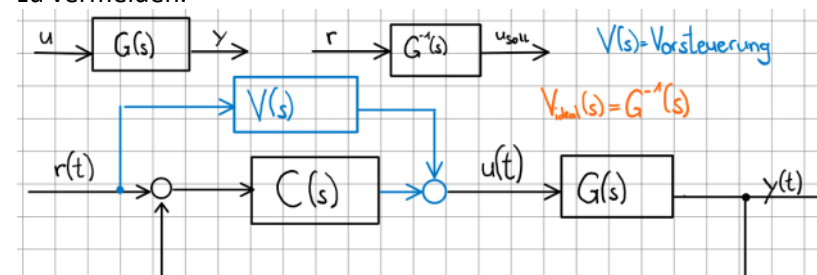
| Nr. | Regelschleife      | Messgröße                  | Stellgröße Regler | Bandbreite           |
|-----|--------------------|----------------------------|-------------------|----------------------|
| 3   | Kugelposition      | Position der Kugel (in mm) | Sollwinkel        | $< 0.1 \text{ Hz}$   |
| 2   | Winkelregler Wippe | Winkel (in rad)            | Sollstrom         | $100 \text{ Hz}$     |
| 1   | Stromregler        | Strom (in A)               | Spannung          | $200-500 \text{ Hz}$ |

Äusserster Regler (Kugelposition) ist der langsamste und liefert dem nächst inneren den Sollwinkel.

Der Eingang des Gesamtregler ist somit eine Position und der Regler berechnet daraus die benötigte Spannung.

## Vorsteuerung

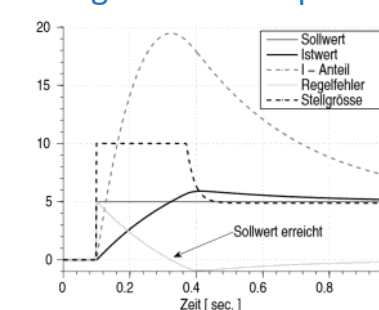
Regelstrecke direkt auf Stellgröße beaufschlagen, um Regelfehler zu vermeiden.



Dies wird jedoch oft Akausal und wird daher mit "schnellen" Tiefpässen ergänzt. (ca. 10x schneller)  
 $V(s) = G^{-1}(s) \cdot \text{schnelle Tiefpässe}$

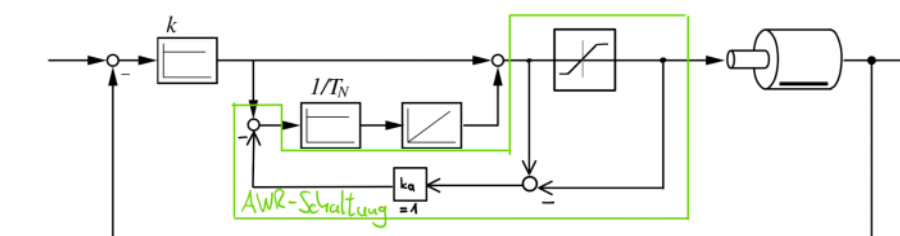
So viele Polstellen (Tiefpässe) bis es kausal ist.

## Integrator-Windup



Ist ein Teil der **Regelstrecke in Sättigung** (siehe Stellgröße), so kann sich der **I-Anteil** des Systems **aufwinden**. Es **resultiert** ein **starkes Überschwingen** der Ist-Größe, die nur langsam abklingt.

Dies kann mit **Anti-Windup-Regelschaltungen (AWR)** verhindert werden



Das Sättigungsglied begrenzt den Ausgang, so kann die Differenz genommen werden. Diese kann dann von der Regeldifferenz abgezogen werden.

Zusätzlich sollte bei **Regler mit höherer Ordnung** noch der **I-Anteil** selber **begrenzt** werden.

Dazu den I-Anteil separieren ( $\frac{1}{s}$ ) und mit einer Schaltung behandeln. (z.B. Limiter)

## Linearisierung

Bsp. Nichtlineares System mit Arbeitspunkt bei  $(u_0 = \frac{3}{16})$

0. Gleichung nach höchster Ableitung auflösen

$$a. \quad \dot{x} = -\sin^2(x) + 4u$$

$$f(x, u)$$

### 1. Arbeitspunkt (AP) bestimmen

Die Linearisierung erfolgt an einem stationären Arbeitspunkt. D.h. Alle Ableitungen werden = 0.

Paare von  $x_0, u_0$ , die diese Bedingung erfüllen sind ein Arbeitspunkt.

$$(f(x_0, u_0) = 0)$$

$$\dot{x} = f(x_0, u_0) := 0$$

$$a. \quad 0 = -\sin^2(x_0) + 4 \cdot u_0 = -\sin^2(x_0) + \frac{3}{4}$$

$$x_0 = \arcsin\left(\sqrt{\frac{3}{4}}\right) = \frac{\pi}{3}$$

$$\text{Arbeitspunkt } (x_0, u_0) = \left(\frac{\pi}{3}, \frac{3}{16}\right)$$

### 2. Δ - Größen bestimmen

Es wird bei Linearisierungen immer mit kleinen Änderungen um den AP gerechnet:

$$x = x_0 + \Delta x, \quad u = u_0 + \Delta u$$

$$\Rightarrow \dot{x} = \Delta \dot{x}, \quad \dot{u} = \Delta \dot{u}$$

$$a. \quad x = x_0 + \Delta x = \frac{\pi}{3} + \Delta x$$

$$u = u_0 + \Delta u = \frac{3}{16} + \Delta u$$

### 3. Lineare Approximation, Ableitung bilden

Die Funktion wird durch eine Funktion im AP angenähert. Die Steigung in den beiden Richtungen x und u ergibt sich durch die Ableitung

$$f(x, u) \approx \alpha \cdot \Delta x + \beta \cdot \Delta u$$

$$\alpha = \left. \frac{df}{dx} \right|_{x=x_0, u=u_0}, \quad \beta = \left. \frac{df}{du} \right|_{x=x_0, u=u_0}$$

$$a. \quad \alpha = -2 \cdot \sin\left(\frac{\pi}{3}\right) \cdot \cos\left(\frac{\pi}{3}\right) = -\frac{\sqrt{3}}{2}$$

$$\beta = 4$$

### 4. Linearisierte DGL aufstellen

Die DGL aufstellen mit den Werten.

$$\Delta \dot{x} = \alpha \cdot \Delta x + \beta \cdot \Delta u$$

$$a. \quad \Delta \dot{x} = -\frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \Delta x + 4 \cdot \Delta u$$

### 5. Übertragungsfunktion aufstellen

Laplace transformieren und nach G(s) umrechnen:

$$s \cdot \Delta X = \alpha \cdot \Delta X + \beta \cdot \Delta U$$

$$G(s) = \frac{\Delta x}{\Delta U} = \frac{\beta}{s - \alpha}$$

$$a. \quad G(s) = \frac{4}{s + \frac{\sqrt{3}}{2}}$$

### 6. Statische Verstärkung ausrechnen

$$k_{DC} = \lim_{s \rightarrow 0} Y(s) = \lim_{s \rightarrow 0} U(s) \cdot G(s)$$

Wobei U(s) meist = 1/s ist, (Einheitssprung)

## WOK

### Zeichnen

1. Pol- / Nullstellen einzeichnen

2. Asymptoten Schnittpunkt  $s_A$  und Winkel  $\varphi_A$  berechnen & einzeichnen

$$s_A = \frac{\sum_{i=1}^n p_i - \sum_{i=1}^q z_i}{n - q}$$

$$\varphi_A = \frac{(2l + 1)\pi}{n - q}$$

| $\varphi_A =$ | $l = 0$                    | $l = 1$                      | $l = 2$                      | $l = 3$                      |
|---------------|----------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| $n - q = 1$   | $\pi = 180^\circ$          | -                            | -                            | -                            |
| $n - q = 2$   | $\frac{\pi}{2} = 90^\circ$ | $\frac{3\pi}{2} = 270^\circ$ | -                            | -                            |
| $n - q = 3$   | $\frac{\pi}{3} = 60^\circ$ | $\pi = 180^\circ$            | $\frac{5\pi}{3} = 300^\circ$ | -                            |
| $n - q = 4$   | $\frac{\pi}{4} = 45^\circ$ | $\frac{3\pi}{4} = 135^\circ$ | $\frac{5\pi}{4} = 225^\circ$ | $\frac{7\pi}{4} = 315^\circ$ |

3. Break-in / -away Punkte berechnen & einzeichnen

$$\sum_{i=1}^q \frac{1}{s_B - z_i} - \sum_{i=1}^n \frac{1}{s_B - p_i} := 0,$$

$$\text{TR menu} > 3 > C > 1$$

4. Beteiligte Abschnitte auf der reellen Achse einzeichnen  
Immer wenn **rechts** von betrachtetem Punkt **n + q ungerade** ist

5. WOK zeichnen

Bsp.:

$$G(s) = \frac{s + 4}{(s + 1)(s + 3)(s^2 + 4s + 20)}$$

1.

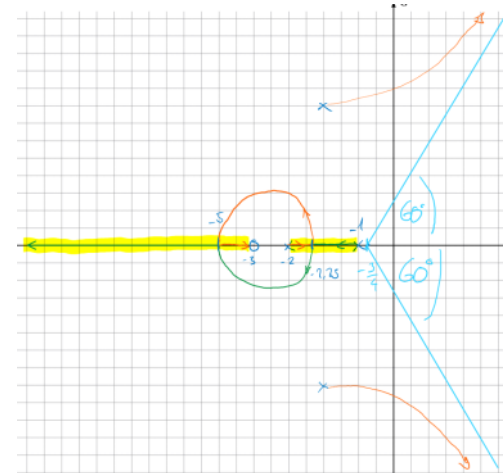
$$z_1 = -4$$

$$p_1 = -1$$

$$p_2 = -3$$

$$p_3 = -2 + 4j$$

$$p_4 = -2 - 4j$$



2.  $n - q = 4 - 1 = 3$

$$\varphi_A = \left\{ \frac{\pi}{3}, \pi, \frac{5\pi}{3} \right\}$$

$$s_A = \frac{(-1) + (-3) + (-2 + 4j) + (-2 - 4j) - (-4)}{4 - 1} = -\frac{4}{3}$$

3.  $s_B = \{-2.3, -1.7 \pm 2.5j, -5\}$

Berechnet mit cSolve auf TR (nur reelle punkte brauchen)

## Amplituden- & Phasenbedingung

$$|k| = \frac{\prod_i |s - p_i|}{\prod_i |s - z_i|}$$

$$\sum_{i=1}^a \varphi z_i - \sum_{i=1}^n \varphi p_i = \pm(2l + 1)\pi \equiv \pm 180^\circ$$

Bsp.

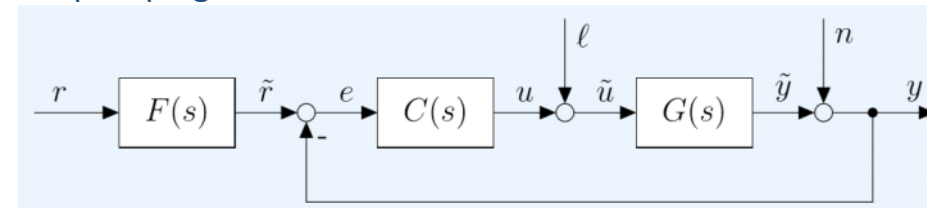
$$G_0(s) = \frac{4k}{s(s + 12)}, \quad \text{mit } s = -6 \pm 6j \text{ (bei } k = 18) \text{ und PS} = \{0, -12\}$$

|             |                                                                                                                          |
|-------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Amp.- Bed.: | $ 4k  = \frac{ -6 + 6j + 0   -6 + 6j - (-12) }{1} = \sqrt{72}^2 = 72$<br>$\Rightarrow k = \frac{72}{4} = 18, \quad i.O.$ |
| Ph.- Bed.:  | $0 - \angle(-6 + 6j - 0) - \angle(-6 + 6j - (-12))$<br>$= -135^\circ - 45^\circ = -180^\circ, \quad i.O.$                |

## Design Regeln

- Füge PS und NS hinzu (muss nicht aus bestehenden Regler Strukturen bestehen)
- Braucht mindestens **gleich viele** PS wie NS (Regler muss Kausal sein)
- **PS** die gegen **links** gehen verschieben die **Asymptoten** gegen **links** (mehr Stabilität)
- **NS** die gegen **links** gehen verschieben die **Asymptoten** gegen **rechts**
- **Kompensiere NIE PS** oder **NS** in der **rechten Halbebene** (in der Realität kann man sie nie genau kompensieren was zu einem instabilem System führt)

## Loopshaping



$r(t)$  Sollwert

$u(t)$  Stellgrösse

$y(t)$  Regelgrösse

$l(t)$  Störung am Eingang (Load/Last)     $n(t)$  Störung am Ausgang (noise)

|          |                   |                                    |                                                                                 |
|----------|-------------------|------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|
| $G_{yr}$ | $r \rightarrow y$ | $\frac{C \cdot G}{1 + C \cdot G}$  | <b>Führungsübertragungsfunktion</b><br>(komplementäre Sensitivität)             |
| $G_{yl}$ | $l \rightarrow y$ | $\frac{G}{1 + C \cdot G}$          | Störungsübertragungsfunktion<br>Bzgl. Der Last                                  |
| $G_{yn}$ | $n \rightarrow y$ | $\frac{1}{1 + C \cdot G}$          | <b>Sensitivität</b><br>Störungsübertragungsfunktion<br>Bzgl. Des Sensorrauschen |
| $G_{ur}$ | $r \rightarrow u$ | $\frac{C}{1 + C \cdot G}$          | Wirkung der Sollgrösse<br>auf die Stellgrösse                                   |
| $G_{ul}$ | $l \rightarrow u$ | $\frac{-C \cdot G}{1 + C \cdot G}$ | Wirkung der Last<br>auf die Stellgrösse                                         |
| $G_{un}$ | $n \rightarrow u$ | $\frac{-C}{1 + C \cdot G}$         | Wirkung vom Sensorrauschen<br>auf die Stellgrösse                               |

### Überlegung:

Für grosse Frequenzen:

$$\lim_{\omega \rightarrow \infty} |G_{yr}(j\omega)| = 0$$

$$\lim_{\omega \rightarrow \infty} |G_{yn}(j\omega)| = 1$$

Konstante Störungen (hier  $\omega$ ) sollten durch den Regler idealerweise ausgeglichen werden, somit sollte gelten:

$$\lim_{\omega \rightarrow 0} |G_{yn}(j\omega)| = 0$$

$$\lim_{\omega \rightarrow 0} |G_{openloop}(j\omega)| = \infty$$

## Robustheit

### Definition Robuste Regelung

Robuste Regelung bezeichnet einen Ansatz in der Regelungstechnik, der darauf abzielt, die Leistung eines Regelungssystems trotz Unsicherheiten, Modellierungsfehlern oder Störungen zu gewährleisten. Ein robustes Regelungssystem reagiert stabil und zuverlässig, selbst wenn das reale Systemverhalten von dem zugrunde liegenden mathematischen Modell abweicht oder unerwartete äussere Störungen auftreten. von: ChatGPT

Robuste Auslegungsverfahren berücksichtigen ganz explizit mögliche Variationen in der Regelstrecke

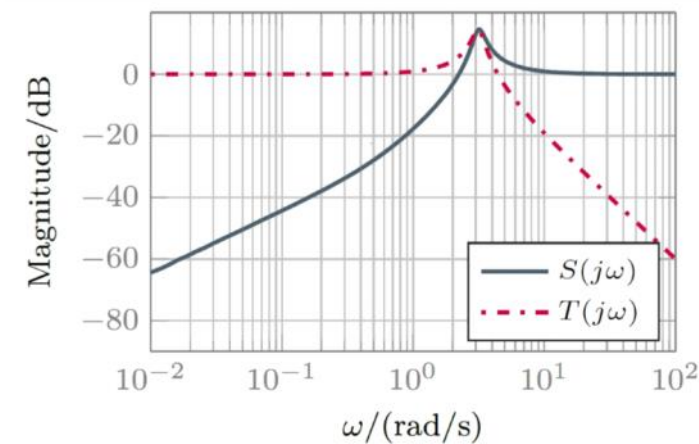
### Sensitivität

- Gibt es Parameter in der Strecke die heikel / weniger heikel sind?
- Wie ist der Zusammenhang zwischen Variationen in der Regelstrecke und dem Closed Loop verhalten

$$S = \frac{1}{1 + C \cdot G} \quad T = 1 - S = \frac{C \cdot G}{1 + C \cdot G} \quad S + T = 1$$

$S$  = Sensitivität,  $T$  = komplementär Sensitivität

Typische Verläufe für  $S$  &  $T$ :



Ein geregeltes System mit gutem Störverhalten  $G_{yn} = S$  ist auch unempfindlich auf Parameteränderung auf der Regelstrecke

$$S_{\max} < 6 \text{ dB}$$

### Hurwitz-Stabilitätskriterium

- Das Nennerpolynom mit Ordnung  $n$  hat alle seine Polstellen in der linken Halbebene dann und nur dann, wenn:
  - alle Koeffl  $a_i > 0 \quad i = 0, \dots, n$
  - alle Hurwitz determinanten  $|H_i| > 0 \quad i = 1, \dots, n$
  - wenn alle  $a_i < 0$  kann man  $-1$  ausklammern
- Ein System, dessen charakteristische Gleichung das Hurwitz-Kriterium erfüllt, ist somit stabil

- Übertragungsfunktion:

$$G(s) = \frac{b_m s^m + b_{m-1} s^{m-1} + \dots + b_1 s + b_0}{a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_1 s + a_0}$$

- Nennerpolynom:

$$a(s) = a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_1 s + a_0$$

- Hurwitz-Matrix:

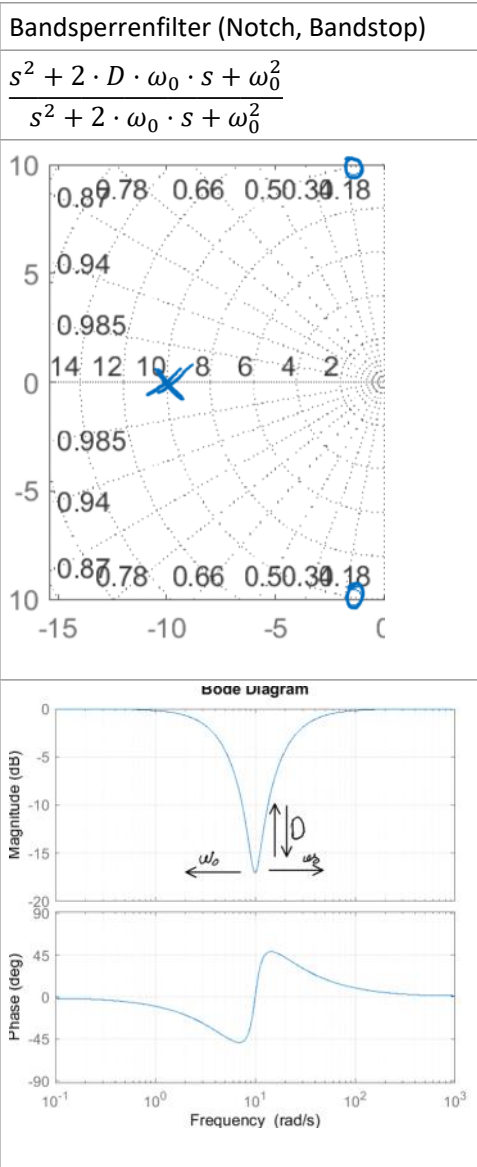
$$H_n = \begin{pmatrix} a_1 & a_2 & a_3 & \dots & a_n \\ a_0 & a_1 & a_2 & \dots & a_{n-1} \\ 0 & a_0 & a_1 & \dots & a_{n-2} \\ 0 & 0 & a_0 & \dots & a_{n-3} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \end{pmatrix}$$

*n-Spalten*  
*n-Spalten*  
*ungerade*  
*gerade*

GRT-Repe  
Elementare Übertragungsglieder

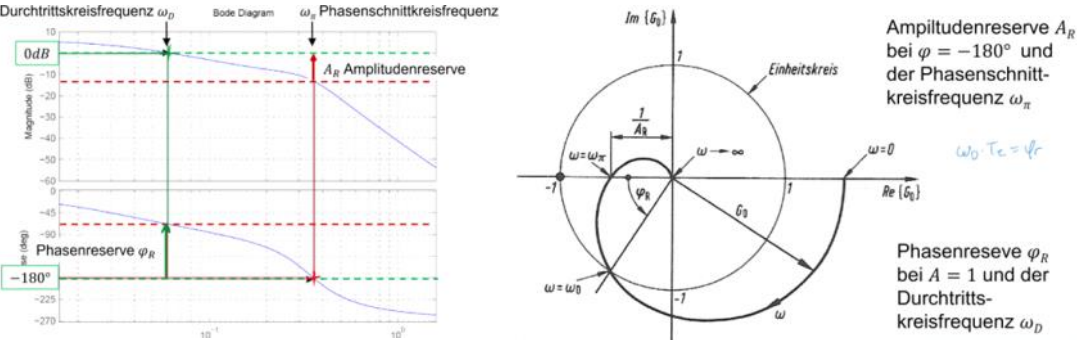
| Name/Typ          | Übertragungsfunktion | Pol-/Nullstellen | Bode-Diagramm |
|-------------------|----------------------|------------------|---------------|
| P<br>Proportional | $K_S$                |                  |               |
| I<br>Integral     | $\frac{1}{s}$        |                  |               |
| D<br>Differential | $s$                  |                  |               |
| Tt<br>Totzeit     | $e^{-Tt \cdot s}$    |                  |               |

dB zu Mag:  
 $x \frac{dB}{20}$   
Mag zu dB:  
 $20 \cdot \log_{10}(x)$

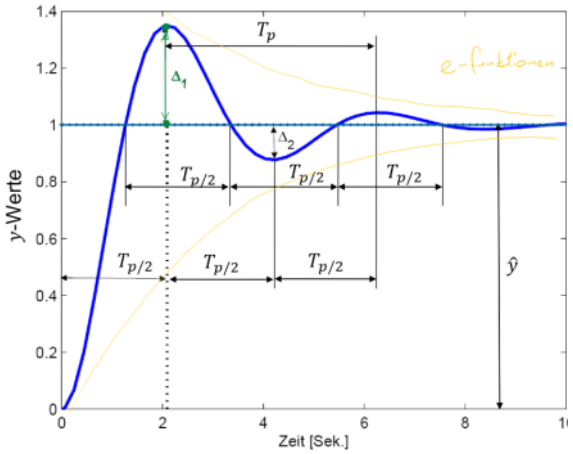
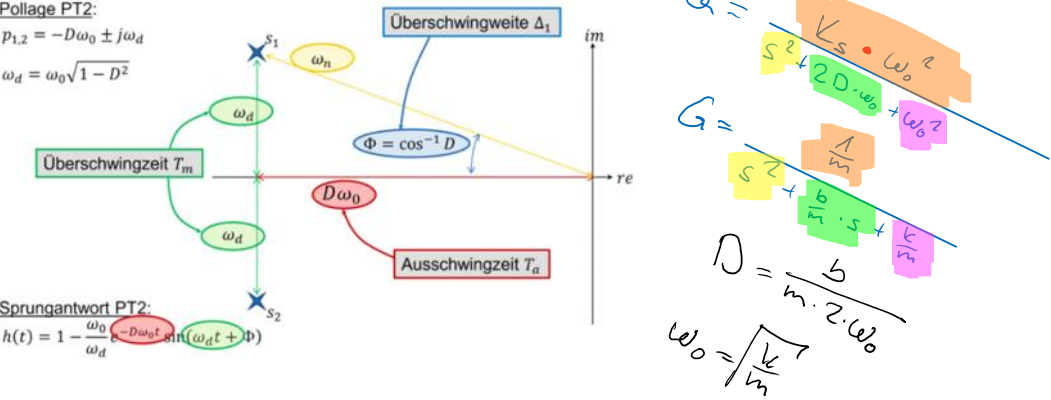


| Name/Typ                 | Übertragungsfunktion                                                               | Pol-/Nullstellen | Bode-Diagramm |
|--------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|------------------|---------------|
| Lead<br>(Lag anders rum) | $\frac{T \cdot s + 1}{\alpha \cdot T \cdot s + 1}$<br>$\alpha < 1$                 |                  |               |
| PI                       | $K_p \cdot \frac{T_n \cdot s + 1}{T_n \cdot s}$                                    |                  |               |
| PD ideal                 | $K_p \cdot (T_v \cdot s + 1)$                                                      |                  |               |
| PID ideal                | $K_p \cdot \left(1 + \frac{1}{T_n \cdot s} + T_v \cdot s\right)$                   |                  |               |
| PT1                      | $\frac{K_S}{T_1 \cdot s + 1}$                                                      |                  |               |
| PT2 periodisch           | $\frac{K_S \cdot \omega_0^2}{s^2 + 2 \cdot D \cdot \omega_0 \cdot s + \omega_0^2}$ |                  |               |
| PTn                      | $\frac{K_S}{(T_m \cdot s + 1)^n}$                                                  |                  |               |

Amplituden- und Phasenreserve



Pollage



$$T_p = \frac{2\pi}{\omega_d}$$
$$\omega_d = \frac{2\pi}{T_p}$$
$$\varphi = \ln\left(\frac{\Delta_1}{\Delta_2}\right) = \frac{1}{n} \cdot \ln\left(\frac{\Delta_1}{\Delta_{\text{ein}}}\right)$$
$$D = \frac{\varphi}{\sqrt{1 + \varphi^2}}$$
$$\omega_0 = \frac{\omega_d}{\sqrt{1 - D^2}}$$