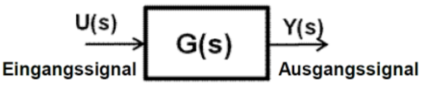
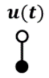
Regelungstechnik 2

Übertragungsfunktion

Im Bildbereich ist die Übertragungsfunktion der Quotient aus Ausgang und Eingang. Alle Anfangsbedingungen sind Null.



$$U(s) \cdot G(s) = Y(s) \qquad \boxed{G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)}}$$



Y(s) ist die Bildfunktion

$$G(s) = \frac{Ausgang}{Eingang} \qquad Y(s) = G(s) \cdot U(s) \text{ (Bildfunktion)}$$

Polstelle wenn der Nenner = 0 wird
Das charakteristische Polynom steht im Nenner der Übertragungsfunktion. → homogene Gleichung aufstellen
wenn mit der Variable s geschrieben → zeitkontinuierlich
wenn mit der Variable z geschrieben → zeitdiskret
die Nullstellen des Zählerpolynoms sind auch die Nullstellen des Systems

3 Darstellungsformen für Übertragungsfunktion G(s) im Frequenzbereich:

Polynom

für Systemordnung und inverse Laplace-Transformation

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

Pol-Nullstellen

Pole / Nullstellen sofort ablesbar

$$\boxed{G(s) = k \cdot \frac{(s - s_{0,1})(s - s_{0,2}) \cdots (s - s_{0,m})}{(s - s_{\infty,1})(s - s_{\infty,2}) \cdots (s - s_{\infty,n})}}$$

Partialbruch

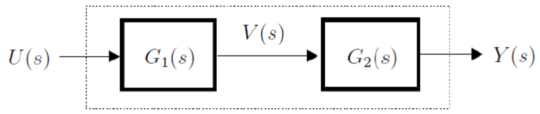
für inverse Laplace-Transformation

$$\boxed{G(s) = \frac{A_1}{s - s_{\infty,1}} + \frac{A_2}{s - s_{\infty,2}} + \cdots + \frac{A_n}{s - s_{\infty,n}}}$$

Blockdiagramm-Algebra

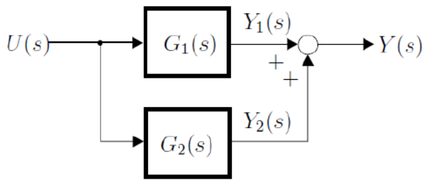
Serie-schaltung

$$\boxed{G(s) = G_2(s) \cdot G_1(s)}$$



Parallel-schaltung

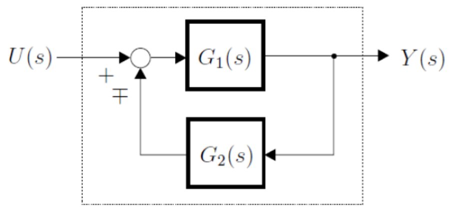
$$\boxed{G(s) = G_1(s) + G_2(s)}$$



Kreis-schaltung

$$\boxed{G(s) = \frac{G_1(s)}{1 \pm G_1(s) G_2(s)}}$$

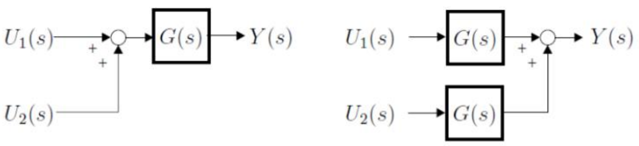
Rückkopplung (Gegenkopplung, Mitkopplung)
Feedback (Positives Feedback, Negatives Feedback)



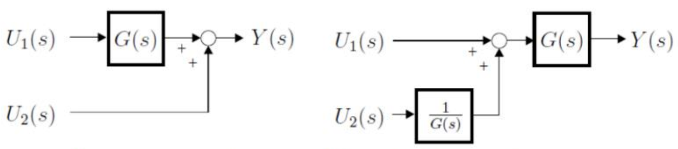
Zum Vereinfachen eines Blockdiagramms einzelne Übertragungsfunktionen so verschieben, dass Kreisschaltungen entstehen. Dann die Übertragungsfunktion der Kreisschaltung bilden und diese durch gleichnennrig machen vereinfachen.

Schieben

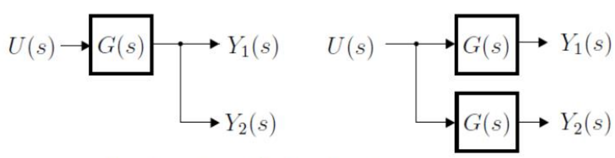
Vertauschen zweier Blöcke



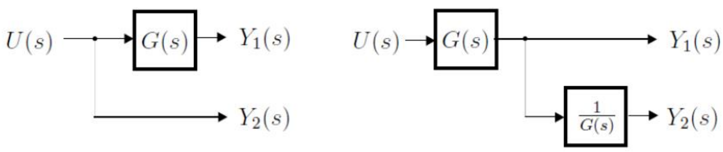
Rückwärtsverschieben eines Blocks durch einen Summator



Vorwärtsverschieben eines Blocks durch einen Summator



Vorwärtsverschieben eines Blocks durch einen Verzweigungspunkt



Rückwärtsverschieben eines Blocks durch einen Verzweigungspunkt *inverse Laplacetransformation*

formale Definition

$$\mathcal{L}^{-1}\{F(s)\} = \frac{1}{2\pi i}\int_{\gamma-i\infty}^{\gamma+i\infty} e^{st}F(s)\,ds = \begin{cases} f(t) & \text{für } t \geq 0 \\ 0 & \text{für } t < 0 \end{cases} \quad \text{mit } \gamma > s_0,$$

in der Praxis verwendet man die Korrespondenztabelle (oder Matlab)

Mathematische Operationen im Bildbereich (Algebra) sind einfacher als im Zeitbereich (Differential-/Integralrechnung)

Sätze

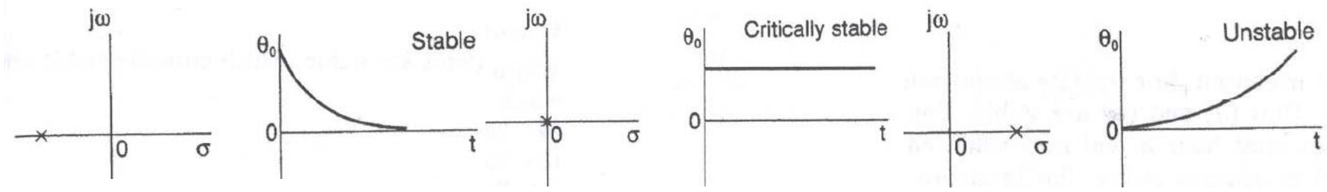
Überlagerungssatz, Ähnlichkeitssatz, Verschiebesatz, Differentiation (Multiplikation mit s), Integration (Multiplikation mit 1/s), Faltungssatz, Grenzwertsätze
siehe in meinen FouLap Notizen

Beispiel

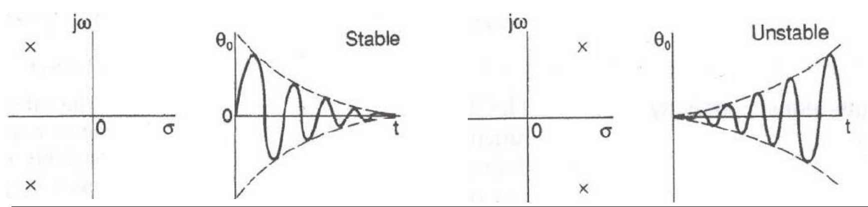
siehe separat ausgedrucktes Beispiel zum Feder-Masse-Dämpfer System (mit Partialbruchzerlegung)

Pole und Nullstellen

stabil
grenzstabil
instabil



schwingfähig



Polstellen

Charakterisierung des Systems, Pole findet man wenn Nenner = 0 ist
Darstellung in der komplexen Zahlenebene mit einem x
beschreibt die Stabilität und die Schwingfähigkeit des Systems
Realteil < 0 → stabil, Realteil = 0 → grenzstabil, Realteil > 0 → instabil, Imaginärteil ≠ 0 → schwingfähig

System mit mindestens einem Pol in der rechten Halbebene ist instabil

Nullstellen

beschreibt Kausalität und Frequenzübertragungsverhalten (Antwort auf das konkrete Eingangssignal) zusammen mit den Polstellen
Nullstellen findet man wenn Zähler = 0 ist
Darstellung in der komplexen Zahlenebene mit einem o

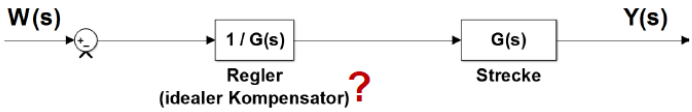
System mit mehr Nullstellen als Polstellen ist akausal

Wurzelortskurve WOK

WOK stellt den Verlauf der Pole eines geschlossenen Regelkreises für alle möglichen Reglerverstärkungen K_P (0 bis Unendlich) dar.
K = unendlich ist nicht realisierbar
Wenn die Pole in die Nullstellen übergehen bekommt man ein stabiles System. (Idee des High-Gain-Controllers)
Mit der WOK kann man die Verstärkung für einen stabilen P-Regler berechnen.

Dynamische Kompensation

ideale dynamische Kompensation



Regler und Strecke heben sich auf, es gilt dann immer Sollwert = Istwert
Rückkopplung ist immer 1 (man müsste gar nicht mehr regeln), ist nicht realisierbar

Kausalitäts-prinzip

Die Ursache muss vor der Wirkung eintreten, im Zeitbereich:

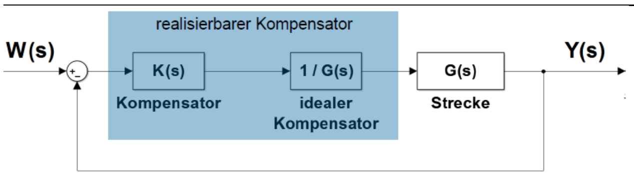
$$b_m\frac{d^m u}{dt^m} + \cdots + b_1\frac{du}{dt} + b_0 = a_n\frac{d^n y}{dt^n} + \cdots + a_1\frac{dy}{dt} + a_0 \qquad \mathbf{n} \geq \mathbf{m}$$

im Bildbereich:

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

$\boxed{\text{Nennergrad } \mathbf{n} \geq \text{Zählergrad } \mathbf{m}}$

realisierbare dynamische Kompensation

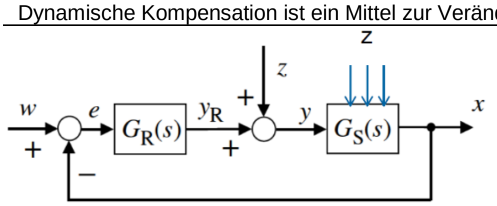


Kompensationsregler

K(s) nahezu frei wählbar.
Bedingung: $G^{-1}(s)\cdot K(s)$ muss realisierbar sein

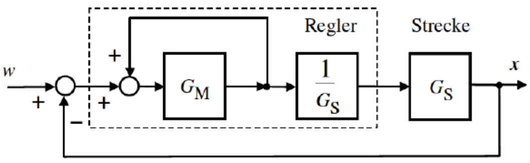
Dynamische Kompensation ist ein Mittel zur Veränderung der Zeitkonstanten eines Systems

Kompen-sationsregler



$$G_w(s) = \frac{G_R(s)G_S(s)}{1+G_R(s)G_S(s)} = G_M(s)$$

$$G_R(s) = \frac{G_M(s)}{1-G_M(s)}\cdot\frac{1}{G_S(s)}.$$



Betrachtung offener Regelkreis $G_0(s)$:

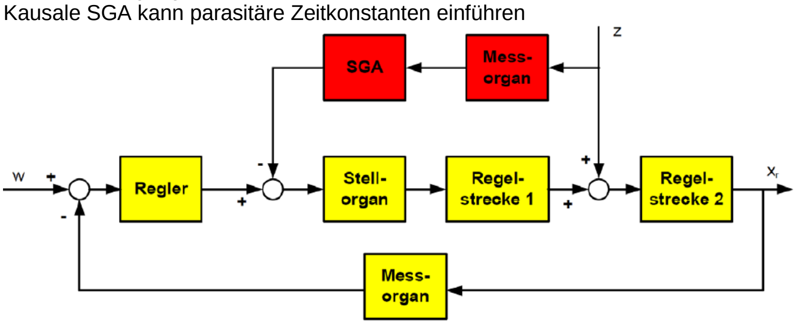
$$G_0(s) = G_R(s)G_S(s) = \frac{G_M(s)}{1-G_M(s)}\cdot\frac{1}{G_S(s)}\cdot G_S(s) = \frac{G_M(s)}{1-G_M(s)}$$

Mit schnellen Polen kann man das System impfen → dadurch wird das System realisierbar und stabil, dazu die Übertragungsfunktion mit PT1-Gliedern ergänzen (heilen)
dann jeweils auf 1 normieren (wenn z.B. +10 im Nenner dann den denner durch 10 teilen, dass es +1 ist)
die langsamen Pole merken nicht, dass es schnelle Pole gibt
je weiter links die Pole in der s-Ebene (komplexen Zahlenebene) sind, deste schneller ist der Pol.

Störgrössenaufschaltung SGA

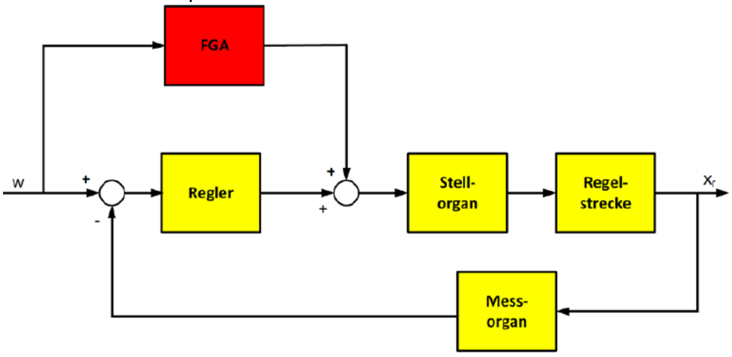
Störgrösse wird gemessen und schon in den Regelkreis eingeführt, bevor die Ausgangsgrösse gemessen wird. Damit kann der Regler schneller reagieren (z.B. Raumtemperatur Heizung → Aussentemperatur messen und mit Dicke von Wand den Wärmeübergang vom Raum nach draussen messen und in Regelkreis führen. Somit kann die Störung (=Aussentemp.) direkt berücksichtigt werden, nicht erst wenn die Temperatur im Raum gesunken ist)

Robustheit, Regler → Führungsverhalten
Ziel der Auslegung der SGA → Zähler der Störungsübertragungsfunktion Null
Kausale SGA kann parasitäre Zeitkonstanten einführen



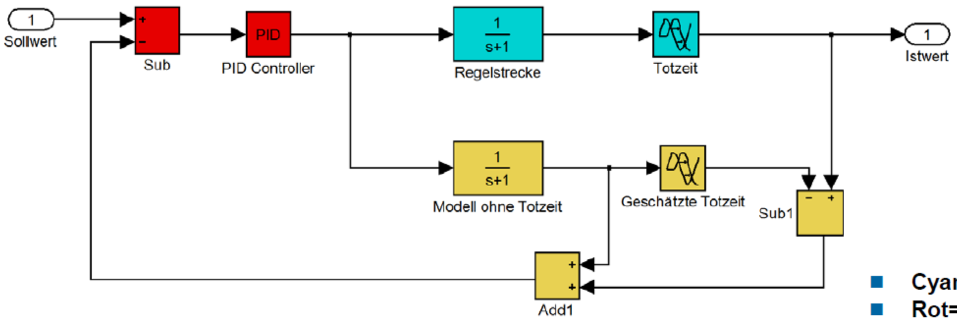
Zwei-Freiheitsgrade-Struktur (Führungsgrössenaufschaltung FGA)

Robustheit, Führungsverhalten, FGA ist dynamische Kompensation von Stellorgan und Strecke
Kausale FGA kann parasitäre Zeitkonstanten einführen



Smith-Prädiktor (Totzeitkompensator) SP

Kann Totzeit komplett kompensieren (bei genauem Modell)
Bedarf in der Regel Digitalrechner



- **Cyan=Regelstrecke**
- **Rot=Regler**
- **Gelb=Prädiktor/Beobachter**

Störverhalten und Führungsverhalten

Störverhalten	Beschreibt die Auswirkung einer Störgrösse z auf die Regelgrösse x, Führungsgrösse w = 0
Führungs-verhalten	Beschreibt die Auswirkung der Führungsgrösse w auf die Regelgrösse x, Störgrösse z = 0

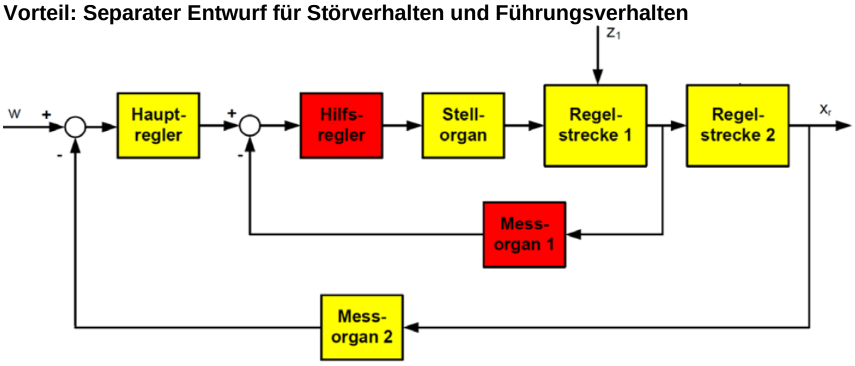
gutes Führungsverhalten und gutes Störverhalten haben gegenläufige Anforderungen, sind widersprüchlich
gutes Führungsverhalten: Sollwertfolge der Regelgrösse, Führungsübertragungsfunktion
gutes Störverhalten: Robustheit der Regelgrösse bei unerwünschten Eingängen, Störübertragungsfunktion

Vorteil: Separater Entwurf für Störverhalten und Führungsverhalten:
Mit SGA kann man das Störverhalten mit der SGA beeinflusse und das Führungsverhalten mit dem Regler.
Aber kausale SGA kompensiert nicht mehr perfekt und Messung der Störgrösse notwendig

Mit FGA kann man das Störverhalten mit dem Regler beeinflussen und das Führungsverhalten mit der FGA
FGA ist dynamische Kompensation von Stellorgan und Strecke
Aber kausale FGA kompensiert nicht mehr perfekt

Kaskaden-regelung

Zwei Kreise, Auslegung von innen nach aussen, beide Kreise stabil
Innerer Kreis muss immer der schnellere Kreis sein (typisch: aggressiver P-Regler)
Störverhalten: innerer Kreis
Führungsverhalten: äusserer Kreis
Auch mit Black-Box-Modell der Strecke möglich
Vorteil: Separater Entwurf für Störverhalten und Führungsverhalten



Frequenzgang

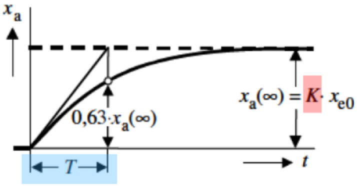
Der Frequenzgang beschreibt das Übertragungsverhalten eines linearen dynamischen Systems bei Sinuseingang mit Frequenz **ω**
Gilt nur für das stationäre Verhalten (alle Transienten abgeklungen)! Frequenzgang besitzt Betrag und Phase

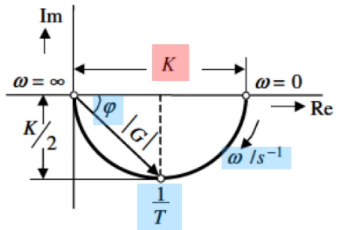
$$\boxed{G(\mathrm{j}\omega) = \frac{Y(\mathrm{j}\omega)}{U(\mathrm{j}\omega)}}$$

ist eine komplexe Zahl
In der Übertragungsfunktion wird s mit $\mathrm{j}\omega$ ersetzt

Betrag: $\boxed{|G(\omega)| = \sqrt{\mathrm{Re}^2(G) + \mathrm{Im}^2(G)}}$

Phase: $\boxed{\varphi(\omega) = \arctan\frac{\mathrm{Im}(G)}{\mathrm{Re}(G)}}$





Der PT1-Frequenzgang trägt die gleichen Informationen wie die PT1-Sprungantwort im Zeitbereich (siehe Bild hier oben)

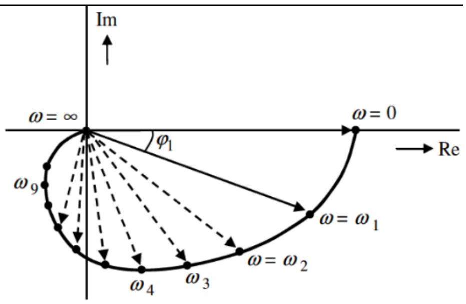
Ortskurve = Nyquist-diagramm

Der Frequenzgang kann in der Ortskurve dargestellt werden.
Auftragen von Betrag und Phase für verschiedene Frequenzen von **ω = 0** bis **ω = ∞**
Betrag und Phase in einer Darstellung

Ortskurve stellt den Frequenzgang für alle Frequenzen dar
Real- und Imaginärteil in komplexer Zahlenebene
Frequenzinformation nicht enthalten

Stabilitätsbeurteilung des geschlossenen Regelkreises ist möglich

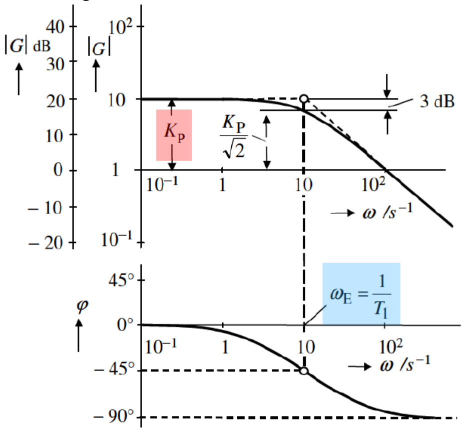
Anzahl Quadranten = Ordnung des Systems
System 1. Ordnung → Phasendrehung (Winkel phi von 0 bis) 90°
System 2. Ordnung → Phasendrehung (Winkel phi von 0 bis) 180°
System 3. Ordnung → Phasendrehung (Winkel phi von 0 bis) 270°
System 4. Ordnung → Phasendrehung (Winkel phi von 0 bis) 360°



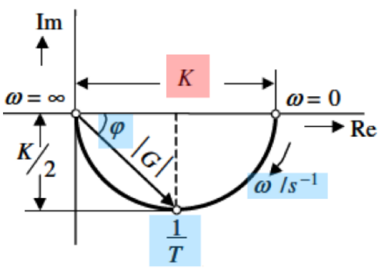
Bodediagramm

Betrag und Phase in getrennten Diagrammen jeweils über der Frequenz dargestellt, Amplitudengang oben und Phasengang unten
Logarithmische Skala (ausser für Phasenwinkel) wegen der Asymptotendarstellung
Bodediagramme der wichtigsten Übertragungsglieder siehe Zacher S. 470 ff.
Stabilitätsbeurteilung des geschlossenen Regelkreises ist möglich

Bodediagramm in Ortskurve umwandeln: durch Inspektion oder mit bestehender Wertetabelle



Multiplikation im Laplacebereich ergibt im logarithmischen Diagramm eine Addition



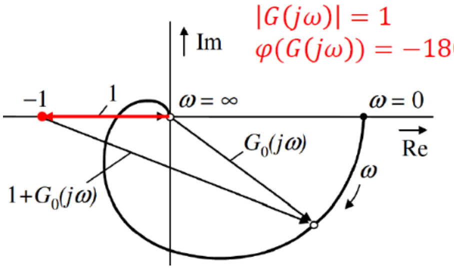
1. Knick → $1/T_1 = \omega_1$
2. Knick → $1/T_2 = \omega_2$

Man kann ablesen, ob es sich eher um einen Tief- oder um einen Hochpassfilter handelt (welche Frequenzen werden gedämpft und welche werden nur wenig verändert)

im Amplitudengang die Tangenten einzeichnen
wenn zuerst mit Steigung 20 nach oben und dann Steigung -20 (nach unten) kommt man wieder auf Null → Ordnung 5, obwohl man 360° Phase hat (das hoch gehen ist eine zusätzliche Ordnung)
im Phasengang die Stufen einzeichnen (dann kann man Winkel ablesen z.B. +90° oder -90° etc.)

kritischer Punkt

$G(j\omega) = -1$
$|G(j\omega)| = 1$
$\varphi(G(j\omega)) = -180°$



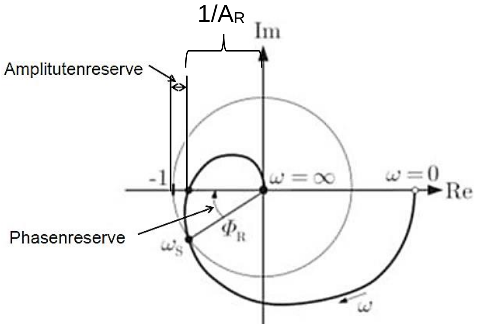
Damit man das vereinfachte Nyquistkriterium anwenden darf, muss die offene Kette (der Vorwärtspfad, ohne die Rückkopplung) stabil sein.
kritischer Punkt (-1|0) muss in Pfeilrichtung (Richtung wachsender Frequenzen) gesehen immer links vom Graphen (bzw. von der Kurve) sein, damit die geschlossene Kette (geschlossener Regelkreis) auch stabil ist. (Linke Hand Regel)

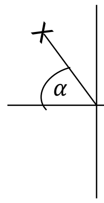
1. offene Kette stabil?
2. Anwendung auf offene Kette
3. geschlossener Kreis stabil oder instabil?

am kritischen Punkt ist der geschlossene Kreis grenzstabil

man kann auch die Grösse der Verstärkung berechnen

Endwertssatz: für t →∞ ≙ s → 0





Dämpfung D = cos(α)
D_{min} ca. 0,707

Wenn $\alpha = 0°$ → Dämpfung 1
Wenn $\alpha = 90°$ → Dämpfung 0

Betrag und Phase
$|G(j\omega)| = \sqrt{K^2 \cdot Re^2 + K^2 \cdot Im^2} = K \cdot \sqrt{Re^2 + Im^2}$
$\varphi(G(j\omega)) = arctan\left(\frac{Im(G(j\omega))}{Re(G(j\omega))}\right)$
Betrag wird mit K von Regler gestreckt oder gestaucht, Phase wird dadurch nicht geändert

Stabilität mit Bodediagramm

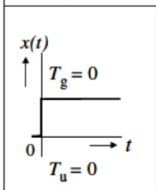
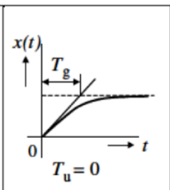
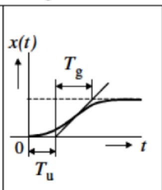
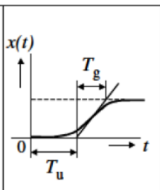
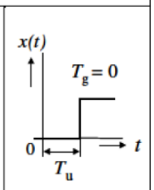
offene Kette muss stabil sein
Überprüfung des geschlossenen Kreises durch Betrachtung des Bodediagramms der offenen Kette
Amplitudenreserve:
im Phasengang Frequenz suchen, bei der die Phase $\phi = -180°$ ist, von dort vertikal nach oben in Amplitudengang,
wenn $|G|$ ≤ 0 dB, dann stabil, sonst instabil

Phasenreserve:
Beim Nulldurchgang im Amplitudengang muss die Phase (vertikale Linie nach unten in den Phasengang ziehen) ≥ -180° sein (also oberhalb von -180°), wegen dem kritischen Punkt, damit der geschlossene Kreis stabil ist.
Wenn die Phase beim Nulldurchgang im Amplitudengang **oberhalb von -180° = stabil** ist (z.B. -150°), gibt es eine Phasenreserve
Für gutes Einschwingen: Phasenreserve 30°- 60°
z.B. Phasenreserve von 30° gewünscht → Nulldurchgang von Amplitude bei Frequenz wo Phase bei -180° + 30° = -150° ist.

Man kann die ganze Kurve im Amplitudengang nach oben schieben, um den Nulldurchgang an der richtigen Stelle zu haben, damit die gewünschte Phasenreserve erreicht wird.

Regelbarkeit

Regelbarkeit von PT-n Strecken

gute	⇐ ⇐ ⇐	Regelbarkeit	⇒ ⇒ ⇒	schlechte
				
$\frac{T_g}{T_u} = \frac{0}{0}$	$\frac{T_g}{T_u} = \infty$	gute Regelbarkeit von 10 bis 3	$\frac{T_g}{T_u} < 1$	$\frac{T_g}{T_u} = 0$

T_g = Ausgleichzeit
T_u = Verzugszeit

gut wenn Verzugszeit sehr klein ist
somit ist Totzeitglied schlecht regelbar

Übung1 Laplace-Transformation	Aufgabe1 System vereinfachen, Übertragungsfunktion ermitteln, Differentialgleichung ablesen Aufgabe2 allgemeine Übertragungsfunktion für Parallelschaltung herleiten (beweisen) Aufgabe3 Impulsantwort von zwei PT1-Gliedern in Reihe ermitteln (inverse Laplacetransformation)
Übung2 Übertragungs-funktion	Aufgabe1 Impulsantwort für ein PT2-Glied, bei drei verschiedenen Dämpfungen D, und Impulsantwort plotten (zeichnen) Aufgabe2 Koeffizientenvergleich der Übertragungsfunktion zwischen 2 PT1-Gliedern in Serie und einem PT2-Glied Sie sind gleich wenn sie gleiche Koeffizienten haben => prüfen wann dies der Fall ist (für welche K und welches T bzw. D) Aufgabe3 allgemeine Übertragungsfunktion für Standardelemente herleiten (P, I, D, PD, PI, PID) DGL von S. 470 transformieren in Bildbereich => dann G(s) = Y(s) / U(s)
Übung3 DGL dynamischer Systeme	Aufgabe1 Sprungantwort eines Integrierers wenn die Anfangsbedingung ungleich von Null ist, Herleitung im Zeitbereich und mit Laplace Transformation Aufgabe2 Sprungantwort ermitteln von PT1-System mit Anfangsbedingungen ungleich von Null DGL in Bild Bereich transformieren, dort mit Sprung (also mit U(s)) multiplizieren, dann in Zeitbereich rücktransformieren Rampenantwort des PT1-Glieds mit Anfangsbedingung verschieden von Null Wiederum in Frequenzbereich bringen, um dort Multiplikation zu machen und dan Rücktransformation in Zeitbereich
Übung4 Pole-Nullstellen Wurzel-ortskurve	Aufgabe1 a) Übertragungsfunktion des Regelkreises mit zwei P-Gliedern, einem PT1 und einem I-Glied b) Störübertragungsfunktion ermitteln, dazu den Regelkreis neu zeichnen, von der Störung aus gesehen (mit w(s) = 0) c) Sprungantwort bei Führungs- oder Störsprung => Antwort Y(s) = G(s)*U(s) als U(s) den transformierten Sprung, also 1/s einsetzen das rücktransformieren gibt die Funktion, die man mit dem TR plotten kann (je nach Übertragungsfunktion hat man Störsprungantwort oder Führungssprungantwort d) Stabilität beurteilen, anhand des Diagramms aus c) sieht man, ob es stabil ist (gegen einen Endwert strebt) oder instabil e) Pole und Nullstellen berechnen, Nullstellen wenn der Zähler = 0 ist, Polstellen wenn der Nenner = 0 ist, um komplexe Polstellen zu finden => cSolve() gibt auch die imaginären Stellen aus f) Pole in einer Wurzelortskurve darstellen, für verschiedene Reglerverstärkungen K g) Was ändert sich wenn das Stellorgan ein PT1 anstatt einem P ist? => gibt 1 zusätzliche Polstelle, hier wird der Regelkreis ab einem höheren Kp Wert aus diesem Grund instabil
Übung5 Dynamische Kompensation	Aufgabe1 a) Impuls-, Sprung- und Rampenantwort des Thermometers aufzeichnen, dazu die drei Eingänge in den Bildbereich transformieren => gibt U(s), die Übertragungsfunktion ist ein PT1 => es folgt Y(s) = G_{PT1}(s)*U(s) das Y(s) für jeden Eingang berechnen und dann rücktransformieren, mit dem TR plotten (dazu das t mit dem x ersetzen) b) ideale und realisierbare dynamische Kompensation, wenn die Kompensation mehr Nullstellen als Polstellen hat (Ordnung Zähler > Ordnung Nenner) dann ist das System akausal Kompensation siehe bei separater Marginalie c) Die kompensierten Antworten in Diagramm einzeichnen, dazu wie bei a) mit transformiertem Impuls, Sprung oder Rampe multiplizieren und dann rücktransformieren in Zeitbereich Aufgabe2 Unter welchen Voraussetzungen kann das dynamische Verhalten eines Systems ideal bzw. real kompensiert werden? => Übertragungsfunktion des Systems muss bekannt sein (White Box)
Übung6 SGA Zwei-Freiheits-grade Struktur (FGA)	Aufgabe1 a) Störgrössenaufschaltung wenn die Störung in der Strecke wirkt, Übertragungsfunktion G_{SGA} in Regelkreis einzeichnen, Regelkreis so umzeichnen, dass Z(s) der Eingang ist und Y(s) der Ausgang, daraus Störübertragungsfunktion aufschreiben, diese soll = 0 sein (ideal kompensiert), das ist der Fall wenn der Zähler von Y(s) / Z(s), also wenn Y(s) = 0, daraus kann man G_{SGA} ermitteln b) die Übertragungsfunktion der SGA aus a) so erweitern, dass sie realisierbar ist, sie ist akausal wenn mehr Nullstellen (Zähler), als Polstellen (Nenner) bzw. wenn Grad Zähler > Grad Nenner Heilung durch Multiplikation mit schnellem PT1-Glied, dies ergibt zusätzliche Polstellen z.B. Grad Zähler ist 4 und Grad Nenner ist 0, daher ist das hoch 4 nötig: T ist die langsamste (grösste) Zeitkonstante, diese wird 10 mal schneller gemacht $G_{SGA\,real} = G_{SGA} \cdot \left(\frac{1}{\frac{T}{10} \cdot s+1}\right)^4$ c) Wie ändert sich durch die SGA das Führungsverhalten des Regelkreises?, ändert gar nicht, SGA beeinflusst nur das Störverhalten Aufgabe2 FGA Regelkreis aufzeichnen, daraus die Übertragungsfunktion aufschreiben, diese soll = 1 sein G_{FGA} und Regler sind parallel und beide in Serie mit der Strecke, die Rückführung beinhaltet nur den Regler und die Strecke (nicht die G_{FGA}), die Übertragungsfunktion nach G_{FGA} auflösen, beurteilen ob kausal oder akausal, wenn akausal noch heilen: $G_{FGA\,real} = G_{FGA} \cdot \frac{1}{\frac{T}{10} \cdot s + 1}$

Übung7 optimierte Regelkreise (Kaskade, Störgrössen-kompensation)	Aufgabe1 Kaskadenregelung, aufzeichnen gemäss dem Bild aus Vorlesung (hier gibt es aber nur eine Strecke) zuerst den inneren Kreis untersuchen, die Übertragungsfunktion des inneren Regelkreise bilden, anhand dieser Übertragungsfunktion die Pol- und Nullstellen bestimmen und im Pol-Nullstellen-Bild aufzeichnen, um die Stabilität zu zeigen Polstellen mit einem x und Nullstellen mit einem o zeichnen, stabil wenn alle Pole links der Im-Achse sind äusserer Kreis untersuchen, gleiches Vorgehen wie beim inneren Kreis zuvor, hier kann man die Übertragungsfunktion der inneren Kreises verwenden (der innere Kreis wird durch einen einzigen Block dargestellt) Der Gesamtregelkreis ist stabil, wenn der innere und der äussere Regelkreis stabil sind Aufgabe2 Störgrössenkompensation = SGA, Regelkreis mit G_{SGA} aufzeichnen, bei der Störung Z(s) beginnen und zum Ausgang Y(s) gehen (den Pfeilen folgen) => nur der Vorwätspfad (also der Zähler der Übertragungsfunktion) soll = 0 sein damit Störung keinen Einfluss hat, man folgt nur den Pfeilen im Vorwärtspfad (ohne das feedback), Auflösen nach G_{SGA} realisierbare SGA => heilen mit schneller Polstelle (mit einem PT1)
Übung8 Ortskurve des Frequenzgangs	Frequenzgang G(jω) berechnen => bei der Übertragungsfunktion s = jω einsetzen und mit der konjugiert komplexen erweitern, dann die Ortskurve zeichnen, dazu aus dem Frequenzgang Imaginärteil und Realteil berechnen und in Re und Im Werte für $0 \leq \omega \leq \infty$ einsetzen => gibt Tabelle mit dieser Tabelle die Ortskurve aufzeichnen ω läuft von 0 nach ∞ um Werte der Tabelle alle auf einmal mit TR zu rechnen so eingeben: G((jω) | w = {0,0.1,1,10,1000} Zum Zeichnen der Ortskurve mit dem TR => Beim Plot auf menu / 3 / 4 Parametrisch dort für x den real() berechnen und für y den imag() berechnen, jeweils mit der Laufvariable t (anstatt w) eingeben (durch den Einsatz von Korrekturgliedern mit Nullstellen kann man den Phasengang manipulieren)
Übung9 Bode-Diagramm	Aufgabe1 mit den einzelnen Übertragungsfunktionen und S. 470 Spalte Bode die ω für Knickpunkt bestimmen und mit den Formeln S. 470 $\|G_{dB}\|$ berechnen, auch die Steigung für die Kurve von S. 470 nehmen, dann kann man die einzelnen Übertragungsfunktionen zeichnen, Die Gesamtübertragungsfunktion besteht aus den multiplizierten einzelnen Übertragungsfunktionen => ergibt im Bode-Diagramm (also im logarithmischen Bereich) eine Addition => die einzelnen Kurven zu einer Kurve addieren ich habe zum Zeichnen des Bode Plots ein TR Programm (Eingabe mit jw anstatt s) Frequenzgang und Betrag und Phase berechnen $\|G(j\omega)\| = \sqrt{Re^2 + Im^2}$ $\varphi\big(G(j\omega)\big) = arctan\left(\frac{Im\big(G(j\omega)\big)}{Re\big(G(j\omega)\big)}\right)$ Aufgabe2 gegebener Bode Plot analysieren => mit Zacher S. 470, damit kann man K und T bestimmen (Frequenz ablesen dann rechnen), Ortskurve kann man direkt mit Zacher S. 470 zeichnen, die nötigen Punkte kann man berechnen
Übung10 Ortskurve, Stabilität Nyquist	Aufgabe1 Ortskurve zeichnen Regelkreis mit einem P-Regler schliessen => bestehende Übertragungsfunktion mit K_p multiplizieren Darf man Nyquistkriterium anwenden? => Polstellen berechnen, wenn offene Kette stabil ist darf man Nyquist anwenden, Aufgabe2 Regelkreis mit einem P-Regler schliessen Stabilitätsgrenze für den P-Regler finden => Grenze ist der kritische Punkt im Nyquist-Diagramm also Im(G(jω)) = 0 und Re(G(jω)) = -1 aus Frequenzgang Im und Re berechnen, mit Im = 0 auflösen nach ω, das grösste ω (ist am weitesten rechts) nehmen und in Re einsetzen, jetzt kann man Re = -1 nach K_p auflösen, bei dieser Reglerverstärkung ist man grenzstabil
Übung11 Amplituden-Phasenreserve	Aufgabe1 Verstärkung 1 entspricht 0dB Übertragungsfunktion bilden, daraus Im und Re berechnen, damit Betrag und Phase bestimmen und so umrechnen (mit meinen TR Programmen), dass man sie im Bode Plot zeichnen kann, darauf Amplituden- und Phasenreserve ablesen Dieselben Werte kann man auch aus dem Nyquistdiagramm ablesen Aufgabe2 Reglerverstärkung für eine bestimmte Amplitudenreserve bestimmen, siehe bei den Formeln aus Übung Aufgabe3 Amplitudenreserve einstellen Gesamtübertragungsfunktion = offene Kette (also ohne feedback aber mit Regler), davon Pol- Nullstellen finden zusätzlich kommt ein I-Anteil dazu => gibt eine weitere Polstelle, daher müssen die Reglerparameter neu entworfen werden
Übung12 Reglerentwurf Frequenzkenn-linienverfahren	Phasenreserve einstellen mit Hilfe des Bodeplot die Amplitude ablesen, um die verschoben werden muss, dann die Reglerverstärkung K anpassen

Übungen Formeln etc.

Impulsantwort	Eingang ist der Impuls, Ausgang ist die Impulsantwort (gesucht) Übertragungsfunktion G = Ausgang Y / Eingang U dazu den Eingang Laplacetransformieren: $u(t) = \delta(t) \rightarrow U(s) = 1$ es folgt Impulsantwort: $Y(s) = G(s) \cdot U(s)$
ideale Kompensation	Übertragungsfunktion G(s) ist vorhanden ideal kompensiert: $K(s) = G^{-1}(s) = 1/G(s)$
realisierbare Kompensation	ideale Kompensation mit einer schnellen Polstelle multiplizieren (Heilung): $K_{real}(s) = K(s) \cdot \frac{1}{0.1 \cdot T_1 \cdot s + 1}$ Die Polstelle ist schnell, da sie eine kleine Zeitkonstante hat, weil das T mit 0,1 multipliziert wird (10 mal schneller)
Umrechnung dB	$\lvert G(s)\rvert_{dB} = 20 \cdot \log\big(G(s)\big)$ $\lvert G(s)\rvert = 10^{\frac{\lvert G(s)\rvert_{dB}}{20}}$
Amplituden-reserve einstellen	Gilt beim P-Regler man hat A_{Rist} aus Bodeplot abgelesen und A_{Rsoll} ist bekannt $\Delta dB = A_{Rist} - A_{Rsoll}$ $\lvert A_R\rvert = 10^{\frac{\Delta dB}{20}}$ $K_{PR} = K_{Palt} \cdot \lvert A_R\rvert$