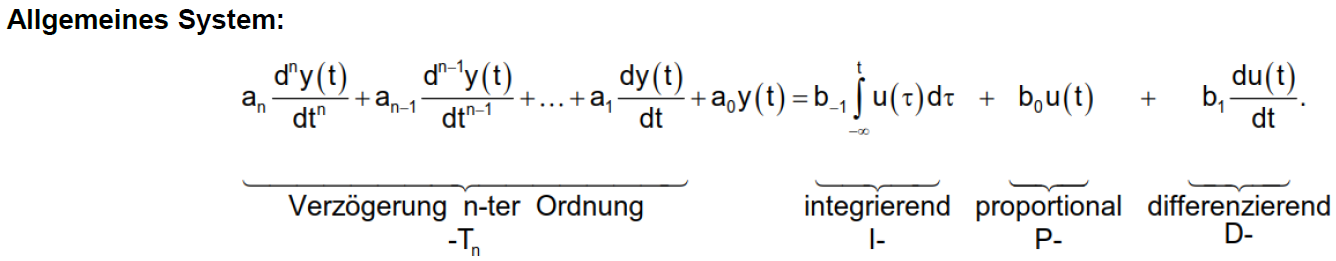
**– System**V = Endwert T = t bei  **🡪**  🡪   
🡪 wenn Pol weiter links, System schneller

**– System**   
🡪 🡪

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| D > 1 | 2 reelle Pole | aperiodische Dämpfung |
| D = 1 | 2 reelle Pole (Doppelpol) | aperiodischer Grenzfall |
| 0 < D < 1 | konj. kompl. Polpaar in linker s-Halbebene | gedämpfte harmonische Schwingung |
| D = 0 | konj. kompl. Polpaar auf Im-Achse | ungedämpfte harmonische Schwingung |
| D < 0 | min. 1 Pol in rechter s-Halbebene | aufklingende Systemreaktion 🡪 instabil |



Bestimmung aus :  
🡪 Umformen sodass Nenner Konstante u. positive Potenzen von s enthält:   
🡪 System-Grundtyp aus Zähler: = D, = P, = I  
🡪 Verzögerung aus Nenner: höchste Potenz = n

**2. Regelkreisglieder**

Führungsgröße = Sollwert (w)

Stellgröße = Stellwert (y)

Regelgröße = Istwert (v)

Regelabweichung (e)

Störgröße (z)

Reglerübertragungsfkt:

Streckenübertragungsfkt:

Störübertragungsfkt: 🡪

Führungsübertragungsfkt: 🡪

Regelkreis:

charakteristische Gleichung eines Regelkreises:   
 ( = Übertragungsfkt. des geöffneten Regelkreises)

* Anfangswertsatz: (nur wenn x(t) bei t=0 keine -Anteile)
* Endwertsatz: (nur wenn endl. Grenzwert )



|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 0,5 | 1 | 2 | 4 | 5 | 10 | 20 |
| -6 dB | 0 dB | 6 dB | 12 dB | 14 dB | 20 dB | 26 dB |

Ein Bild, das Text, Schrift, Screenshot enthält.

Automatisch generierte Beschreibung

Logarithmische Skala auf Kästchenpapier:

3 Kästchen 🡪 x2

4 Kästchen 🡪 x2,5

= 7 Kästchen 🡪 x5

mathematisch (bei 10 Kästchen/dek.):   
 Anzahl Kästchen, zB Kästchen

Steigung -Glied:

eine Dekade: -20dB

Verdopplung: -6dB

Ein Bild, das Diagramm, Plan enthält.

Automatisch generierte Beschreibung

**1. Einführung**

**0. Allgemeines**

**Zusammenhang Übertragungsfunktion - Sprungantwort**

Integrierende Systeme

🡪

Differenzierende Systeme

🡪 (nicht realisierbar!)   
🡪

( = Verzögerungszeit, = Differenzierzeit;   
bei RC-Glied: )

Totzeit-/Laufzeitsysteme

🡪

Anfangswert: (Herleitung Anfangswertsatz)

Endwert: (wenn kein I-Anteil)

Anfangssteigung:  *Nennergrad Zählergrad*

für : 🡪 , System sprungfähig, Anfangsw 0

für u. : 🡪 , Anfangswert = 0, Steigung

für u. : 🡪 , läuft flach aus Nullpunkt

Nenner in Linearfaktordarstellung:

Summe der kleinen Zeitkonstanten 🡪 🡪 Näherung für Reglerentwicklung

Summe aller Zeitkonstanten 🡪 🡪 Abschätzung Einschwingdauer =

Ein Bild, das Diagramm enthält.

Automatisch generierte Beschreibung

Ein Bild, das Diagramm enthält.

Automatisch generierte Beschreibung

Ein Bild, das Diagramm enthält.

Automatisch generierte Beschreibung

**– System**

für D < 1:

= Periodendauer  
 = Anschwingdauer (1. mal Endwert)

(Eigen-Kreisfr.)  
 **(Bogenmaß !)**

= Abklingkonstante = Abstand Tangente v. Einhüllende zu SP dieser Tangente mit V

Ein Bild, das Text, Antenne enthält.

Automatisch generierte Beschreibung

für D = 0:

für D 1: 🡪 Kapitel 4

Ein Bild, das Diagramm enthält.

Automatisch generierte Beschreibung

**(gilt nur   
für !)**

Ein Bild, das Text, Diagramm, Plan, parallel enthält.

Automatisch generierte Beschreibung

**Konstruktion zusammengesetzter Frequenzgänge**

1. Pole und Nullstellen bestimmen um daraus Ordnung zu bestimmen
2. reelle Pole u. Nullstellen 🡪 Faktoren 1. Ordnung 🡪 auf Form „“ bringen
3. konjugiert komplexe Pole u. Nullstellen 🡪 Faktoren 2. Ordnung 🡪 auf Form „“ bringen
4. Knickstellen bestimmen + Konstruktion von Grenzfrequenz zu Grenzfrequenz

Erkennen des Systemtyps:

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  |  |  |  | **mit -Anteil** | **ohne od.** |
| **Ortskurve:** | nur im 4. Quadranten | im 4. + 3. Quadranten | im 4., 3. + 2. Quadranten | kommt aus | Anfangsbetrag 0  Anfangsphase +90° |
| **Bodediagramm:** | -20dB/dek, -90° | -40dB/dek, -180° | -60dB/dek, -270° | Anfangssteigung -20dB/dek.  Anfangsphase -90° | Anfangssteigung +20dB/dek.  Anfangsphase +90° |

aus Bodediagramm: 1. einpendeln auf festen dB-Wert: (sprungfähig) 2. -20dB/dek.: 3. -40dB/dek. od. mehr:

Ein Bild, das Text, Diagramm, Zahl, Schrift enthält.

Automatisch generierte Beschreibung

**Frequenzgang eines Systems bestimmen:**

* nach Betrag u. Phase aufteilen
* charakteristische Punkte bestimmen

**Besonderheiten :**

**wenn (also nur reelle Pole) 🡪 Aufteilung in 2 x**

wenn :

bei gilt: Betrag = 🡪 aber nicht Maximum!

**Resonanzüberhöhung nur bei**

Maximalwert bei Resonanzfrequ.

dort: Resonanzüberhöhung

Ein Bild, das Text, Schrift, Screenshot, weiß enthält.

Automatisch generierte Beschreibung

🡪 schwingfähig für   
 🡪 rel. Überschwingweite (sichtbar in Sprungantwort)

🡪 Resonanzüberhöhung für   
 🡪 Resonanzüberhöhung (sichtbar an Betragsgang)

Ein Bild, das Reihe, Diagramm, parallel, Steigung enthält.

Automatisch generierte Beschreibung

**3. Frequenzgangfunktionen, Ortskurven, Bode-Diagramme**

**4. Modellbildung von Regelstrecken**

Ein Bild, das Reihe, Diagramm, parallel, Screenshot enthält.

Automatisch generierte Beschreibung

**Identifikation aperiodischer -Strecken** (Sprungantworten ohne Überschwinger)  
🡪 als Reihenschaltung von n -Strecken darstellbar, da nur reelle Pole

(je höher n, desto langsamer anfängliche Systemreaktion)

🡪

🡪

🡪 oder

1. Methode: Näherung durch Wendetangente

Tangente mit maximaler Steigung in Sprungantwort finden

🡪 0 bis SP Tangente mit x-Achse

🡪 bis SP Tangente mit Endwert  
🡪 – Näherung

Vorteil: einfach + in allen Fällen möglich

Nachteil: sehr grobe Näherung

2. Methode: Semigrafische Näherung für

1. berechnen u. auf positiver x-Achse eintragen

2. y-Wert ablesen =

3. Wert an neg. x-Achse ablesen =   
🡪 🡪 🡪

Ein Bild, das Text, Reihe, Diagramm, parallel enthält.

Automatisch generierte Beschreibung

Ein Bild, das Reihe, Diagramm, Steigung, parallel enthält.

Automatisch generierte Beschreibung

**experimentelle Modellbildung**

Zusammenfassen kleiner Zeitkonstanten ( Faktor 5): (ggf. inkl. Totzeit)

Zusammenfassen aller Zeitkonstanten: 🡪 Einschwingdauer =

Alternative:

Ein Bild, das Text, Screenshot, Schrift, Zahl enthält.

Automatisch generierte Beschreibung

Ermittlung Übertragungsfunktion aus Betragsgang:

Ein Bild, das Text, Diagramm, Reihe, Schrift enthält.

Automatisch generierte Beschreibung

-System mit Totzeit

1. D aus ü ermitteln:

Ein Bild, das Text, Diagramm, Reihe, Zahl enthält.

Automatisch generierte Beschreibung

2. Methode: Semigrafische Näherung für

1. berechnen u. auf positiver x-Achse eintragen

2. y-Wert ablesen = oder

wenn ganzzahlig:

3. Wert an neg. x-Achse ablesen =   
🡪 🡪

wenn ganzzahlig:

3a. Aufrunden 🡪 🡪 sehr ungenau!

3b. In Diagramm rechts eintragen u. x-Wert ablesen =

4b. Aus Sprungantwort ablesen, bei dem „“ erreicht wird  
🡪 🡪 (mit = abgerundet!) 🡪

Ein Bild, das Reihe, Diagramm, parallel enthält.

Automatisch generierte Beschreibung

**Identifikation von – Strecken**

Ein Bild, das Text, Reihe, Diagramm, Schrift enthält.

Automatisch generierte Beschreibung

3. Methode: Zeitprozentkennwert   
(Methode von Strejc)

Aus Sprungantwort bei   
und bei ablesen

1. Näherung durch :

🡪 🡪   
🡪

2. Näherung durch :

🡪   
🡪

3. Näherung durch :

🡪 🡪

(nur für Zähler > 0 🡪 sonst nicht kausal)   
🡪

**5. Regler und Regelkreise**

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
|  | **P-Regler** () | | | **I-Regler** () |
|  | -Strecke | -Strecke | -Strecke | -Strecke |
| Strecken-übertragungs-  funktion |  |  |  |  |
| Führungs/Stör-übertragungs-funktion |  |  |  |  |
| Koeffizienten | 🡪 immer  🡪 immer ,  wenn | 🡪 schwächer gedämpft als ungeregelte Strecke! |  |  |
| Stabilität | immer stabil | immer stabil | ab n=3 von abhängig | von abhängig |
| Endwert | 🡪 immer | 🡪 immer |  | 🡪 unabh. v. !  🡪 unabh. v. ! |
| Endwert |  |  |  |  |
| steigendes | * sinkende Regelabweichung * Regelkreis wird schneller | * sinkende Regelabweichung * sinkende * steigende Schwingneigung |  |  |
| Fazit | "Der P-Regler braucht eine Regelabweichung , um am Ausgang ein Stellsignal auszugeben." (Da einfach nur mit multipliziert wird) | | | "Der Integrator integriert so lange, bis sein Eingangssignal ist!" 🡪 keine bleibende Regelabweichung () im Führungs- UND Störverhalten (gut) |

bleibende Regelabweichung: (bei Führungssprüngen mit: und , bei Störsprüngen mit: und )

**PI-Regler** () (mit = Nachstellzeit)

P-Anteil: 1 I-Anteil:

Ein Bild, das Diagramm, Reihe, Text, Plan enthält.

Automatisch generierte Beschreibung

**PD-Regler** ()  
schnelle Reaktion auf Regelabweichung; = Vorhaltezeit **🡪 nicht realisierbar, da !  
  
-Regler** () 🡪 klein gewählt

Ein Bild, das Text, Diagramm, Reihe, Schrift enthält.

Automatisch generierte Beschreibung

Ein Bild, das Text, Screenshot, Schrift, Zahl enthält.

Automatisch generierte Beschreibung

**Pol-Nullstellen-Kompensation** (Ziel: Kompensation eines langsamen Streckenpols)  
zB PD-Regler mit PT2-Strecke: 🡪 günstiges Führungsverhalten (Störverh. ggf Kriechen)

**-Regler**🡪 schnelle Reaktion + stationäre Genauigkeit

Ein Bild, das Text, Diagramm, Reihe, Schrift enthält.

Automatisch generierte Beschreibung

Ein Bild, das Text, Diagramm, Reihe, Screenshot enthält.

Automatisch generierte Beschreibung

**Kompensationsregler** 🡪 Idee: vorgeben und passenden Regler berechnen  
   
  
🡪 gesamtes dynamisches Verhalten wird kompensiert,   
da und Pole und Nullstellen der Strecke kompensieren  
🡪 durch und wird gewünschtes Führungsverhalten eingestellt  
  
🡪 ABER: schlechtes Störverhalten („Kriechen“),da kompensierte Streckenpole auftreten:   
🡪 Außerdem: nicht bei minimalphasigen Strecken einsetzen,da instabil: 🡪 strebt gegen

**🡪 Kompensationsregler nicht für instabile oder minimalphasige Strecken anwenden!**

für muss gelten: (n = Pole, m = NS, W = , S = Strecke)

**PI-Regler mit Begrenzungsbeobachter** 🡪 I-Anteil jedes Reglers muss überwacht werden  
Ein Bild, das Diagramm, Reihe, Plan, technische Zeichnung enthält.

Automatisch generierte Beschreibung (K nicht zwingend nötig)

(Herleitung: mit als unverstärkter Regler)  
  
WOK-Konstruktionsregeln

Regel 1: Startpunkte sind Pole des offenen Kreises (da bei )

Regel 2: Endpunkte sind NS des offenen Kreises (da bei )

Regel 3: Anzahl Äste gegen Unendlich = n – m = Pole – NS

Regel 4: falls alle Pole u. NS in linker s-Halbebene: jeder Ort auf reeller Achse, auf dessen rechter Seite Summe aus Polen u. NS = ungerade, ist Wurzelort

Regel 5: für reale physikalische Systeme (reelle und/oder konjugiert komplexe Pole u. NS) ist WOK symmetrisch zu reeller Achse

6c/S.13

**Wurzelortskurven**

Parameter: Reglerverstärkung   
aus WOK keine Aussage über bleibende Regelabweichung (stationäres Verhalten)

Ein Bild, das Text, Diagramm, Reihe, Schrift enthält.

Automatisch generierte Beschreibung

**Amplituden-/Phasenreserve** (wenn positiv: geschlossener Regelkreis stabil)

Ein Bild, das Diagramm, Reihe, Kreis, Text enthält.

Automatisch generierte Beschreibung

(mit = Kreisfrequenz bei -180°)  
 (mit = Kreisfrequenz bei Betrag = 1 ( 0 dB), SP Einheitskreis)

Bode-Diagramm

(mit = Kreisfrequenz bei -180°)

(mit = Kreisfrequenz bei Betrag = 1 ( 0 dB))

**kritische Verstärkung ermitteln**

Ortskurve: Bode-Diagramm:

**praktische Richtlinien:**   
 🡪 kein Überschwinger

🡪 1 Überschwinger

🡪 ein paar Überschwinger, dafür bessere Störunterdrückung

**(geschlossener) Regelkreis stabil**

Ortskurve  
kritischer Punkt liegt auf der linken Seite der Ortskurve von (wenn diese in -Laufrichtung durchlaufen wird), wobei der Teil der Ortskurve entscheidend ist, der am nächsten am kritischen Punkt liegt

Ein Bild, das Reihe, Diagramm, Text, Schrift enthält.

Automatisch generierte Beschreibung

Bode-Diagramm

bei allen Kreisfrequenzen, bei denen , ist Betrag ( positive )

**(geschlossener) Regelkreis am Stabilitätsrand**

Dauerschwingungsbedingung: 🡪 ,

Ortskurve von läuft durch (kritischer Punkt) 🡪 zugehörige Kreisfrequenz:

Bodediagramm: es gibt ein , bei dem Betrag = und Phase = sind

**6. Stabilitätskriterien**



Ein Bild, das Text, Reihe, Diagramm, Schrift enthält.

Automatisch generierte Beschreibung

Ein Bild, das Reihe, Diagramm, Text enthält.

Automatisch generierte Beschreibung

**Optimierung im Frequenzbereich**

Führungsverhalten Störverhalten

Durchtrittsfrequenz <-> Bandbreite Führungsverh. 🡪 größeres

🡪 🡪 bessere Störunterdrückung

🡪 🡪

🡪

Betragsoptimum und symmetrisches Optimum  
betragsoptimale Dämpfung (), damit möglichst lange an 0dB-Linie

1. Regler mit I-Anteil wählen (wg. stationärer Genauigkeit)  
2. Große Streckenzeitkonstante(n) mit Regler-NS kompensieren (1xT: PI oder 2xT: PIDT1)  
3. Kleine Zeitkonstanten v. Strecke u. Regler zu zusammenfassen  
4. so wählen, dass erfüllt (45°-Winkel in WOK)   
🡪 immer und und   
Ein Bild, das Text, Zahl, Screenshot, Schrift enthält.

Automatisch generierte Beschreibung  
BO gutes Führungsverhalten; SO besseres Störverhalten 🡪 daher aber –Vorfilter notwendig

**Einstellwerte nach Ziegler u. Nichols**

1. Regelkreis mit P-Regler schließen 2. erhöhen, bis Regelkreis schwingt (Dauerschw.)

3. Kenndaten Regelkreis am Stabilitätsrand entnehmen: und

4. Einstellwerte für günstiges Führungsverhalten: Ein Bild, das Text, Schrift, Screenshot, Reihe enthält.

Automatisch generierte Beschreibung  
Vorteil: einfach  
Nachteile: schwach gedämpfte Regelung; erst ab …-Strecken; Schwingversuch muss zulässig sein

**Methode von Chien, Hrones & Reswick**

– Approximation der Streckensprungantwort durch   
Methode „Näherung durch Wendetangente“

Ein Bild, das Text, Screenshot, Zahl, Schrift enthält.

Automatisch generierte Beschreibung  
🡪 für Führungsverhalten kleineres und Kompensation

Vorteile: einfache Anwendung; keine aufwendige Modellbildung; praxiserprobt

Nachteile: bei extremen – Verhältnissen nicht sinnvoll; keine Regeln für schwingfähige Systeme; Spezifikation wird oft nicht wirklich eingehalten

**Spezifikationen einer guten Regelung**

gutes Führungsverhalten: v(t) nicht zu langsam, nicht zu schwach gedämpft  
🡪 Kompensation langsamer Streckenzeitkonstanten durch Reglernullstellen

gutes Störverhalten: v(t) kein Kriechen  
🡪 Vermeidung der Kompensation langsamer Streckenzeitkonstanten  
🡪 höhere Verstärkung

**7. Optimierung von Regelkreisen**