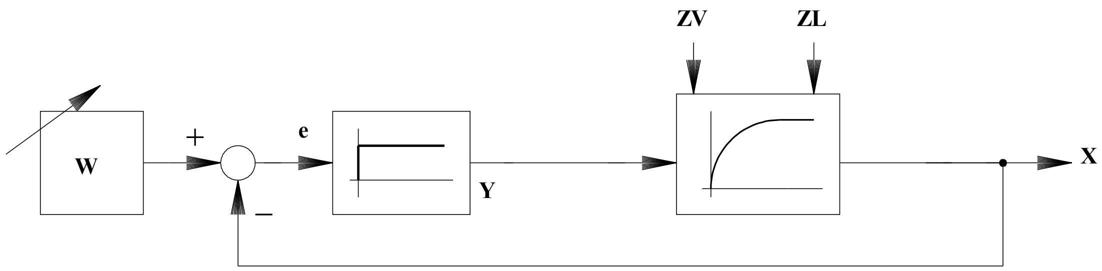
4. Der geschlossene Regelkreis mit P-Strecke und P-Regler

4.1. Störverhalten

(disturbance behaviour, comportement aux perturbations)

4.1.1 Angriffspunkt der Störung

a) **Wo wirkt die Störung?**

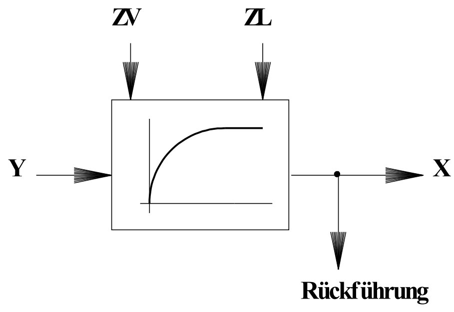


Z_L = Laststörung, wirkt am Ausgang der Strecke
Beispiel: ändernde Belastung eines stabilisierten Netzgerätes
Eine reine Laststörung würde sich sofort auf die Regelgrösse auswirken.
Dies kommt selten vor.

Z_V = Versorgungsstörung, wirkt am Eingang der Strecke
Beispiel: ändernder Gasdruck eines Ofens, Netzspannungsschwankungen

In der Praxis gibt es oft Störungen, die irgendwo zwischen Ein- und Ausgang der Regelstrecke wirken. In diesem Fall kann man versuchen, sie auf Ein- oder Ausgang umzurechnen, oder besser, für die Regelstrecke ein detaillierteres Blockschaltbild (Modell) erstellen, welches den physikalischen Gegebenheiten Rechnung trägt.

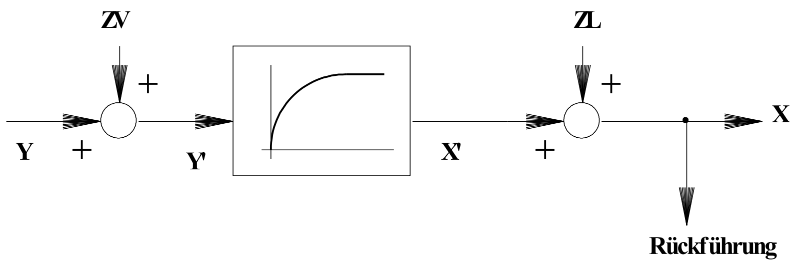
b) Wie kann die Störung im Signalflussplan berücksichtigt werden?



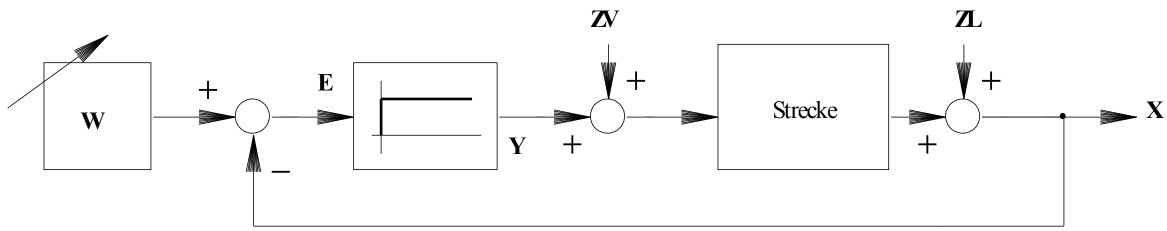
Die Versorgungsstörung addiert sich zur Stellgrösse: Y’ = Y + ZV

Beachte: Störungen können positiv oder negativ wirken!
(Bsp.: Ansteigen oder Absinken der Netzspannung.)

Die Laststörung addiert sich zum Ausgangssignal X’ der ungestörten Strecke und ergibt dann die Regelgrösse X: X = X’ + ZL



Für den ganzen geschlossenen Regelkreis ergibt sich also folgender Signalflussplan:



Im obigen Blockschaltbild wurde zur Vereinfachung der Messwandler weggelassen.
Gegebenenfalls ist dieser natürlich mitzuberücksichtigen.

4.1.2 Regelgrössen und Regelgrössenänderungen

Bei der Untersuchung eines Regelvorgangs geht man normalerweise von einem **Ruhezustand** aus (dem normalen Arbeitspunkt des Regelkreises). Die dabei auftretenden Werte heissen Bezugswerte, weil man die im Verlauf der Regelung auftretenden Werte auf sie bezieht.

Bezugswerte: X_0, Y_0, Z_0

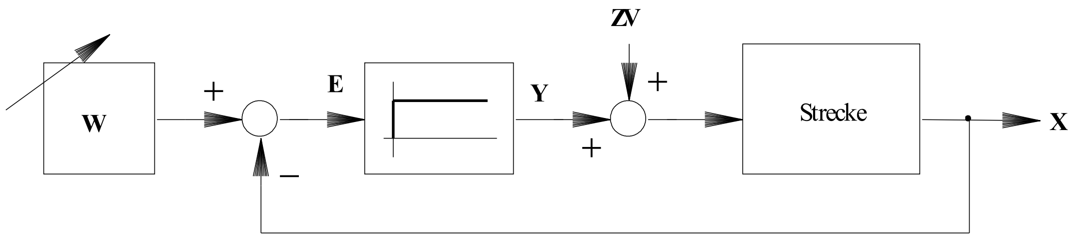
Bei einer Störung ändern sich diese Werte auf X, Y, Z.

Normalerweise interessiert man sich hauptsächlich für die Änderung von X, Y, Z in Bezug auf den Ruhezustand.

$x = X - X_0$ **Regelgrössenänderung**
$y = Y - Y_0$ **Stellgrössenänderung**
$z = Z - Z_0$ **Störgrössenänderung** (kurz: **Störung**)

4.1.3 Statisches Verhalten bei einer Versorgungsstörung

(ohne Laststörung: $z_L = 0$)



Der Sollwertgeber liefert einen konstanten Wert: W = const → w = ΔW = 0 (Festwertregelung)

a) Welche bleibende Regelabweichung x_{Wb} ergibt sich?
Wie hängt sie von dem Proportionalbeiwert des Reglers ab?

Gesucht: $x_W = f(K_{PS}, K_{PR}, z)$ nach dem Einschwingvorgang (für $t \to \infty$)

Gleichungen aus dem Signalflussplan:

Strecke:

$$\mathbf{x = K_{PS} \cdot (y + z)} \qquad \mathbf{(1)}$$

Regler:

$$\mathbf{y = K_{PR} \cdot e} \qquad \mathbf{(2)}$$

Vergleicher:

$$\mathbf{e = w - x} \qquad \mathbf{(3)}$$

mit w = 0 da W = const:

$$e = -x \qquad (3a)$$

(2) in (1): $x = K_{PS} \cdot (K_{PR} \cdot e + z)$

mit (3a): $x = -K_{PS} \cdot K_{PR} \cdot x + K_{PS} \cdot z$

$$x \cdot (1 + K_{PS} \cdot K_{PR}) = K_{PS} \cdot z$$

$$\boxed{x_b = \frac{K_{PS}}{1 + K_{PS} \cdot K_{PR}} \cdot z}$$ Bleibender Wert der Regelgrösse

Bleibende Regelabweichung bei einer Versorgungsstörung (P-Abweichung):

$x_W = x - w = x$ wenn w = 0, also

$$x_{Wb} = \frac{K_{PS}}{1 + K_{PS} \cdot K_{PR}} \cdot z$$ Bleibende Regelabweichung

Merkregel für die Formel:
z verursacht xb, z durchläuft die Strecke (bei einer Versorgungsstörung) → oben K_{PS}
Unten steht immer 1 + Ringverstärkung.

Eine Analyse der Formel ergibt:

Die bleibende Regelabweichnung wird umso kleiner, je grösser der Proportionalbeiwert des Reglers gemacht wird.

Bemerkungen:

- K_{PR} kann nicht immer beliebig gross gemacht werden, da sich sonst bei PTn-Strecken Überschwingen und Instabilität ergeben. (siehe 1.4)
- $\mathbf{V_0 = K_{PS} \cdot K_{PR}}$ wird auch **Kreisverstärkung** oder **Ringverstärkung** genannt.

Welche Stellgrössenänderung ergibt sich?

Mit Formel (2): $y = -K_{PR} \cdot x_W$

b) Wie gut wird die Störung durch die Regelung unterdrückt?

Wie ist das Verhältnis der Regelabweichungen mit und ohne Regelung?
Dieses Verhältnis wird als **Regelfaktor** bezeichnet:

$$R = \frac{x_{Wbmit}}{x_{Wbohne}}$$

- Ohne Regelung wirkt sich die Störung voll aus:

$x_{Wohne} = K_{PS} \cdot z$

- Mit Regelung ergibt sich nach obiger Formel:

$$x_{Wbmit} = \frac{K_{PS}}{1 + K_{PS} \cdot K_{PR}} \cdot z$$

Für das Verhältnis ergibt sich also:

$$\frac{x_{Wbmit}}{x_{Wbohne}} = \frac{K_{PS} \cdot z}{(1+K_{PS} \cdot K_{PR}) \cdot K_{PS} \cdot z}$$

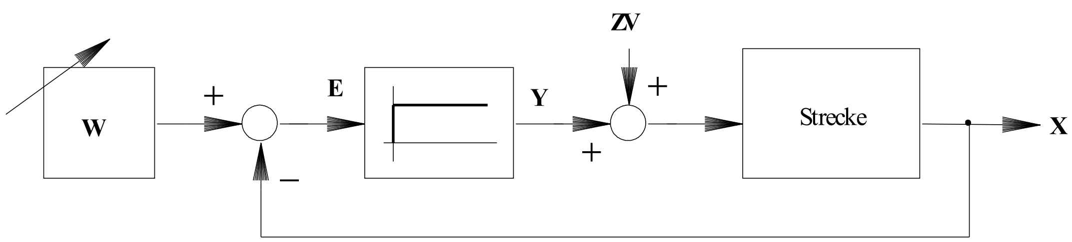
$$\frac{x_{Wbmit}}{x_{Wbohne}} = \frac{1}{(1+K_{PS} \cdot K_{PR})}$$

$$R = \frac{1}{(1+K_{PS} \cdot K_{PR})}$$

Aufgabe 4.1
Bei einer Temperaturregelstrecke wird mit normierten Größen gearbeitet d.h. Yh = 100% und Xh = 100%. Eine Versorgungsstörung bewirkt ohne Regelung einen Temperaturabfall von 20%. Berechne die bleibende Temperaturabweichung mit Regelung für die Werte K_{PR} *= 1, 5, 10.*

Aufgabe 4.2
Leite die Formel für die bleibende Regelabweichung her, wenn ein Messwandler verwendet wird. Kann man die obige Merkregel auch auf diesen Regelkreis ausdehnen.

4.1.4 Dynamisches Verhalten bei einer Versorgungsstörung



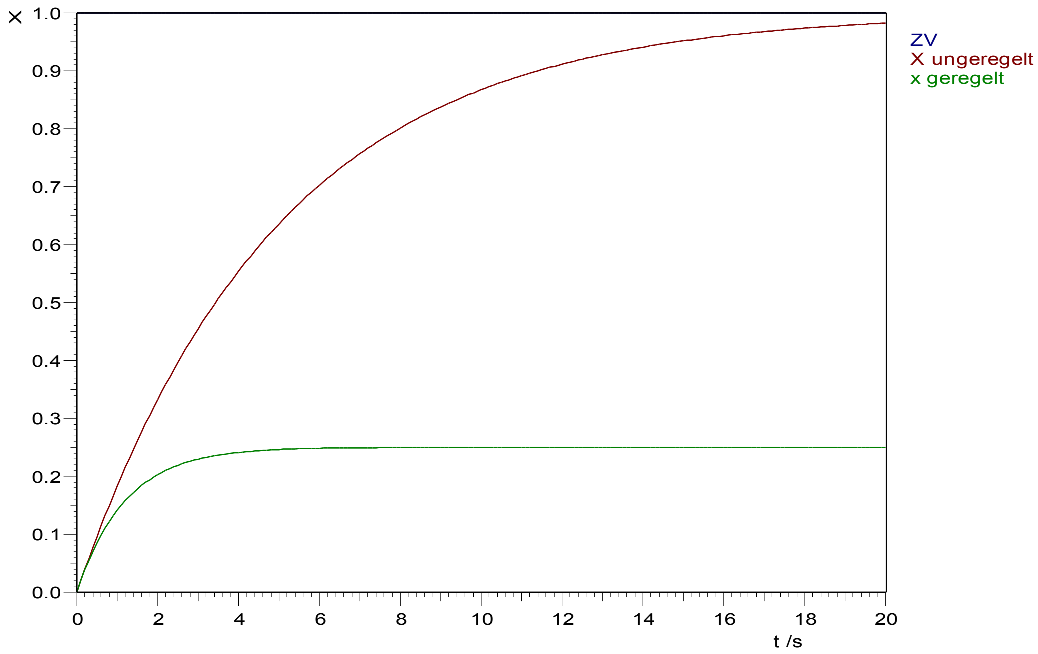
Der Sollwertgeber liefert einen konstanten Wert: W = const → w = ΔW = 0

Die Störung beeinflusst zuerst die Regelgrösse, dann erst kann der Regler eingreifen!

Die anfängliche Änderungsgeschwindigkeit der Regelgrösse ist also die gleiche, ob mit oder ohne Regelung. Sie ist durch das Verhalten der Strecke gegeben.

a) PT1 - Strecken

Beispiel:



Das Bild zeigt die Störantworten (geregelt und ungeregelt) für Z_V = 100%, K_{PS} = 1.

Man sieht, dass die Störung nicht vollständig ausgeregelt wird (sonst würde irgendwann x = 0 werden). Dies wissen wir aber schon: ein P-Regler hat eine bleibende Regelabweichung.

Interessant ist das zeitliche Verhalten:

- am Anfang liegen die Kurven für den geregelten und den ungeregelten Fall aufeinander, siehe oben.
- Der Endwert wird im geregelten Fall schneller erreicht.
  Der Regler beschleunigt die Reaktion im Regelkreis.

Aufgabe 4.3
Bestimme die Zeitkonstanten für den ungeregelten und den geregelten Fall.

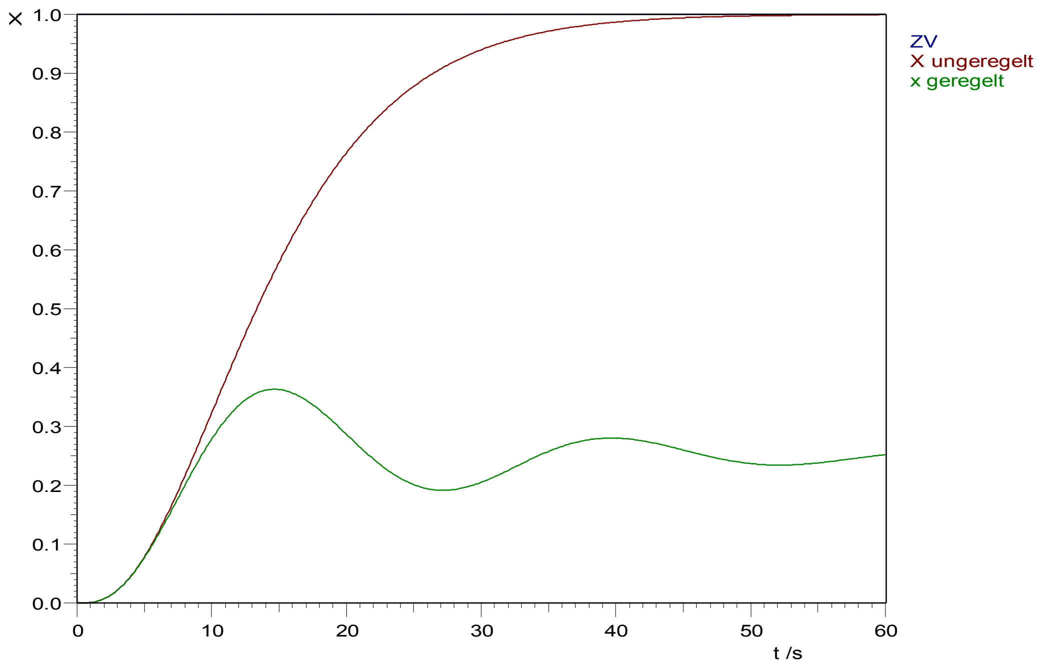
Aufgabe 4.4
Bestimme den Proportionalbeiwert des Reglers im Beispiel.

Aufgabe 4.5
Stelle eine allgemeine Formel für die Zeitkonstante Ts im geregelten Fall auf*
Hinweis: beide Kurven haben für t = 0 die gleiche Tangente (einzeichnen!). Die Schnittpunkte dieser Tangente mit den Maximalwertgeraden definieren zwei ähnliche Dreiecke.

Ergebnis: $\frac{T_S^*}{T_S} = R$ mit $R = \frac{1}{(1+K_{PS} \cdot K_{PR})}$

b) PTn - Strecken

(Strecken höherer Ordnung)



Nach einer Störung am Eingang der Strecke dauert es ca. T_u bis sich die Regelgröße am Messort ändert, Dann dauert es noch einmal ca. T_u bis sich das Eingreifen des Reglers am Messort bemerkbar macht.

Mit Regler verlaufen die Kurven von X also während ca. $2T_u$ entsprechend der Sprungantwort.

Der nach $2T_u$ erreichte Wert der Regelgröße x_u wird auch noch als unvermeidbare vorübergehende Regelabweichung bezeichnet.

Aufgabe 4.6
Zeichne T_u, $2T_u$ und x_u in das Diagramm ein.
Stelle mit Hilfe von zwei ähnlichen Dreiecken (Tangente beachten!) die Formel für die unvermeidbare vorübergehende Regelabweichung auf.

Ergebnis:

$$\boxed{x_u = \frac{T_u}{T_g} \cdot K_{PS} \cdot z}$$

Bemerkungen:

- $x_u \neq f(K_{PR})$ d.h. die Einstellung und die Art des Reglers(P-,PI-, PID-Regler,..) haben keinen Einfluss auf den Wert von x_u.
- Je höher die Ordnung der Strecke, d.h. je größer Tu/Tg (Schwierigkeitsgrad), desto größer wird x_u

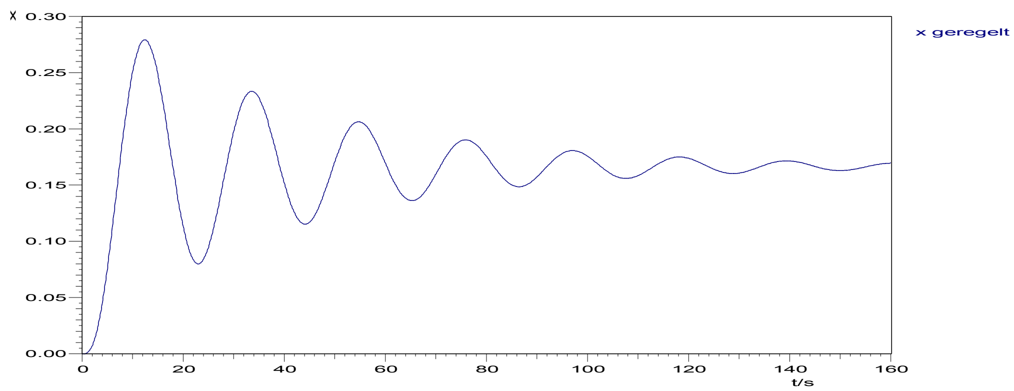
Ist die Regelgröße X nach ca. 2Tu über ihren stationären Endwert (abhängig von X_P bzw. K_{PR}) hinausgelaufen, dann kommt es zu Überschwingungen bzw. zur Instabilität.

Das Stellglied hat dann nämlich zu weit geschlossen und die Regelgröße nimmt wieder ab.

Das Stellglied öffnet wieder, usw.

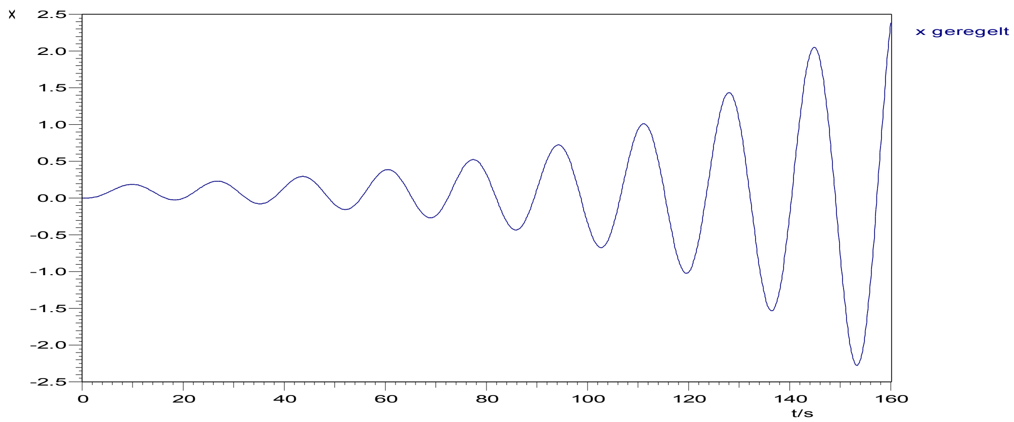
Dieses Problem tritt auf, wenn der Proportionalbeiwert des Reglers zu groß gemacht wird.

Überschwingungen sind gedämpfte Schwingungen über bzw. unter den Endwert hinaus.



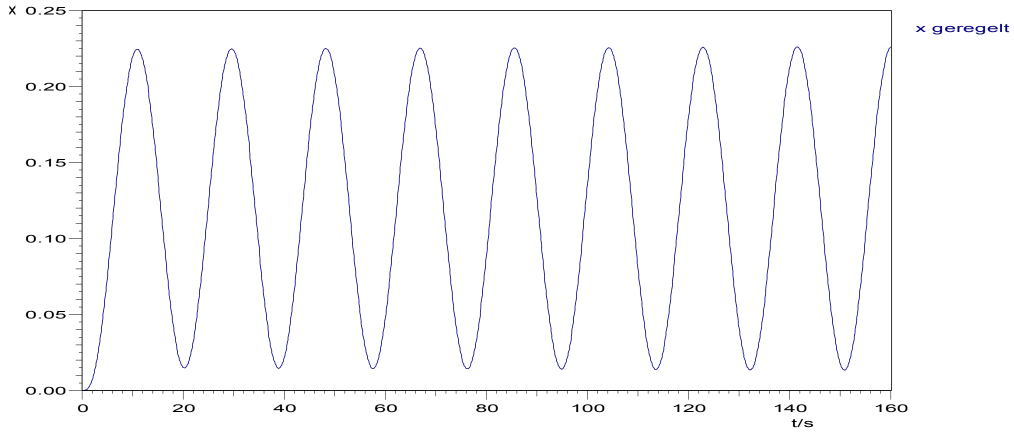
Sie sind erst möglich, wenn die Strecke eine Totzeit hat (ab 2. Ordnung) und je nach Werten vom P-Bereich des Reglers und von den Zeitkonstanten der Streckenglieder.

Instabilität eines Regelkreises ist der Zustand, bei dem die Regelgröße X und die Stellgröße Y Schwingungen mit aufklingender Amplitude ausführen.



Bei P-Reglern ist Instabilität erst möglich bei P-Strecken ab 3. Ordnung und bei einer großen Verstärkung des Reglers.

Die **Stabilitätsgrenze** ist erreicht, wenn X und Y Schwingungen mit konstanter Amplitude ausführen:



Der P-Bereich X_P (bzw. der P-Beiwert K_{PR}) bei dem die Stabilitätsgrenze erreicht ist, wird als **kritischer P-Bereich** X_{Pkrit} (bzw. kritischer P-Beiwert oder kritische Verstärkung) bezeichnet.

Aufgabe 4.7
Baue in BORIS (WINFACT) einen Regelkreis mit einer PT4-Strecke mit Ts = 2s und K_{PS} = 1 auf.
Beobachte die Wirkung des Regler-Proportionalbeiwerts auf: bleibende Regelabweichung, Überschwingen und Stabilität.
Bestimme die Stabilitätsgrenze.

4.1.5 Optimale Einstellung des P-Reglers (Optimierung):

1. Methode: Nach **Ziegler-Nichols** gilt als optimaler Wert:

$$\boxed{K_{PR} = 0{,}5 \cdot K_{PRkrit}}$$

Hierzu muß der Regelkreis bis an die Stabilitätsgrenze gebracht werden, was nicht immer möglich ist ohne die Anlage zu beschädigen. Hier hilft oft eine Simulation.

2. Methode: Wenn die Streckenparameter bekannt sind, dann gilt:

$$\boxed{K_{PR} = 0{,}3....1{,}0 \cdot \frac{T_g}{T_u \cdot K_{PS}}}$$

Aufgabe 4.8
Optimiere den Regelkreis aus Aufgabe 4.7 mit beiden Methoden. Untersuche mit BORIS das Verhalten. Bestimme jeweils die bleibende Regelabweichung und die Überschwingweite.