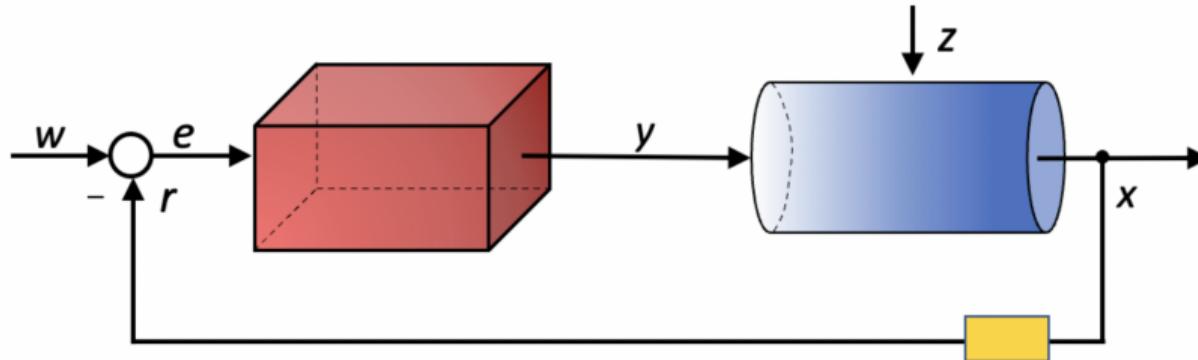


7. Regler



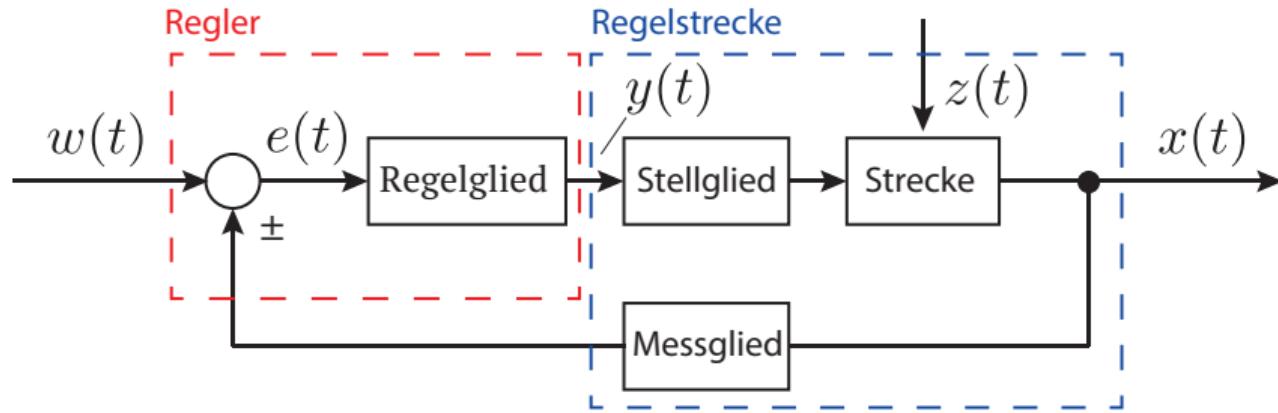
Inhalt

1. Einleitung
2. Arten von Regler
3. PID-Regler
 - ▶ P-Regler
 - ▶ PI-Regler
 - ▶ PD-Regler
 - ▶ PID-Regler (Idealer und realer PID-Regler)



Einleitung

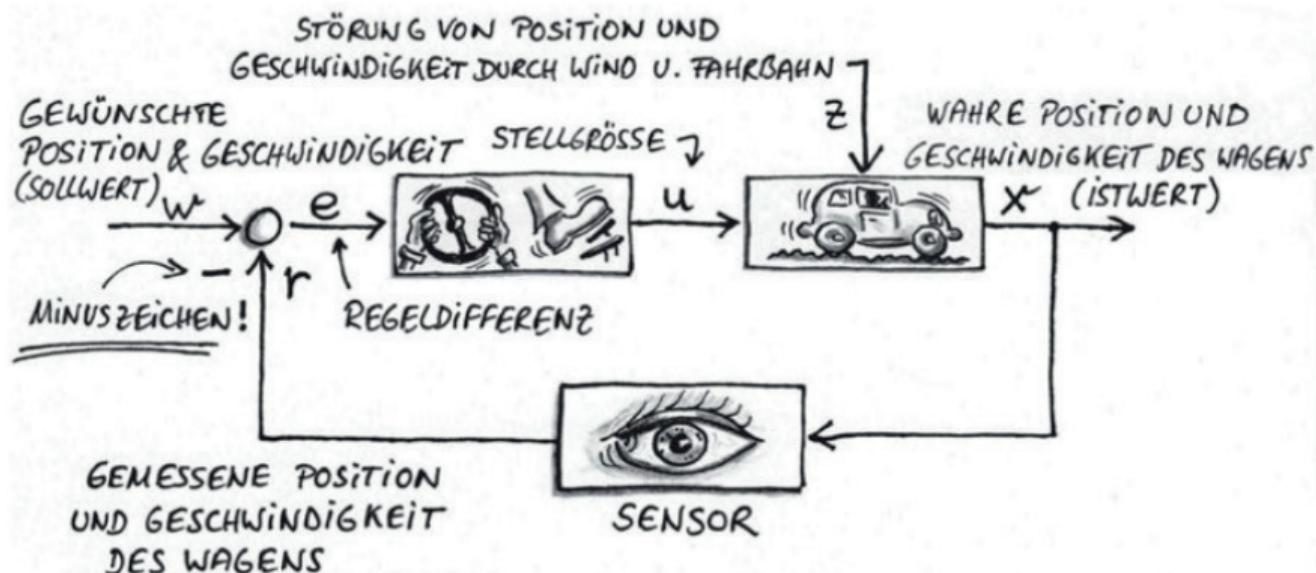
- Bisher – Beschreibung des dynamischen Verhalten der Regelstrecke im Zeit- und Bildbereich
- Weitere Schritte – Beschreibung des Reglers (Fokus auf PID-Regler)



Definition

- ▶ Der **Regler** ist eine Funktionseinheit aus Vergleichsglied und Regelglied zur Durchführung einer festgelegten Regelungsaufgabe.
- ▶ Die **Regeleinrichtung** ist eine Funktionseinheit, die die Stellgröße (y) aus der Führungsgröße (w) und der Rückführgröße (x) bildet.

Regelung bei einem Fahrzeug



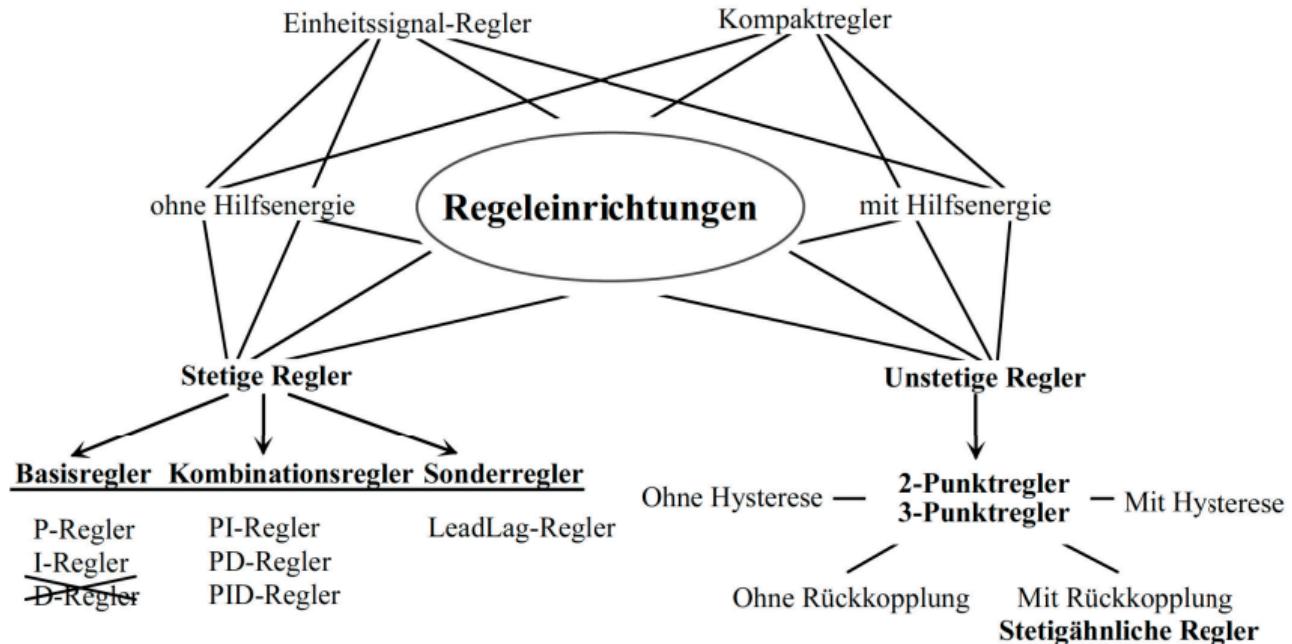
Arten von Reglern

Die Einteilung von in der Praxis eingesetzten Reglern lässt sich nach unterschiedlichen Gesichtspunkten vornehmen:

1. Einteilung nach Art der Realisierung
 - ▶ Mechanische und analoge Regler
 - ▶ Elektrische und digitale Regler
2. Einteilung nach der Art der Stell- bzw. Zeitverhalten
 - ▶ Nichtstetige Regelung
 - ▶ Stetige Regelung (P, PI-, PD-, PID)
3. Einteilung nach der Aufgabenstellung
 - ▶ Festwertregler
 - ▶ Folgeregler



Übersicht über Reglerarten



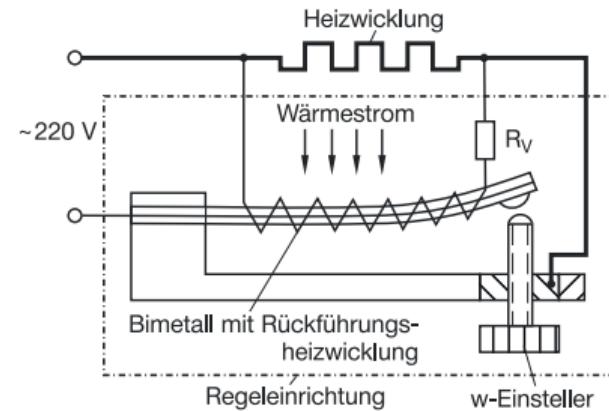
Unstetige Regler

Prinzip

- ▶ Einfacher Aufbau
- ▶ Verlustleistung des Stellgliedes gering
- ▶ Mechanischer Ausführung (Thermostat) - braucht keine Hilfsenergie

Vorteile

- ▶ Die Stellgröße kann nur 2 Werte annehmen (Ein oder Aus)
- ▶ Beispiel: Sitzheizung



Regelungsstrategien (stetige Regler)

- ▶ Die Anpassung von $y(t)$, in Abhangigkeit vom Wert und Zeitverhalten von $e(t)$, kann mithilfe verschiedener Regelstrategien beschrieben werden
- ▶ Das proportionale (**P**), integrale (**I**) und differenzierende (**D**) Zeitverhalten ist zur Regelung von Prozessen von prinzipieller Bedeutung. Das bildet die Grundlage fur die sogenannte PID-Regler.
- ▶ **P**-, **I**- und **D**-Regler lehnen sich an „altbekannte menschliche“ Verhaltensweisen an und bilden die Gruppe der Basisregler



Regler mit Basisverhalten

P-Regler

- Der P-Regler stellt ein System dar, welches eine zur Regeldifferenz $e(t)$ proportionale Stellgröße $y(t)$ generiert:

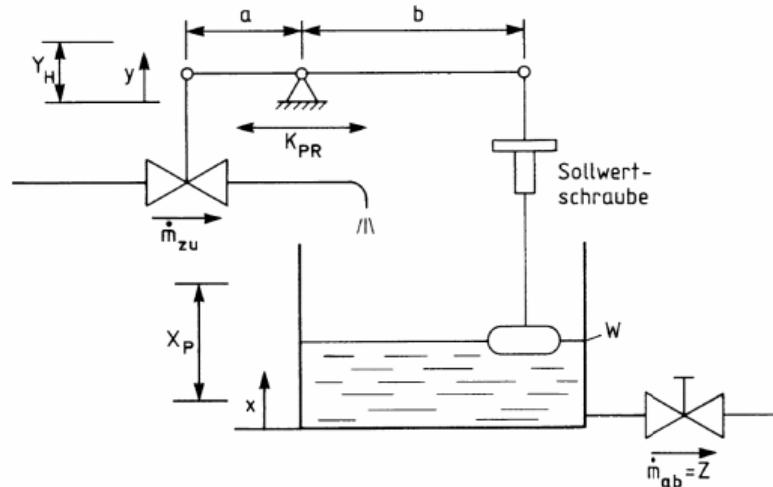
$$y(t) = K_p \cdot e(t)$$

- aus der Steigung der Kennlinie wird der Proportionalbeiwert K_p gebildet: $K_p = \frac{\Delta y}{\Delta e}$

Regler mit Basisverhalten

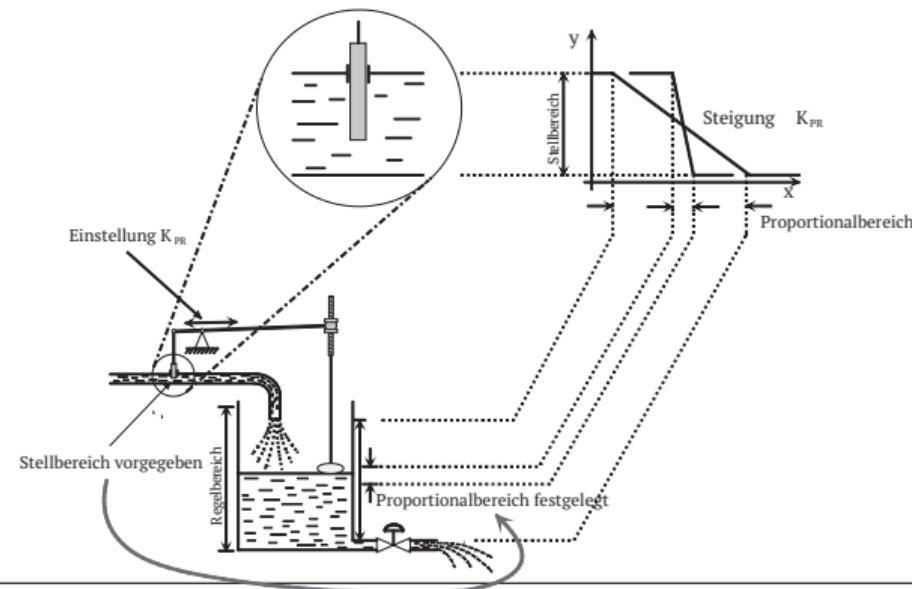
P-Regler

- Gerätefließbild eines Wasserstandsreglers mit P-Verhalten
- Der Drehpunkt des Gestänges als einstellbarer Proportionalwert



Regler mit Basisverhalten

- kleiner Verstärkungsfaktor K_{PR} ergibt einen großen Proportionalbereich - ein großer K_{PR} verursacht große Ventilhübe



Regler mit Basisverhalten

I-Regler

- Der I-Regler stellt ein dynamisches System dar, das eine zum Zeitintegral der Regeldifferenz $e(t)$ proportionale Stellgröße $y(t)$ erzeugt:

$$y(t) = K_I \int_0^t e(t') \cdot dt'$$

- Der Integrierbeiwert K_I gibt die Änderungsgeschwindigkeit der Stellgröße $y(t)$ vor



Regler mit Basisverhalten

D-Regler

- ▶ Der D-Regler reagiert nur auf zeitliche Änderungen der Regeldifferenz $e(t)$ durch ein der Änderungsgeschwindigkeit proportionales Stellsignal:

$$y(t) = K_D \cdot \dot{e}(t)$$

- ▶ Der D-Regler regelt zeitlich konstante Regeldifferenzen nicht aus, gleich, wie groß diese auch ausfallen
- ▶ Für ihn gilt deshalb: **Er ist für sich alleine nicht zu gebrauchen!**



Regler mit kombiniertem Verhalten

- Bei der Einrichtung von Regelungen müssen immer Kompromisse gesucht werden \Rightarrow Kombination von P-, I- und D-Regler

	Vorteil	Nachteil
P-Regler:	Reagiert unmittelbar auf eine Regeldifferenz.	Regelt ungenau.
I-Regler:	Regelt genau.	Regelt sehr langsam und neigt zu Schwingungen.
D-Regler:	Antwortet nur auf zeitliche Änderungen der Regeldifferenz.	Nicht zu gebrauchen, da konstante Regeldifferenzen nicht ausgeregelt werden.



PID-Regler

- ▶ Der PID-Regler (*Engl. proportional-integral-derivative controller*) besteht aus den Anteilen des P-Gliedes, des I-Gliedes und des D-Gliedes
- ▶ Er kann sowohl aus der Parallelstruktur oder der Reihenstruktur definiert werden



P-Regler

Realisierung eines P-Reglers

- Die Verstärkung der Regeldifferenz mit K_P ergibt den P-Regler mit der Übertragungsfunktion:

$$R(s) = K_P$$

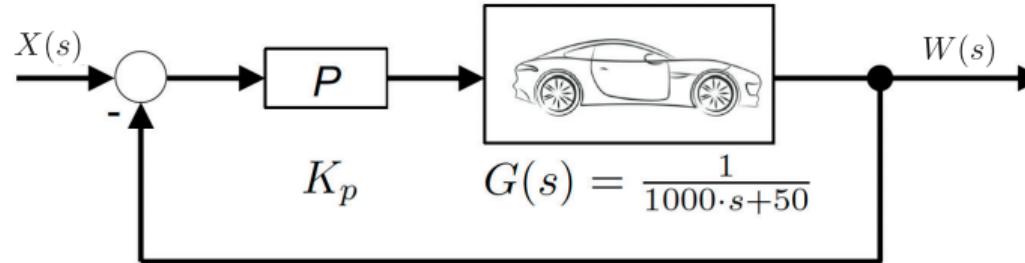
- Der Regelfehler wird dem P-Glied zugeführt



P-Regler zur Regelung einer PT1-Strecke

Beispiel: Längsregelung eines Fahrzeugs - mit einem P-Regler mit dem Ziel

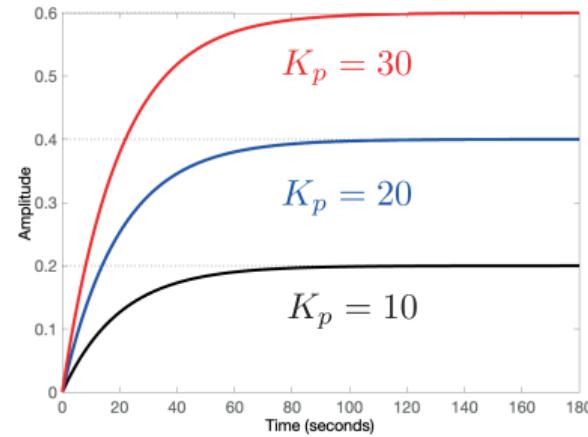
- ▶ Fehler im stationären Zustand zu *minimieren*
- ▶ Reaktionszeit zu verbessern



P-Regler zur Regelung einer PT1-Strecke

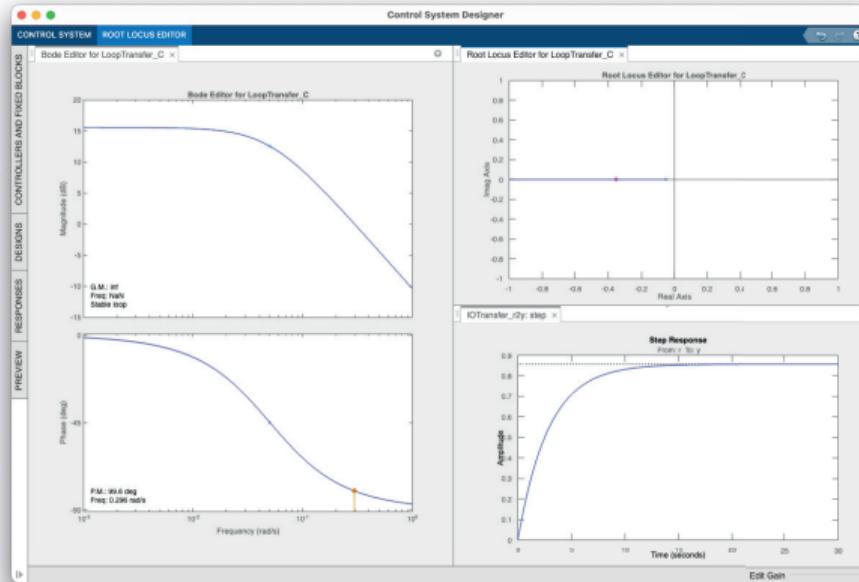
Beispiel: Längsregelung eines Fahrzeugs - das Ergebnis

- ▶ Fehler im stationären Zustand minimiert
- ▶ Schnelle Reaktionszeit (noch nicht optimal)



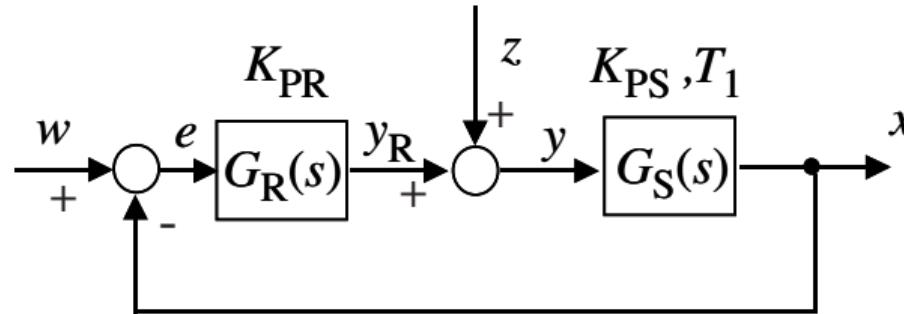
P-Regler zur Regelung einer PT1-Strecke

Beispiel: Längsregelung eines Fahrzeugs - Live-Demo (SISO Design Tool)



P-Regler zur Regelung einer PT1-Strecke

- ▶ P-Regler und PT1-Strecke in Reihe geschaltet, wobei $G_S(s) = K_{PR}$ und $G_S(s) = \frac{K_{PS}}{1+sT_1}$
- ▶ Zu untersuchen ist hier das **dynamische Verhalten** und dabei ist zwischen dem **Führungsverhalten** und dem **Störverhalten** zu unterscheiden.



P-Regler zur Regelung einer PT1-Strecke

- Bekannt ist die Führungsübertragungsfunktion

$$G_W(s) = \frac{x(s)}{w(s)} = \frac{G_R(s) G_S(s)}{1 + G_R(s) G_S(s)} = \frac{K_{PR} K_{PS}}{1 + K_{PR} K_{PS} + sT_1}$$

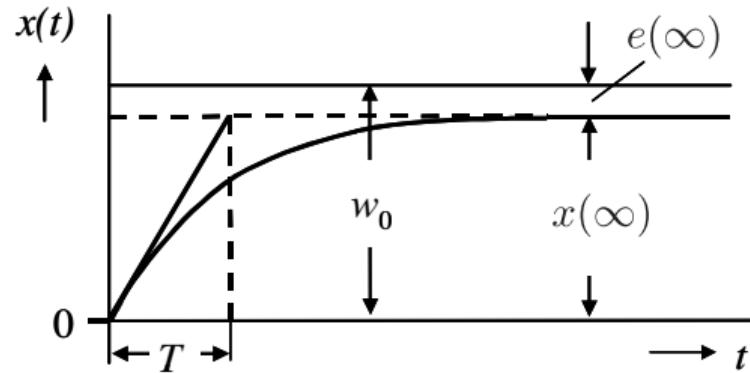
- Gesucht ist das *Ist*-Signal $x(\infty)$ und die bleibende Regeldifferenz $e(\infty)$ für einen einen Sollwertsprung

$$w(t) = w_0 \cdot \sigma(t)$$

P-Regler zur Regelung einer PT1-Strecke

- Führungssprungantwort des Regelkreises, wobei

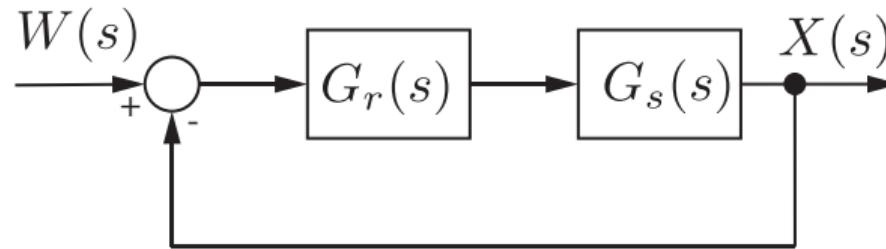
$$x(\infty) = \frac{K_{\text{PR}} K_{\text{PS}}}{1 + K_{\text{PR}} K_{\text{PS}}} w_0 \quad \text{und} \quad e(\infty) = w_0 - x(\infty) = \frac{1}{1 + K_{\text{PR}} K_{\text{PS}}} w_0$$



P-Regler: Übungsaufgabe

Folgendes System soll so geregelt werden, dass es stabil ist, wobei:

$$G_r(s) = K_P \quad \text{und} \quad G_s(s) = \frac{1}{s-2}.$$



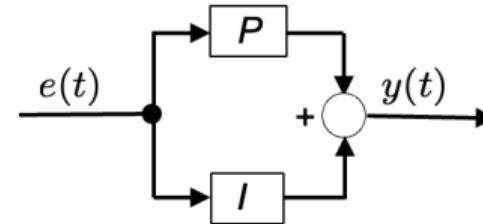
PI-Regler

Realisierung eines PI-Reglers

- Die Parallelschaltung von P- und I-Glied ergibt den PI-Regler mit der Übertragungsfunktion:

$$R(s) = \frac{K_P \cdot s + K_I}{s}$$

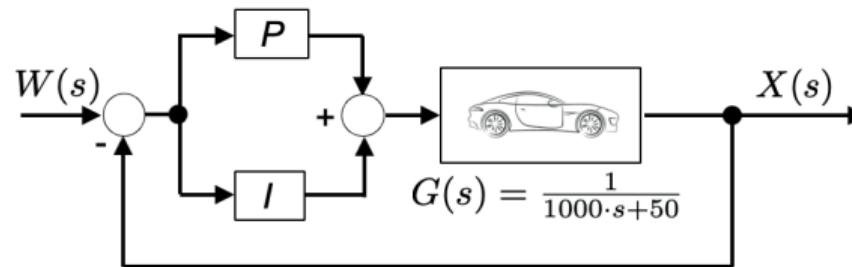
- Der Regelfehler wird dem P- sowie dem I-Glied zugeführt unterscheiden.



PI-Regler mit PT1-Strecke

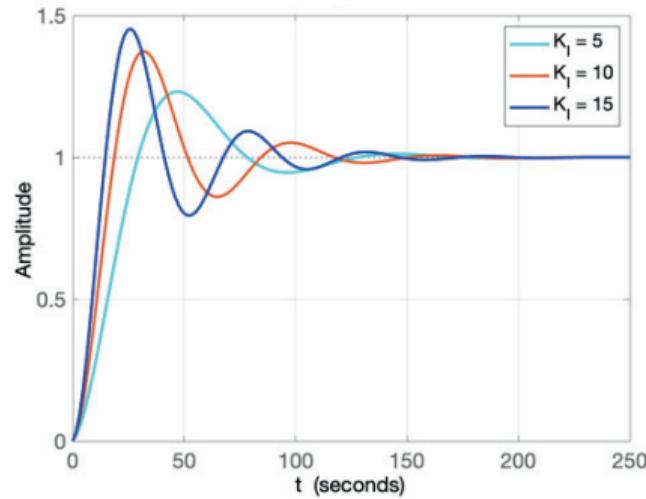
Beispiel: Längsregelung eines Fahrzeugs

- ▶ Im Falle einer Störung verhält er sich anfangs wie ein P-Regler, d.h. die Störung wird durch die Verstärkung des P-Anteils ausgeglichen
- ▶ Nach einer Zeit überwiegt das I-Verhalten



PI-Regler mit PT1-Strecke

- Die Sprungantwort zeigt, dass der PI-Regler ein präzises Regelverhalten aufweist (*Vorteil*), jedoch zu Schwingungen neigt (*Nachteil*).



PI-Regler - Frequenzgang und Bode Diagramm

- ▶ Frequenzgang:

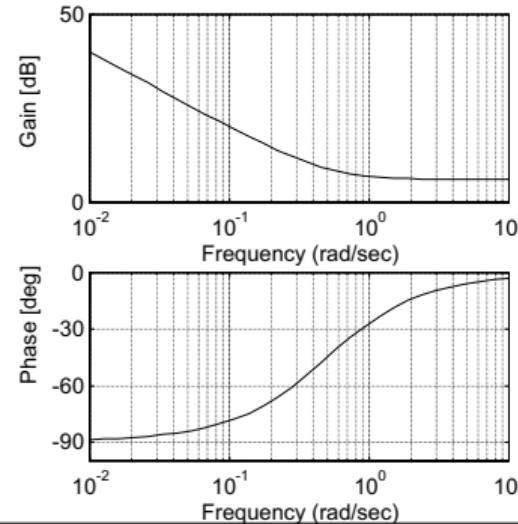
$$R(j\omega) = K_P \frac{j\omega T_n + 1}{j\omega T_n}$$

- ▶ Mit der Nachstellzeit

$$T_n = \frac{K_P}{K_I}$$

PI-Regler - Frequenzgang und Bode Diagramm

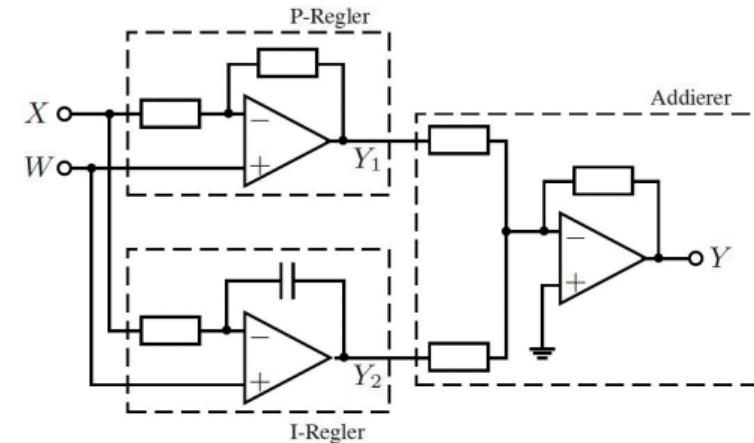
- ▶ PI-Regler senkt in einer Reihenschaltung mit der Strecke den Amplitudengang mit steigender Kreisfrequenz ab
- ▶ Ist daher in der Lage, eine konstante Störung vollständig auszuregeln



Umsetzung in der Elektronik mittels Operationsverstärker

Anwendungen:

- ▶ in komplex vermaschten Systemen
- ▶ Signalübertragung mit kleinen Verzögerungen und über große Entfernungen



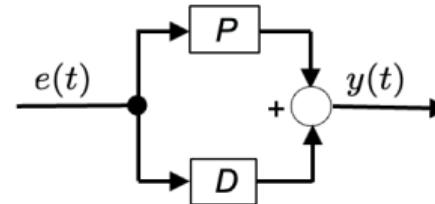
PD-Regler

Realisierung eines PD-Reglers

- Die Parallelschaltung von P- und D-Glied ergibt den PD-Regler mit der Übertragungsfunktion:

$$R(s) = K_P + K_D \cdot s$$

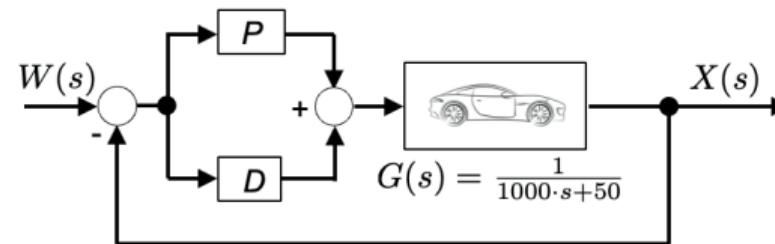
- Regler ist in dieser Form gerätetechnisch ebenfalls **nicht** realisierbar



PD-Regler mit PT1-Strecke

Beispiel: Längsregelung eines Fahrzeugs

- ▶ In der Lage auf Störungen sehr schnell zu reagieren, aufgrund der hohen Verstärkung
- ▶ Messrauschen führt allerdings zu extremen Ausschlägen der Stellgröße



PD-Regler - Frequenzgang und Bode Diagramm

- ▶ Frequenzgang:

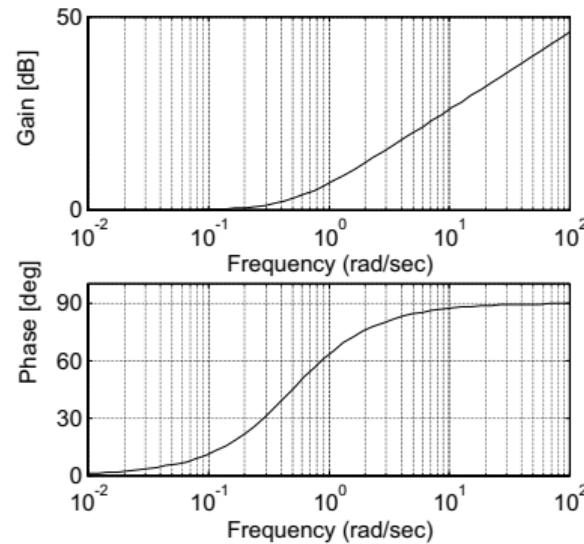
$$R(j\omega) = K_P (1 + j\omega T_v)$$

- ▶ Mit der Nachstellzeit

$$T_v = \frac{K_D}{K_P}$$

PD-Regler - Frequenzgang und Bode Diagramm

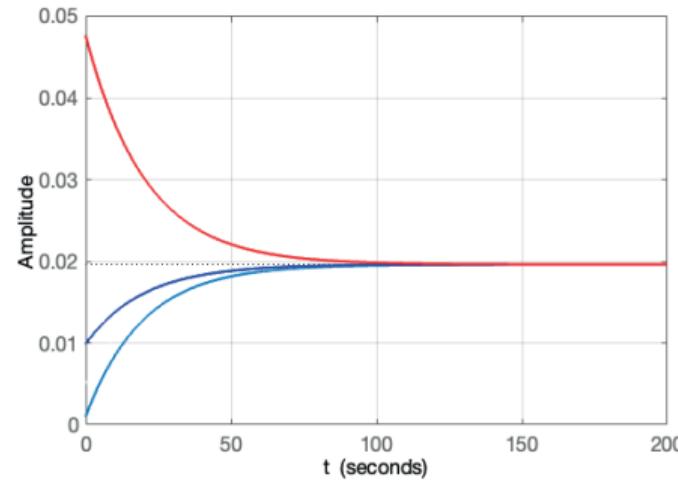
- Der PD-Regler erhöht in einer Reihenschaltung mit der Strecke den Amplitudengang mit steigender Kreisfrequenz.



PD-Regler zur Regelung einer PT1-Strecke

Beispiel: Längsregelung eines Fahrzeugs - das Ergebnis

- ▶ Sprungantwort für verschiedene K_P - und K_D -Werte



PD-Regler zur Regelung einer PT1-Strecke

Beispiel: Längsregelung eines Fahrzeugs - Live-Demo

```
%Optimierung des Reglers

figure(2)
K_p = 20
K_i = 0
K_d = 30
G_PID = pid(K_p, K_i, K_d);
sys_FdBack_P = feedback(G_PID*sys_strecke, H);

step(sys_FdBack_P)
grid on
hold on
xlabel('t ','FontSize',13)
ylabel('Amplitude','FontSize',13)
title('Sprungantwort','FontSize',13)
set(gca,'FontSize',13);
```

Vor- und Nachteile des PD-Reglers

Vorteile:

- ▶ sehr schneller Regler
- ▶ größere Regeldifferenz wird vermieden

Nachteile:

- ▶ bleibende Regeldifferenz tritt auf
- ▶ Messrauschen führt zu extremen Ausschlägen der Stellgröße
- ▶ gerätetechnisch nicht realisierbar

PD-T1-Regler

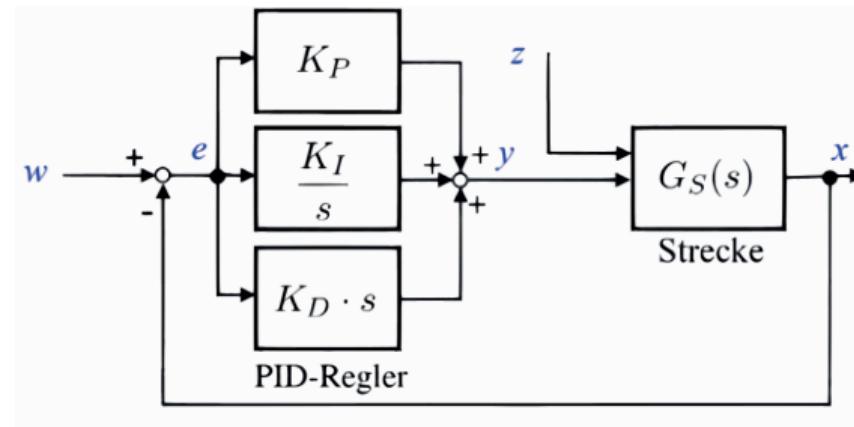
„nachgebende PD-Regler“:

- ▶ D-Glied ist mit einem Verzögerungsglied 1. Ordnung in Reihenschaltung verknüpft
- ▶ DT1-Glied \iff Differenzierer mit Verzögerung 1. Ordnung



Idealer PID-Regler

- Der PID-Regler vereinigt die Eigenschaften von P-, PI- und PD-Regler
 - reagiert sehr schnell
 - ist sehr genau (verschwindende Regelabweichung)



Idealer PID-Regler

Realisierung eines PD-Reglers

- Die Parallelschaltung von P-, I- und D-Glied ergibt den PID-Regler mit der Übertragungsfunktion:

$$R(s) = K_P \left(1 + \frac{1}{T_n s} + T_v s \right)$$

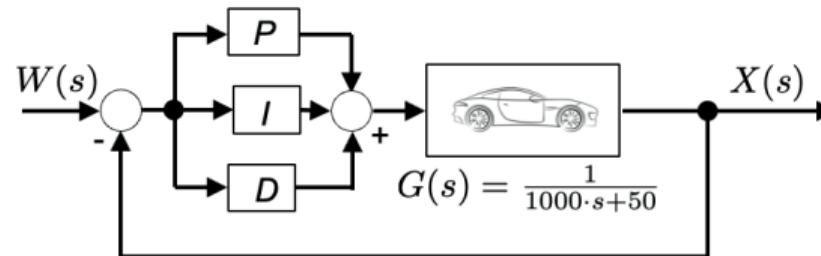
- Mit den Einstellwerten

$$T_v = \frac{K_D}{K_P} \quad \text{und} \quad T_n = \frac{K_P}{K_I}$$

PID-Regler mit PT1-Strecke

Beispiel: Längsregelung eines Fahrzeugs - vereinigt alle Formen der Reaktion von der

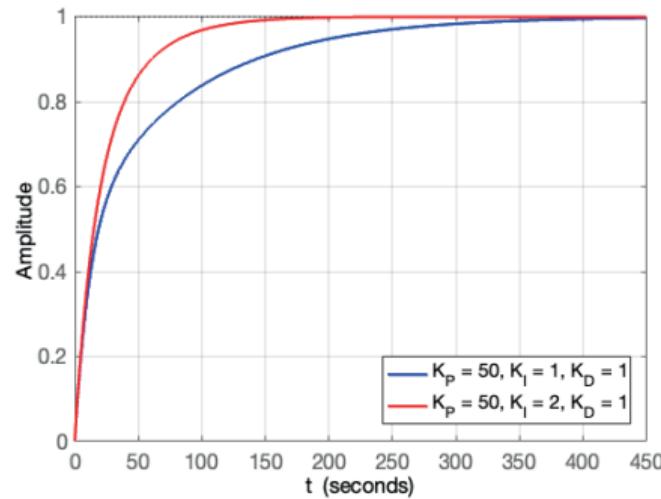
- ▶ einfühlsamen (verzögerten) Differentiation mit Trenderkennung
- ▶ über die direkte Multiplikation in Abhängigkeit zur Abweichung
- ▶ bis zur nachhaltigen Integration (= inverse Funktion zur Differentiation)



PID-Regler zur Regelung einer PT1-Strecke

Beispiel: Längsregelung eines Fahrzeugs - das Ergebnis

- ▶ Sprungantwort für verschiedene K_P -, K_I - und K_D -Werte



PID-Regler - Frequenzgang und Bode Diagramm

- ▶ Frequenzgang:

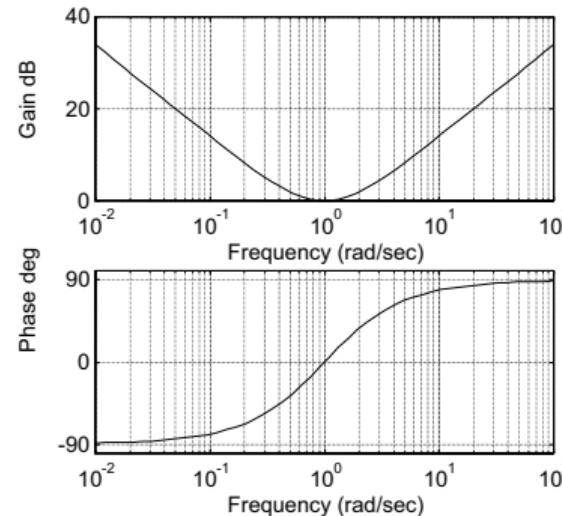
$$R(j\omega) = K_p \left(1 - j \frac{1}{\omega T_n} + j\omega T_v \right)$$

- ▶ Mit den Einstellwerten

$$T_v = \frac{K_D}{K_P} \quad \text{und} \quad T_n = \frac{K_P}{K_I}$$

PID-Regler - Frequenzgang und Bode Diagramm

- ▶ Anhebung der Verstärkung im Bereich größer und kleiner Frequenzen
- ▶ Mit den Parametern T_v und T_n ist die Verstärkung in diesem Frequenzbereichen gezielt beeinflussbar Kreisfrequenz.



Vor- und Nachteile des PID-Reglers

Vorteile:

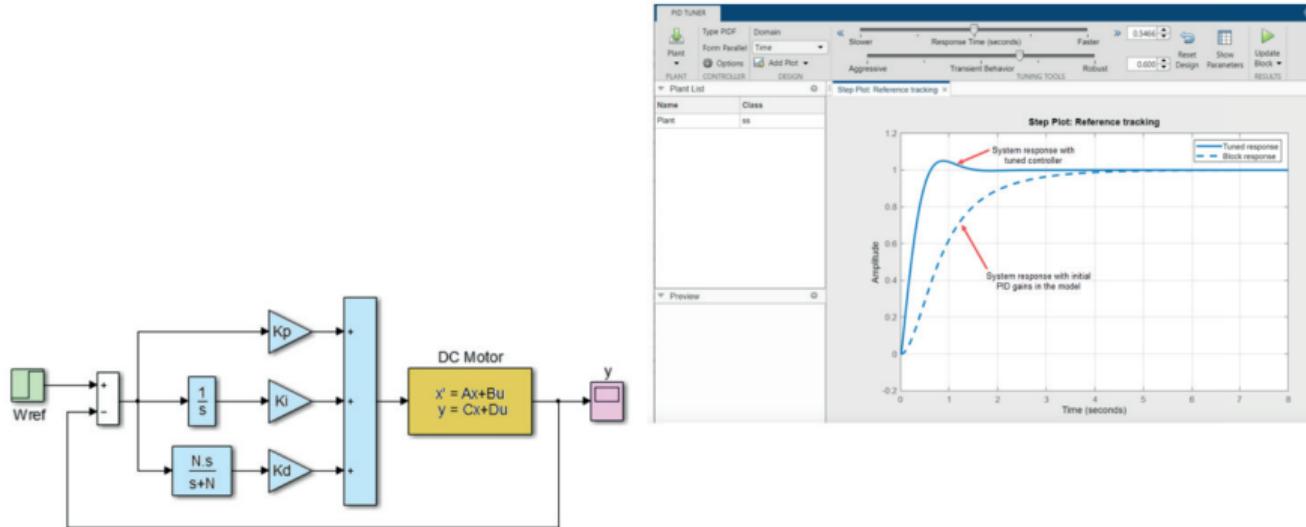
- ▶ sehr schneller Regler
- ▶ lässt keine bleibende Regeldifferenz zu
- ▶ erlaubt keine großen Regelabweichungen

Nachteile:

- ▶ Einstellung eines PID-Reglers erfordert einen großen **Zeitaufwand**

PID Regler mit Simulink

Automatisierung des Tuning-Prozesses



PID-T1-Regler

Realer PID-Regler:

- ▶ vereint die Verhaltensweisen der P- und I-Gliedes, sowie eines DT1-Gliedes als D-Anteil
- ▶ Übertragungsfunktion

$$G_R(s) = K_P + \frac{K_I}{s} + \frac{K_D s}{T_V s + 1}$$

Lernziele dieser Vorlesung

Nach dem Studium dieses Abschnitts können Sie ...

1. Einfache Regelstrecken analysieren und mit Hilfe von Übertragungsfunktion und Frequenzgang beschreiben
2. Die wichtigen Unterscheidungsmerkmale und Kennwerte von Regelstrecken bestimmen
3. Komplexe Regelstrecken, bestehend aus einer Kette von unbekannten Einzelsystemen oder -strecken analysieren und beschreiben

Fragen zur Selbstkontrolle

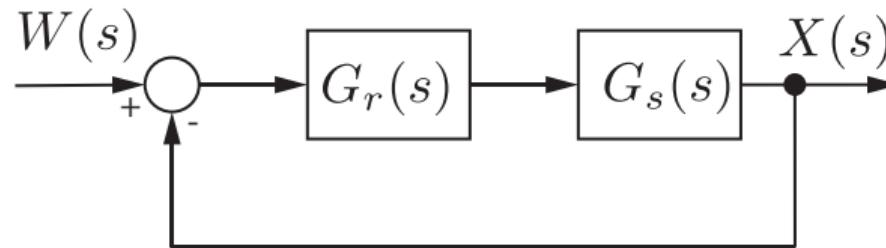
1. Wird ein reiner D-Regler häufig zur Regelung von Strecken eingesetzt?
2. Erklären Sie die Wirkungsweise eines PI-Reglers!
3. Welchen Vorteil besitzt der PI-Regler gegenüber dem I-Regler?
4. Welche Nachteile hat ein PID-Regler im Vergleich zum PI-Regler?
5. Was bedeutet die Reihenschaltung zweier Übertragungsglieder im gemeinsamen Bode-Diagramm?



Übungsaufgabe 7.1.1

Es sei ein Regelkreis mit IT₁-Regelstrecke und Einheitsrückführung wie unten dargestellt gegeben. Die Führungsübertragungsfunktion des Regelkreises sei zu bestimmen. Welches Verhalten weist der Regelkreis auf?

$$G_r(s) = K_{PR} \quad \text{und} \quad G_s(s) = \frac{1}{s \cdot (s + 2)}.$$



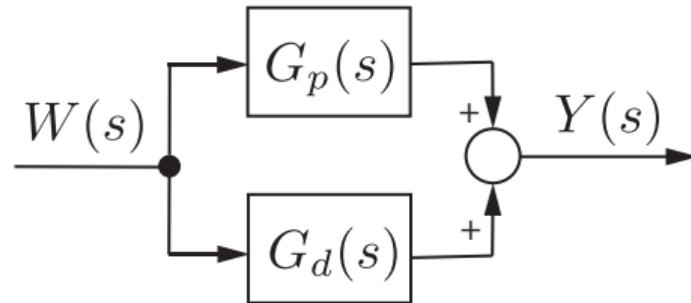
Übungsaufgabe 7.1.2

Der P-Beiwert K_{PR} des Reglers ist so zu bestimmen, dass der Dämpfungsgrad des Regelkreises dem Wert $D = 0,5$ entspricht.

Übungsaufgabe 7.2

Der folgende Signalflussplan veranschaulicht eine Methode zur Modellierung eines realen PD-Reglers. Berechnen Sie die Sprungantwort des Systems, wenn das Eingangssignal eine Sprungfunktion mit $w(t) = a_0 \cdot \sigma$ ist, wobei:

$$G_p(s) = K_P \quad \text{und} \quad G_d(s) = \frac{K_D s}{1 + sT_1}.$$



Übungsaufgabe 7.3

Das PN-Diagramm zeigt die Pol-Nullstellen-Verteilung einer Regelstrecke $G_s(s)$, die mit einem idealen P-Regler $G_r(s)$ gegengekoppelt geregelt wird. Die Strecke hat die Verstärkung $K_S = 0,3$. Wie lauten die Übertragungsfunktionen der Strecke und des Reglers?

