

## 1. Die Anstiegsantwort (Zeitverhalten)

Das PD-Verhalten ergibt sich aus der Überlagerung (Addition) von P- und D-Verhalten.

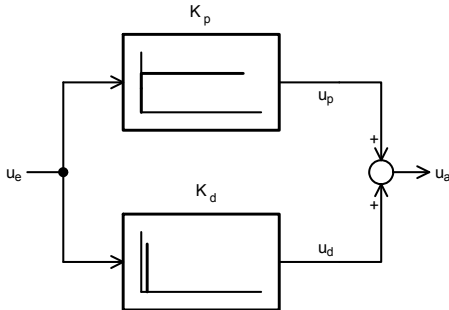


Abb. 1.1: Der PD-Regler

Die Ausgangsspannung  $u_a$  ist die Summe aus den Teilspannungen  $u_p$  und  $u_d$ .

Bei einem konstanten Sprung am Eingang ist  $U_p = U_e \cdot K_p$  und  $U_i = K_d \cdot \frac{\Delta U_e}{\Delta t}$ .

Damit ergibt sich:  $u_a = U_e \cdot K_p + K_d \cdot \frac{\Delta U_e}{\Delta t}$

An Hand der Anstiegsantwort definiert man die sogenannte Vorhaltzeit  $T_v$ .

Die Vorhaltzeit ist die Zeit, die vergehen muss, damit die Anstiegsantwort des P-Anteils den Wert erreicht, den der D-Anteil sofort hat.

Für diese Zeit gilt:  $U_p = U_d$

Das heißt:  $U_e \cdot K_p = K_d \cdot \frac{\Delta U_e}{\Delta t} = K_d \cdot \frac{U_e}{T_v}$

daraus folgt:  $K_p = \frac{K_d}{T_v}$

oder:  $T_v = \frac{K_d}{K_p}$  Die Einheit von  $T_v$  ist  $|T_v| = 1 \cdot s$ .

Oszillogramme:

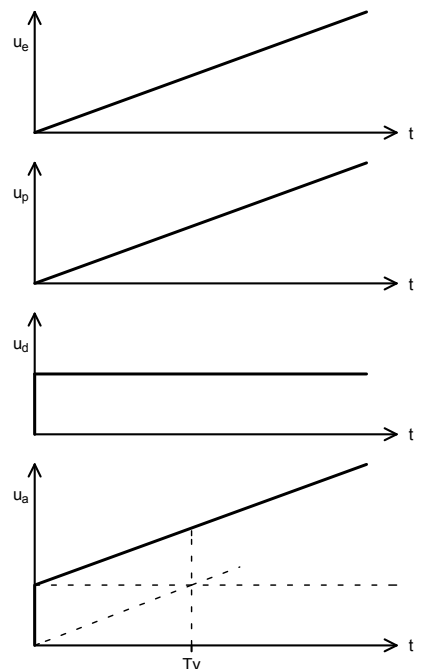


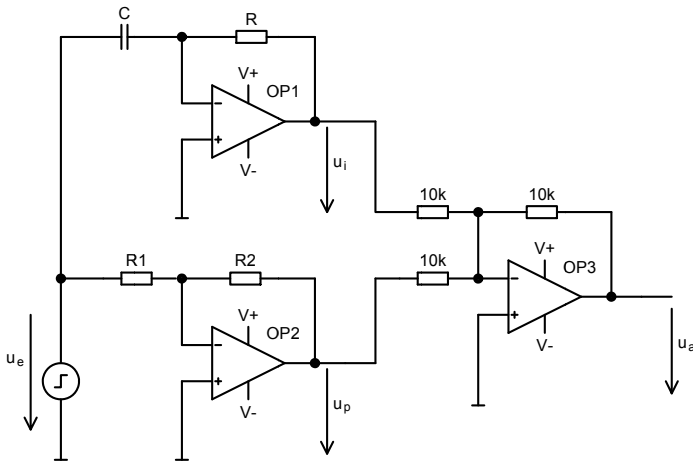
Abb. 1.2: Anstiegsantwort PD-Regler

Ein PD-Regelkreisglied wird vollständig beschrieben durch die Kennwerte  $K_p$  und  $K_d$  bzw.  $K_p$  und  $T_v$ !



Übung 1.1:

Gegeben ist die folgende Schaltung eines PD-Regelkreisgliedes:

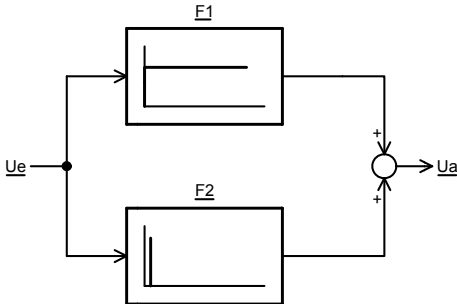


Gegeben:  $R_1=22\text{k}\Omega$ ;  $C=22\mu\text{F}$

- Berechnen Sie die erforderlichen Werte  $R$  und  $R_2$  für  $K_p=3$  und  $T_V=0,8\text{s}$ !
- Zeichnen Sie maßstäblich die Sprungantwort des Regler gemäß Abb. 1.2!

## 2. Der Frequenzgang

Bei einem PD-Regler überlagern sich P- und D-Anteil, somit auch die einzelnen Frequenzgänge.



Mit  $\underline{F}_1 = K_p$  und  $\underline{F}_2 = K_d \cdot j\omega$

ergibt sich für den gesamten Frequenzgang

$$\underline{F} = \underline{F}_1 + \underline{F}_2 = K_p + j\omega K_d$$

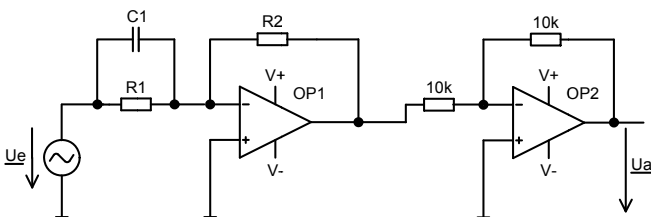
oder mit  $K_d = K_p \cdot T_v$

$$\underline{F} = K_p + K_p \cdot j\omega T_v = K_p \cdot (1 + j\omega \cdot T_v)$$



### Übung 2.1:

Weisen Sie durch allgemeine Berechnung des Frequenzganges nach, dass die folgende Schaltung PD-Verhalten aufweist und bestimmen Sie allgemein die Parameter  $K_p$ ,  $T_v$  und  $K_D$  des Regelkreisgliedes!



### Anleitung:

OP1 ist ein invertierender Verstärker.

Die Verstärkung ist  $\underline{V}_u = -\frac{\underline{Z}_2}{\underline{Z}_1}$  mit  $\underline{Z}_2 = R_2$  und  $\underline{Z}_1 = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + j\omega C_1} = \frac{R_1}{1 + j\omega \cdot R_1 \cdot C_1}$

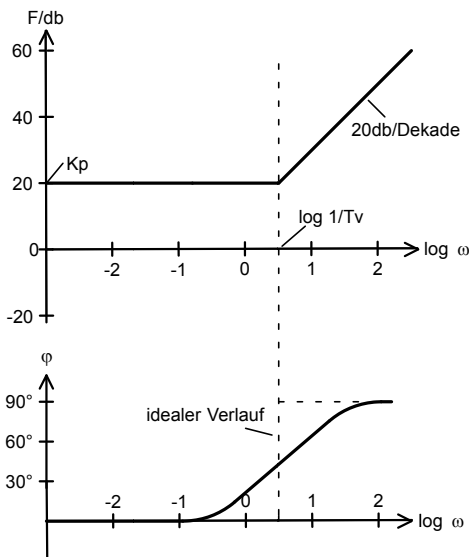
### 3. Das Bode-Diagramm

An Hand des Frequenzganges

$$\underline{F} = K_p + K_p \cdot j\omega T_v = K_p \cdot (1 + j\omega \cdot T_v)$$

lässt sich ablesen, dass für sehr kleine Frequenzen ( $\omega \rightarrow 0$ ) die Verstärkung gleich  $K_p$  wird und der Imaginäranteil verschwindend gering gegenüber dem Realanteil wird. Die Phasenverschiebung beträgt  $0^\circ$ . Für sehr hohe Frequenzen ( $\omega \rightarrow \infty$ ) wird die Verstärkung unendlich groß und die Phasenverschiebung geht gegen  $+90^\circ$ .

Der Amplitudengang lässt sich idealerweise durch zwei Geraden darstellen. Für Frequenzen unterhalb von  $\frac{1}{T_v}$  lässt sich der Amplitudengang durch eine Gerade darstellen, welche im Abstand  $K_p$  verläuft. Oberhalb dieser Frequenz ist der Amplitudengang eine Gerade, welche mit 20dB/Dekade ansteigt.



Übung 3.1:

Zeichnen Sie das Bode-Diagramm für die Schaltung nach Übung 1.1 !

### 4. I-T1-Strecke mit PD-Regler

Beispiel 4.1:

Gegeben ist das folgende Technologieschema einer Positionsregelung:

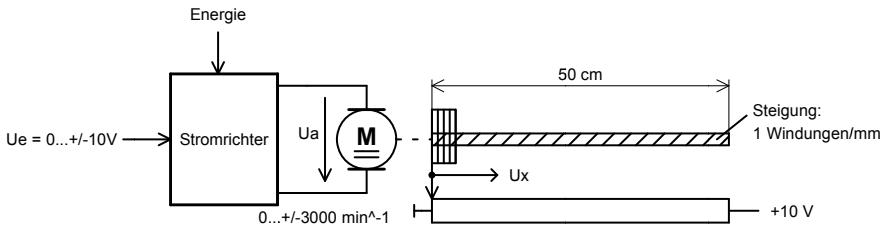


Abb. 4.1: Technologieschema einer Positionsregelung

Unter der vereinfachten Annahme, dass die Zeitverzögerung des Stromrichters vernachlässigt wird, zeigt das Verhalten der Motordrehzahl P-T1-Verhalten und der Schneckenantrieb I-Verhalten auf. Das Gesamtverhalten der Strecke kann also vereinfacht als eine Reihenschaltung bestehend aus einem P-T1-Glied mit einem I-Glied angesehen werden.

Das folgende Bild zeigt den Signalflussplan der Strecke mit einem PD-Regler.

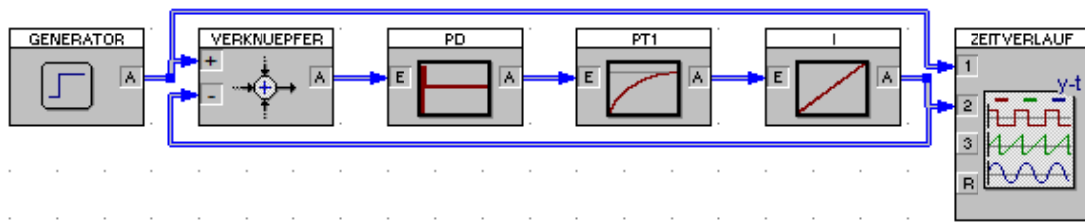


Abb. 4.2: Blockschaltbild I-T1-Strecke mit PD-Regler

Der Integrierbeiwert der Strecke lässt sich zu  $K_{IS} = 0,1s^{-1}$  berechnen.

Die Parameter der Strecke werden zu  $K_{PS}=1$  und  $T_{1S}=2s$  angenommen.

Prinzipiell lässt sich die Strecke mit einem reinen P-Regler (ohne D-Anteil) regeln. Abb. 4.3 zeigt die Sprungantwort des Systems mit einem P-Regler bei  $K_{PR}=5$ .

Auf Grund des I-Anteils in der Strecke entsteht keine bleibende Regelabweichung. Die Sprungantwort weist jedoch ein starkes Überschwingen auf.

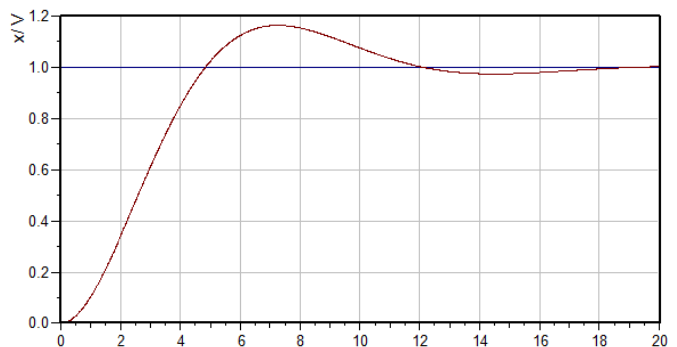


Abb. 4.3: I-T1-Strecke mit P-Regler

	Regelungstechnik	© Udo John
	PD-Regler	Seite 6 von 7

Der Regler bekommt nun einen zusätzlichen D-Anteil. Die Vorhaltezeit des PD-Reglers wird auf  $T_{VR}=T_{1s}=2s$  eingestellt. Die folgende Abbildung zeigt das Ergebnis für die Sprungantwort des Regelkreissystems bei  $K_{PR}=5$ .

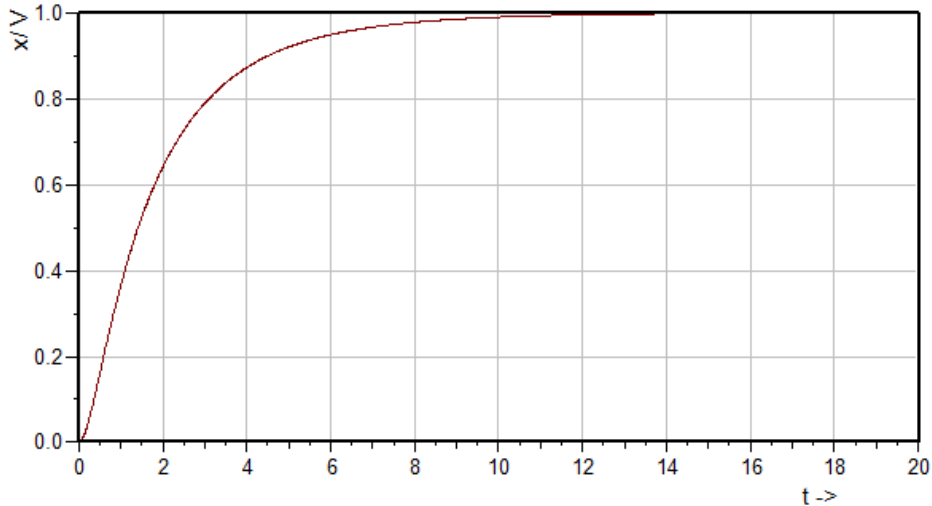


Abb. 4.4: I-T1-Strecke mit PD-Regler

Die Sprungantwort zeigt nun (näherungsweise<sup>1</sup>) P-T1-Verhalten auf. Die Streckenzeitkonstante wurde durch den D-Anteil des Reglers kompensiert.

Das ideale Verhalten lässt sich mit Hilfe der Berechnung des Frequenzganges für den geschlossenen Regelkreis nachweisen:

Die Führungsübertragungsfunktion ist  $\underline{F}_W = \frac{1}{1 + \frac{1}{\underline{E}_0}}$  mit  $\underline{E}_0 = \underline{E}_R \cdot \underline{E}_S$ .

Mit  $\underline{E}_R = K_{PR} \cdot (1 + j\omega T_{VR})$  und  $\underline{E}_S = \frac{K_{PS}}{1 + j\omega T_{1S}} \cdot \frac{K_{IS}}{j\omega}$

ist  $\underline{E}_0 = \frac{K_{PR} \cdot (1 + j\omega T_{VR}) \cdot K_{PS} \cdot K_{IS}}{(1 + j\omega T_{1S}) \cdot j\omega} = \frac{K_{PR} \cdot K_{PS} \cdot K_{IS}}{j\omega}$  bei  $T_{VR} = T_{1S}$

Dann ist:

$$\underline{F}_W = \frac{1}{1 + j\omega \frac{1}{K_{PR} \cdot K_{PS} \cdot K_{IS}}} = \frac{K_P^*}{1 + j\omega \cdot T_1^*}$$

Das ist P-T1-Verhalten mit  $K_P^* = 1$  und  $T_1^* = \frac{1}{K_{PR} \cdot K_{PS} \cdot K_{IS}}$

Wegen  $K_P^* = 1$  entsteht keine bleibende Regelabweichung. Die Zeitkonstante ist umso kleiner, je größer  $K_{PR}$  gewählt wird. Im vorliegenden Beispiel ist  $T_1^* = 2s$ .

<sup>1</sup> Ein ideales D-Verhalten lässt sich nach einer Sprungfunktion nicht simulieren. Praktischerweise verfügen PD- und PID-Regler über eine Verzugszeit.

	Regelungstechnik	© Udo John
	PD-Regler	Seite 7 von 7



#### Übung 4.1:

Eine Strecke mit I-T1-Verhalten soll mit einem PD-Regler geregelt werden.

Streckenparameter:  $K_{PS}=4$ ,  $T_{1S}=0,5s$ ,  $K_{IS}=0,2 \cdot s^{-1}$

Reglerparameter:  $K_{PR}=3$ ,  $T_{VR}=T_{1S}=0,5s$

- a) Entwickeln und dimensionieren Sie eine Operationsverstärker-Schaltung des Reglers!
- b) Zeichnen Sie den Signalflussplan des Regelkreissystems!
- c) Weisen Sie durch Berechnung der komplexen Führungsübertragungsfunktion nach, dass das Regelkreissystem P-T1-Verhalten aufweist.
- d) Zeichnen Sie maßstäblich die Sprungantwort des Systems für einen Sprung der Führungsgröße von 0 auf 1V!
- e) Überprüfen Sie das Ergebnis nach Aufgabe d) durch eine Simulation mit BORIS!