



h_da

PROJEKTARBEIT

BODE-AIDED-DESIGN EINER TEMPERATUR UND FÜLLSTANDSREGELUNG

Betreuer: Prof. Dr.-Ing. S. Zacher

Studenten: Pascal Aigner, Manolo Alves Zipf, Alexander Schaffner

h_da

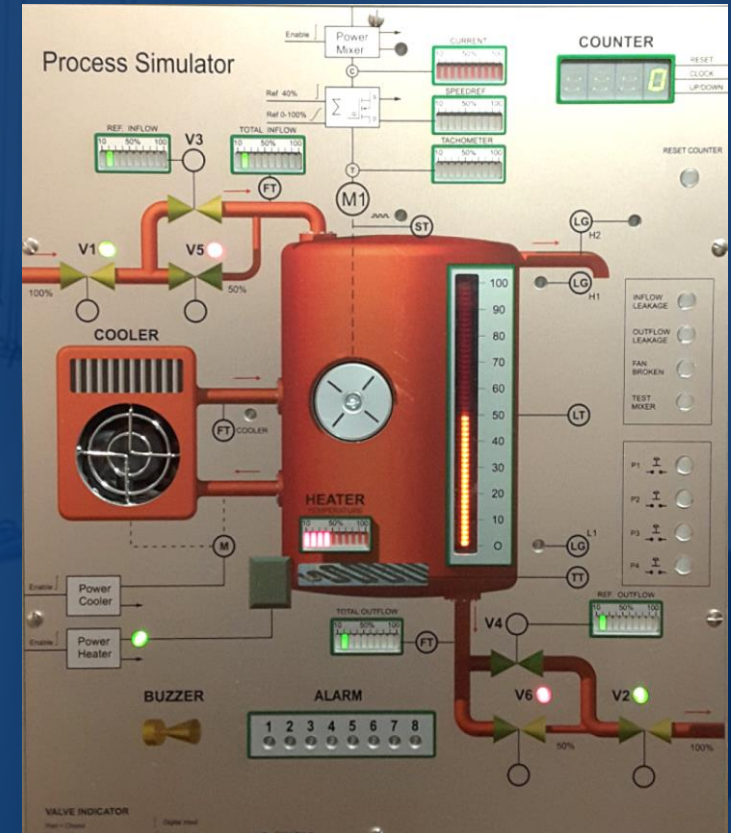
Inhaltsverzeichnis

1. Aufgabenstellung
2. Zeitplan
3. Risikoanalyse
4. Theorie
5. Bode-Aided-Design einer Temperaturregelung
6. Bode-Aided-Design der Füllstandregelung einer LKW-Abfüllanlage

Aufgabenstellung

Bode-Aided-Design einer Temperaturregelung

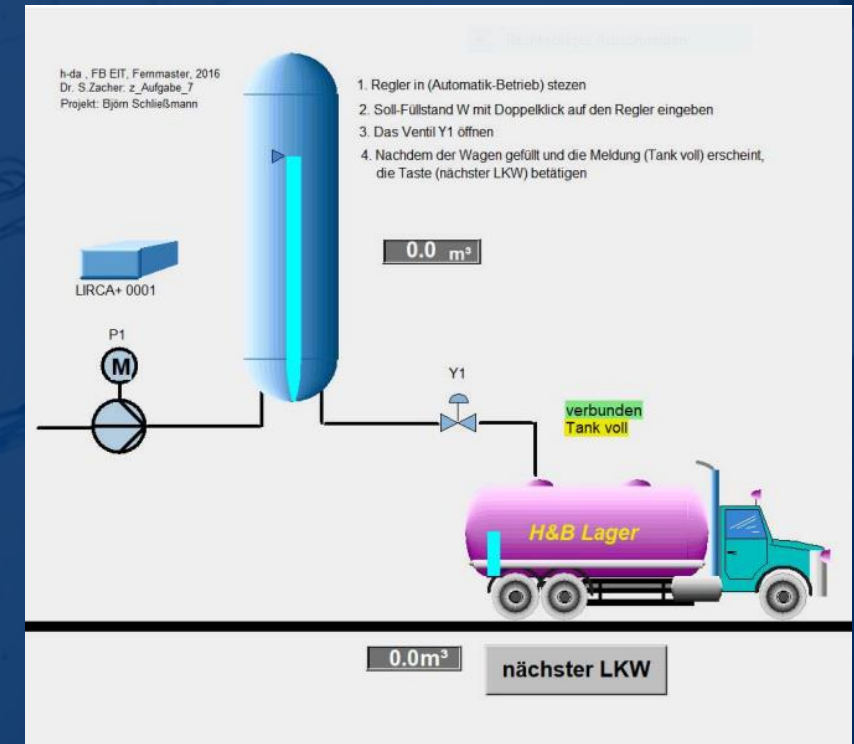
- Oslo-Hardware-Modell als Vorlage
- Entwurf eines PI-Reglers mittels BAD
- Simulation des PI-Reglers mit Matlab/Simulink



Aufgabenstellung

Bode-Aided-Design der Füllstandregelung einer LKW-Abfüllanlage

- Projektarbeit „Tank und LKW mit digital Anzeigen“ als Vorlage
- Entwurf eines Reglers mittels Standardverfahren
- Entwurf eines Reglers mittels BAD
- Vergleich der beiden Regler



Theorie

Drei-Bode-Plots Verfahren

- Reglereinstellung durch Analyse von drei Bode Plots in einem Diagramm
 - Regelstrecke $G_S(s)$
 - Amplitudengang: amplituden-symmetrischer Regler $G_{asR}(s)$
 - Phasengang: phasen-symmetrischer Regler $G_{Rphs}(s)$
- Stabilitätskriterium:
 - Regelkreis wird stabil wenn der Phasengang von $G_{Rphs}(s)$ am Schnittpunkt der Amplitudengänge unterhalb des Phasengangs der Regelstrecke $G_S(s)$ liegt

Theorie

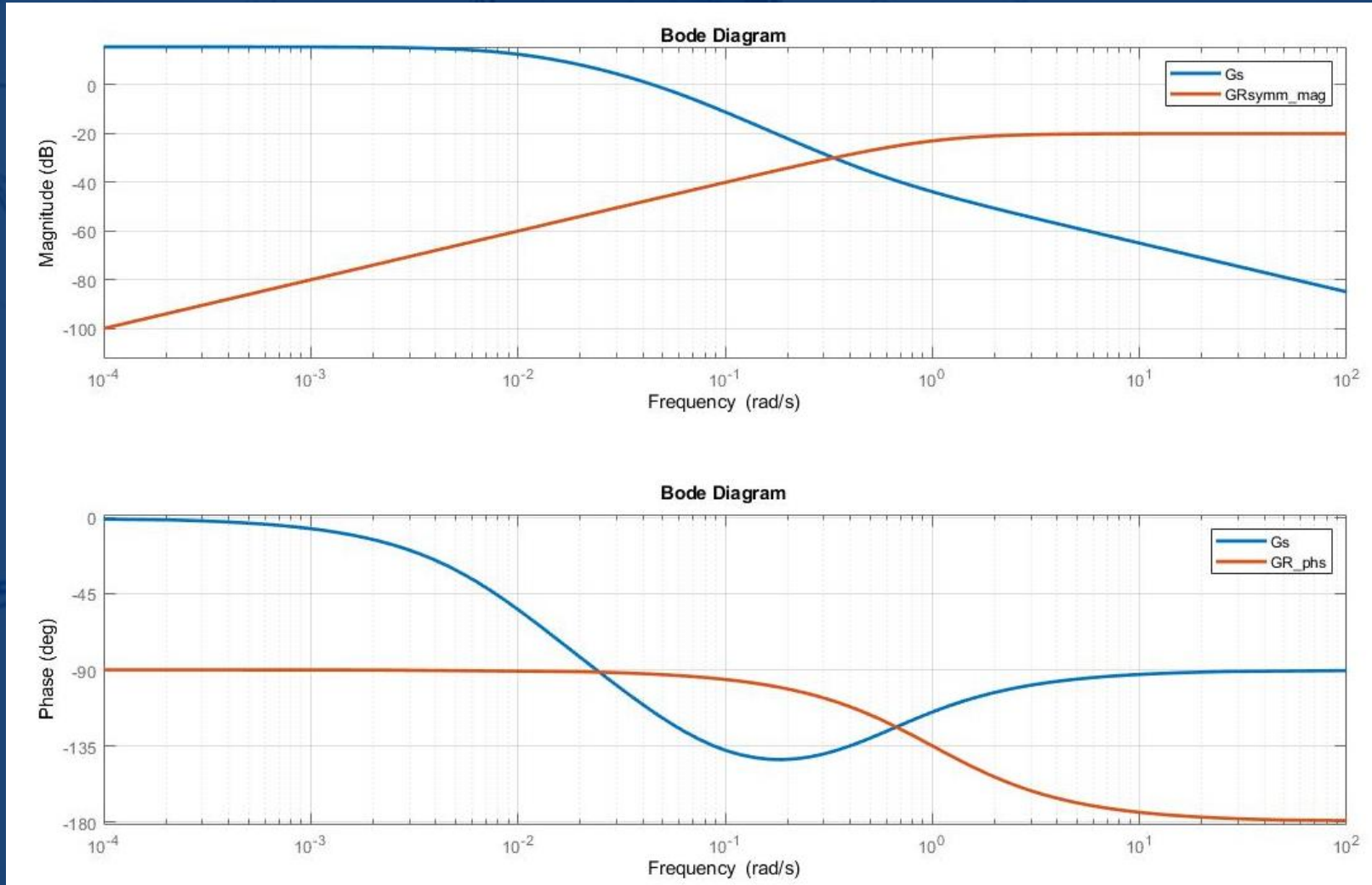
Drei-Bode-Plots Verfahren

- Regelstrecke aus *oslo_alone.sim*: $G_S(s) = \frac{0,143 \cdot 4,2}{20,5s+1} * \frac{18,5s+10}{96s+1}$
- Gewünschte Phasenreserve: $\varphi_{Rd} = 60^\circ$
- PI-Regler: $G_R(s) = K * (1 + \frac{1}{T_n * s})$ mit $K=10$ und $T_n=1$ (Werte frei gewählt)
- $G_{asR}(s) = \frac{1}{G_R(s)}$
- $G_{Rphs}(s) = \frac{1}{s^2 G_R(s)}$

h_da

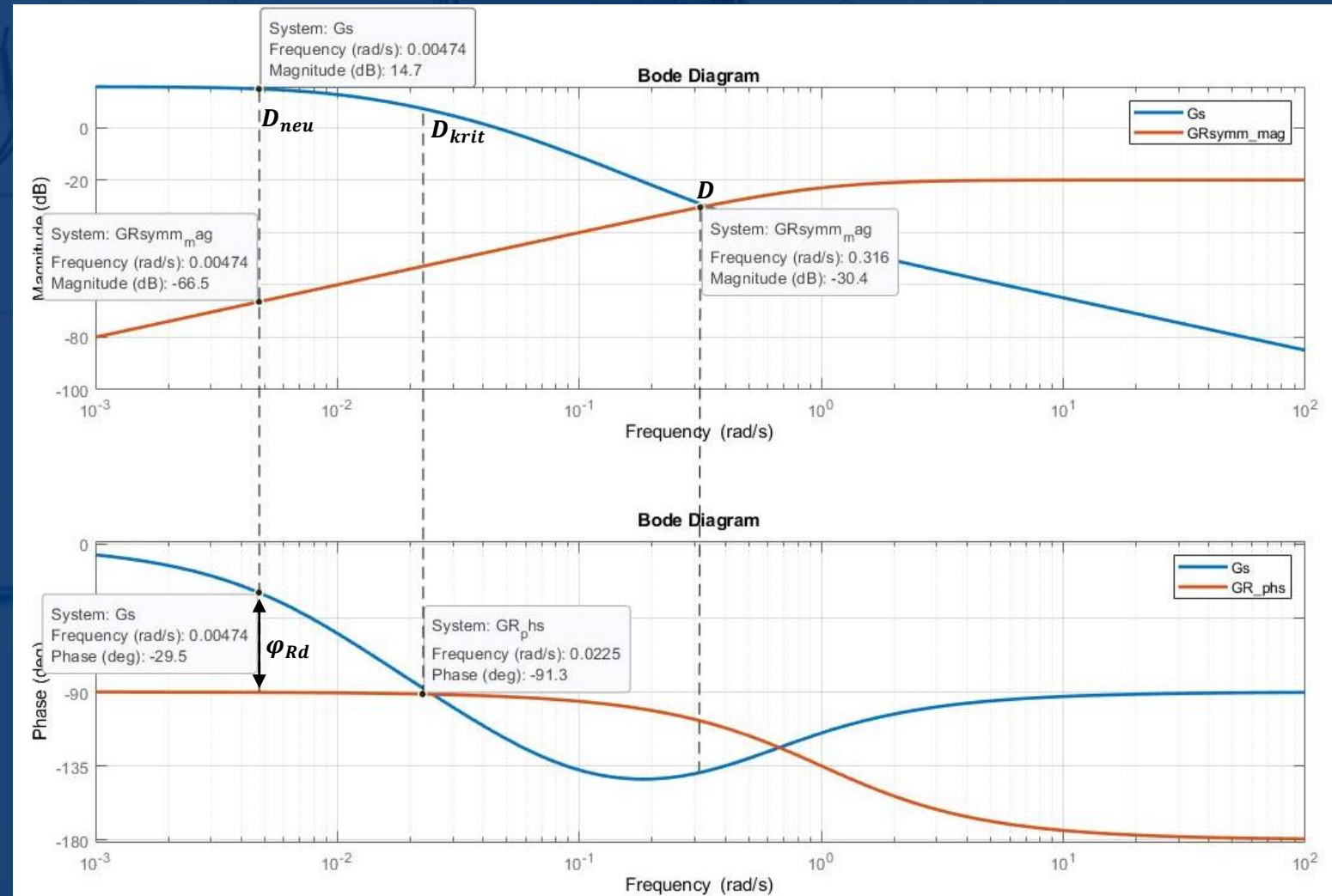
Theorie

Drei-Bode-Plots Verfahren



Theorie

Drei-Bode-Plots Verfahren



Theorie

Drei-Bode-Plots Verfahren

- Verschiebung des Amplitudengangs von D nach D_{neu}
 - Auslesen des Proportionalbeiwertes K_{PR} aus Bode-Plot

$$\Delta dB = 14,7dB - (-66,5)dB = 81,5dB$$

$$\Delta K = 10^{\frac{\Delta dB}{20}}$$

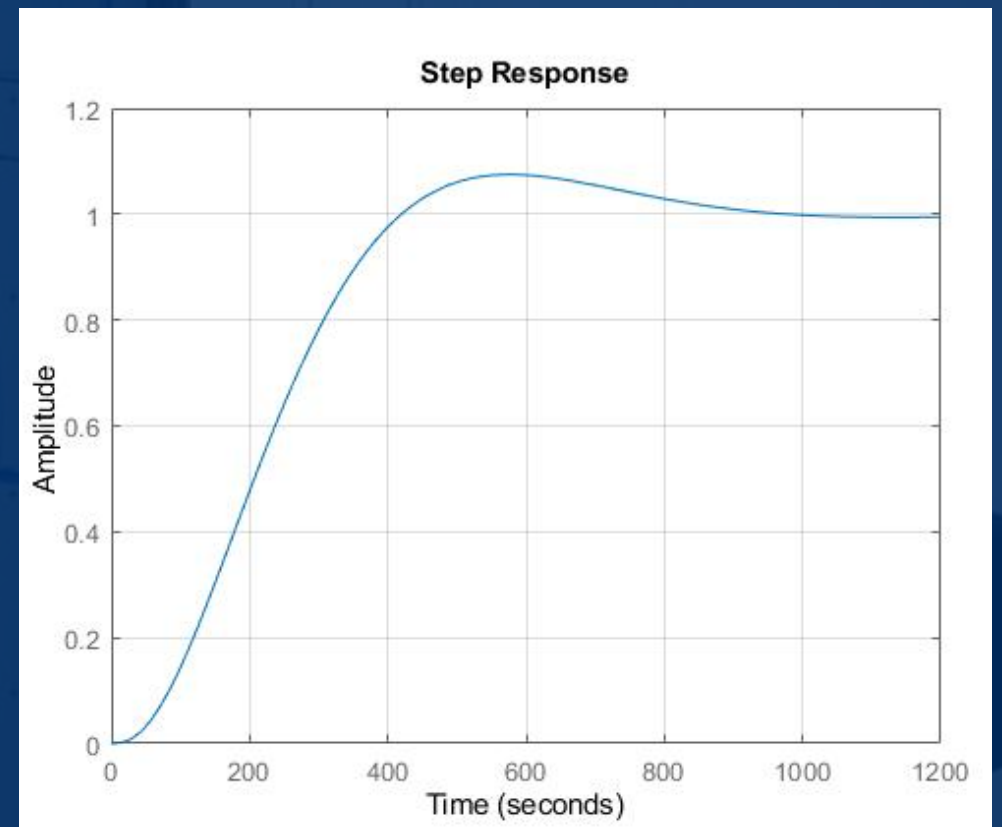
$$K_{PR} = \frac{K_{PR}}{\Delta K}$$

- Einsetzen von K_{PR} in $G_R(s)$

Theorie

Drei-Bode-Plots Verfahren

- Parameter des PI -Reglers:
 - $K_{PR} = 8,7096 * 10^{-4}$
 - $T_n = 1$



Theorie

Bode-Aided-Design - Allgemein

- Das Bode-Aided-Design ähnelt dem Zwei- und Drei-Bode-Plot-Verfahren
- Es besteht ein grundlegender Unterschied in der Vorgehensweise im Vergleich zu bekannten Standardverfahren im Frequenzbereich
- Der Regelparameterentwurf erfolgt direkt aus dem Bode-Diagramm der Strecke
- Namensgebung ist abgeleitet von CAD (Computer-aided-Design) → BAD

Theorie

Bode-Aided-Design - Vorgehen

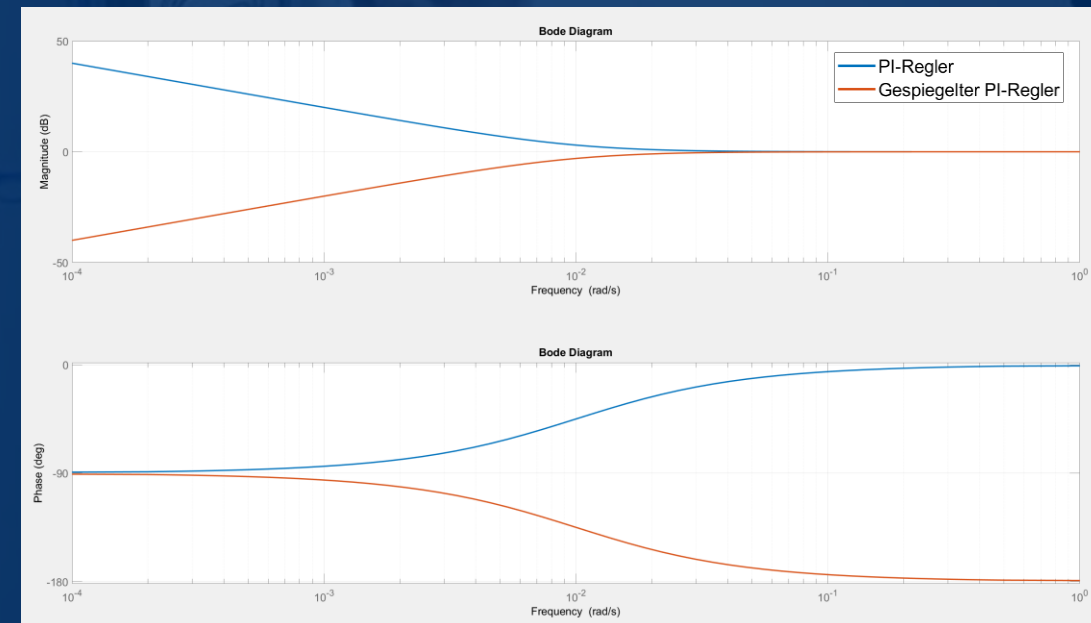
Allgemeine Vorgehensweise:

1. Ermittlung des Bode-Diagramms der Strecke

- Stabile Strecke
- Instabile Strecke

2. Spiegelung des Reglers im Bode-Diagramm

- Spiegelung des Amplitudengangs um die 0dB -Linie
- Spiegelung des Phasengangs um -90°



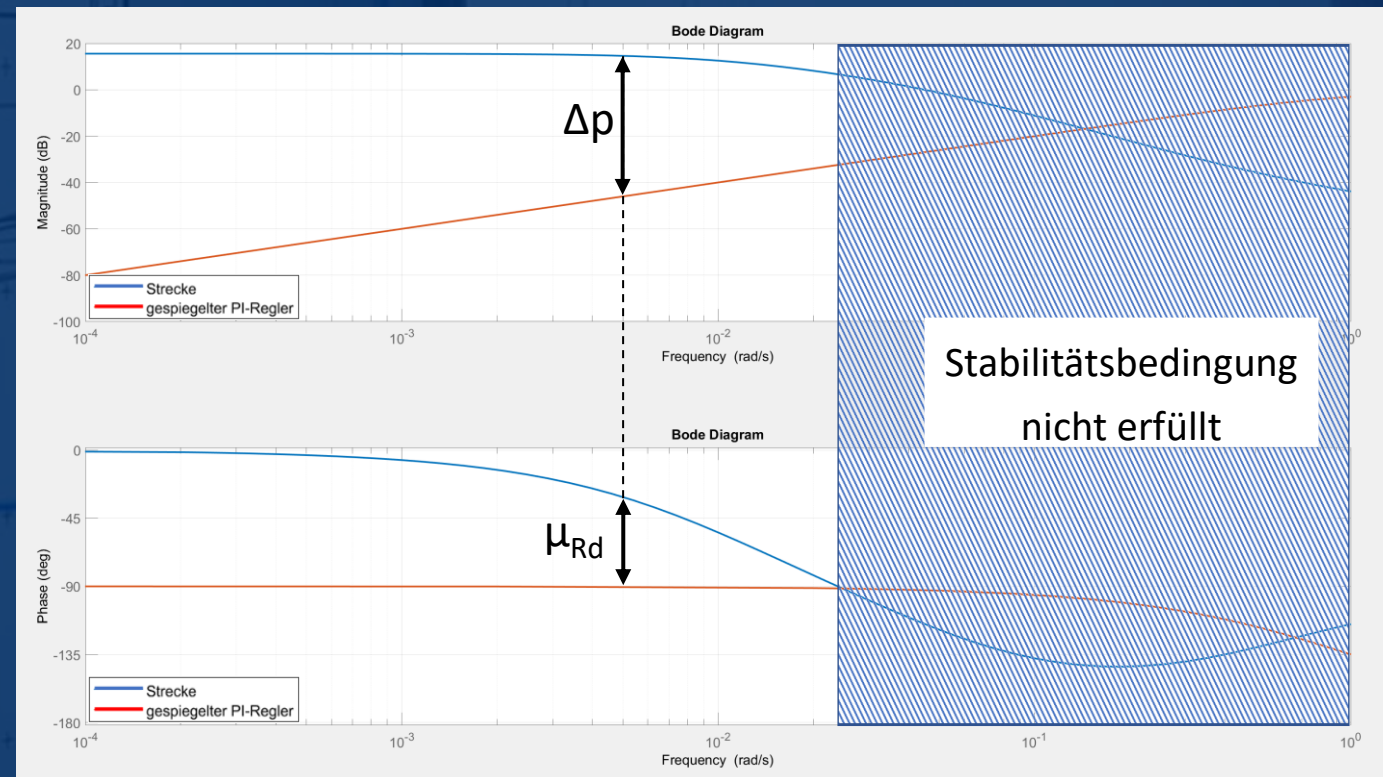
Theorie

Bode-Aided-Design - Vorgehen

3. Festlegen der Regelparameter unter Beachtung der Stabilitätsbedingung

- Festlegen der Zeitkonstanten ($\omega_n = 1/T_n$)
- Festlegen der Phasenreserve z.B. $\mu_{Rd} = 60^\circ$
- Verschieben des Amplitudengangs und Ermittlung von K_{PR}

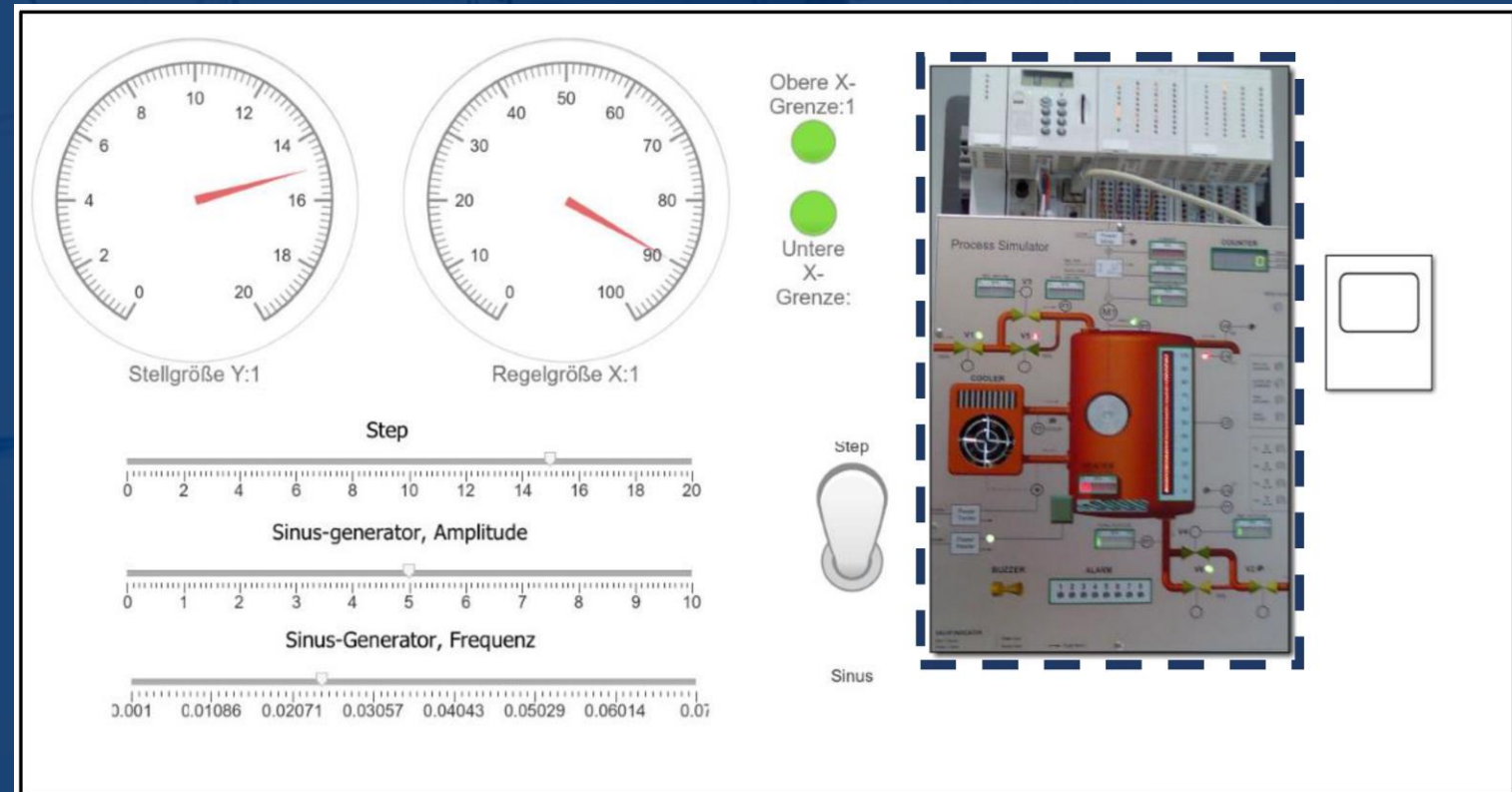
$$K_{PR} = 10^{-\frac{\Delta p}{20}}$$



4. Prüfen und Simulieren der Ergebnisse

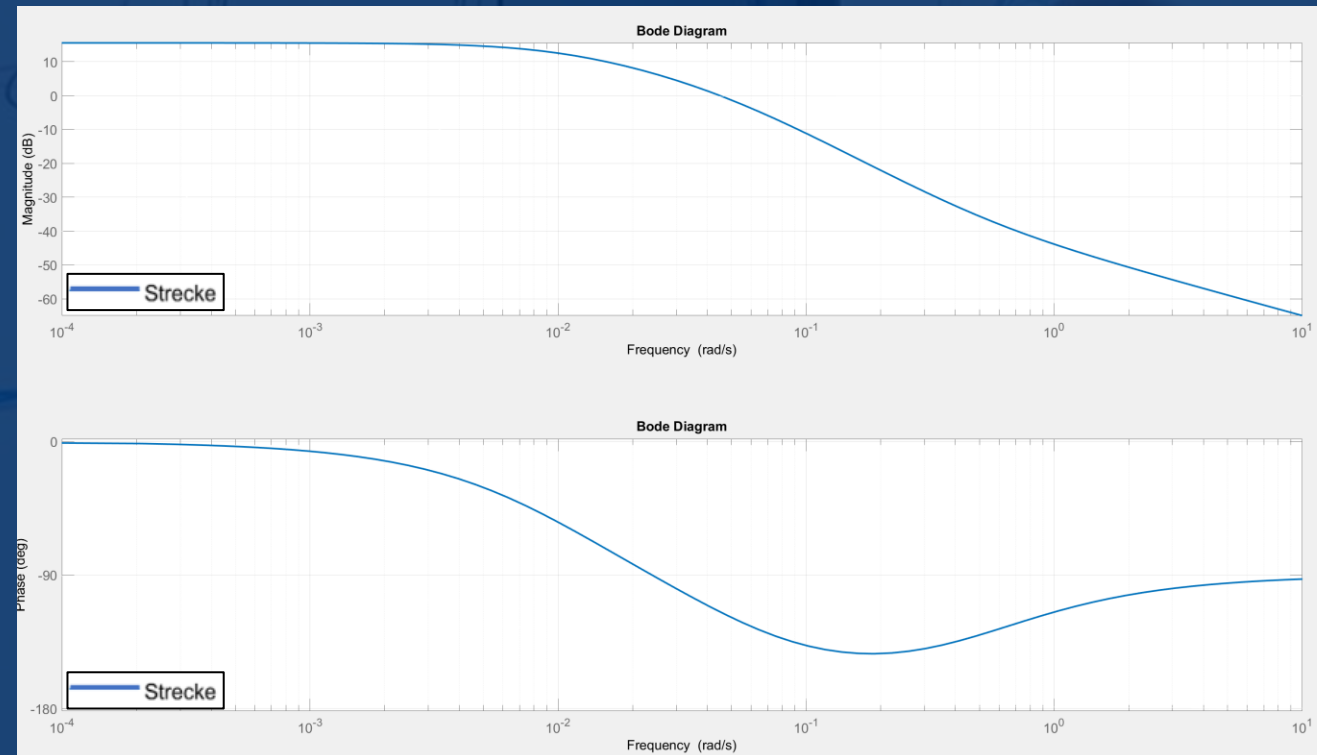
Bode-Aided-Design einer Temperaturregelung

- Digitaler Zwilling der Anlage
 - Simulink-Modell der Strecke



Bode-Aided-Design einer Temperaturregelung

- Ermittlung des Bodediagramms der Strecke
 - Experimentell
 - Übertragungsfunktion $G_s(s)$ der Strecke aus dem Simulink-File

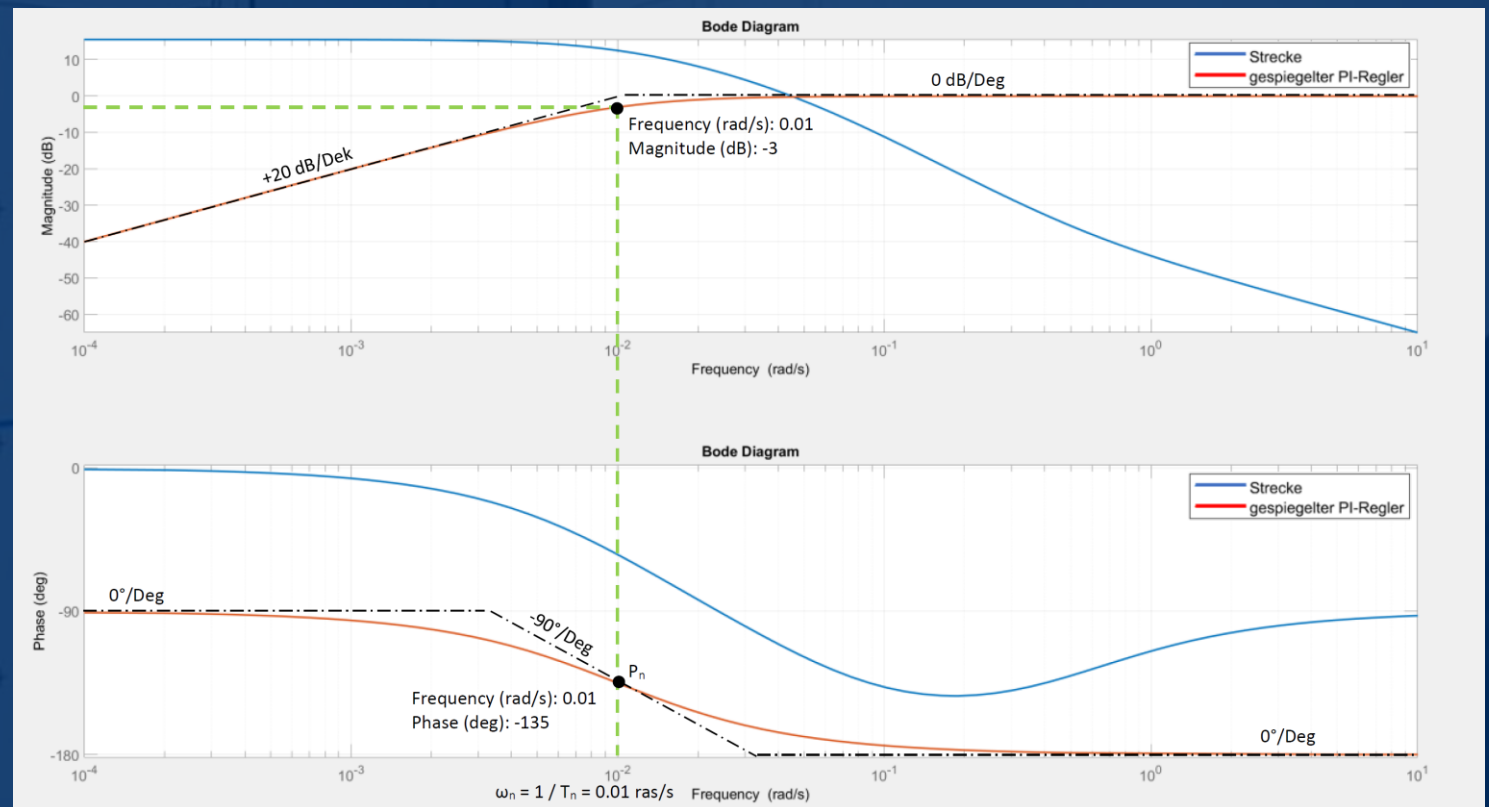


Bode-Aided-Design einer Temperaturregelung

- Einzeichnen des gespiegelten PI-Reglers

→ $T_n = 0.01$

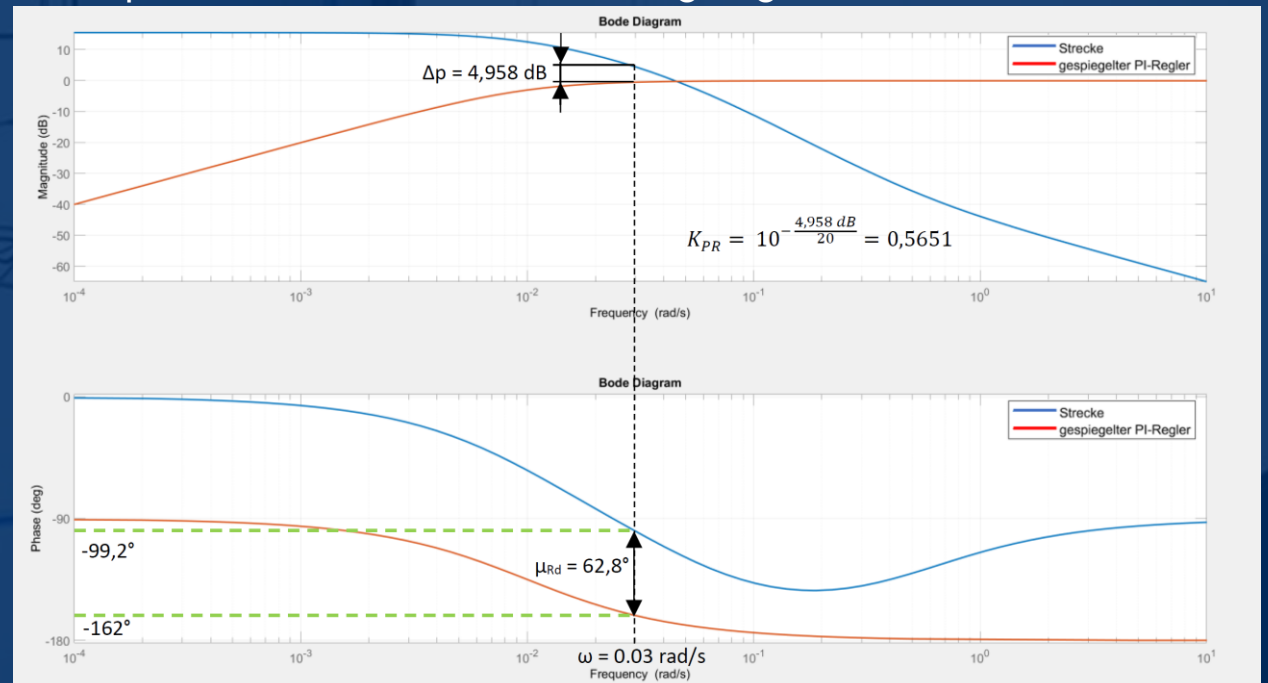
→ $K_{PR} = 1$



Bode-Aided-Design einer Temperaturregelung

- Festlegen der Phasenreserve und prüfen der Stabilitätsbedingung

$$\rightarrow \mu_{Rd} = 60^\circ$$



- Ermittelte Reglerparameter:

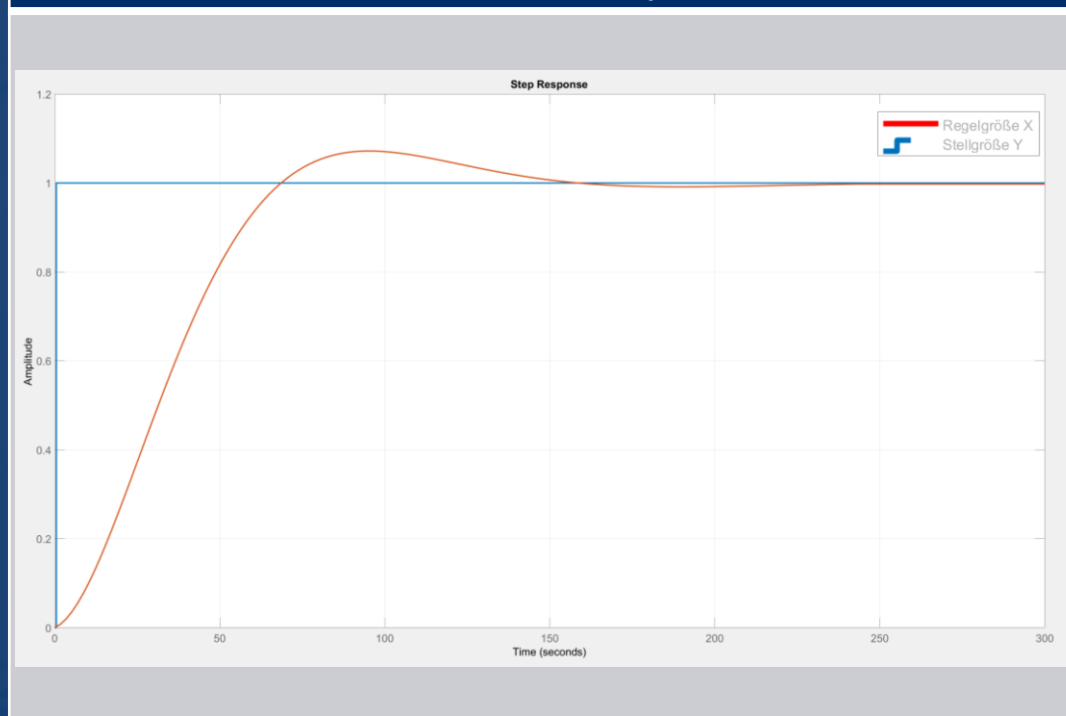
$$\rightarrow T_n = 0,01$$

$$\rightarrow K_{PR} = 0,5651$$

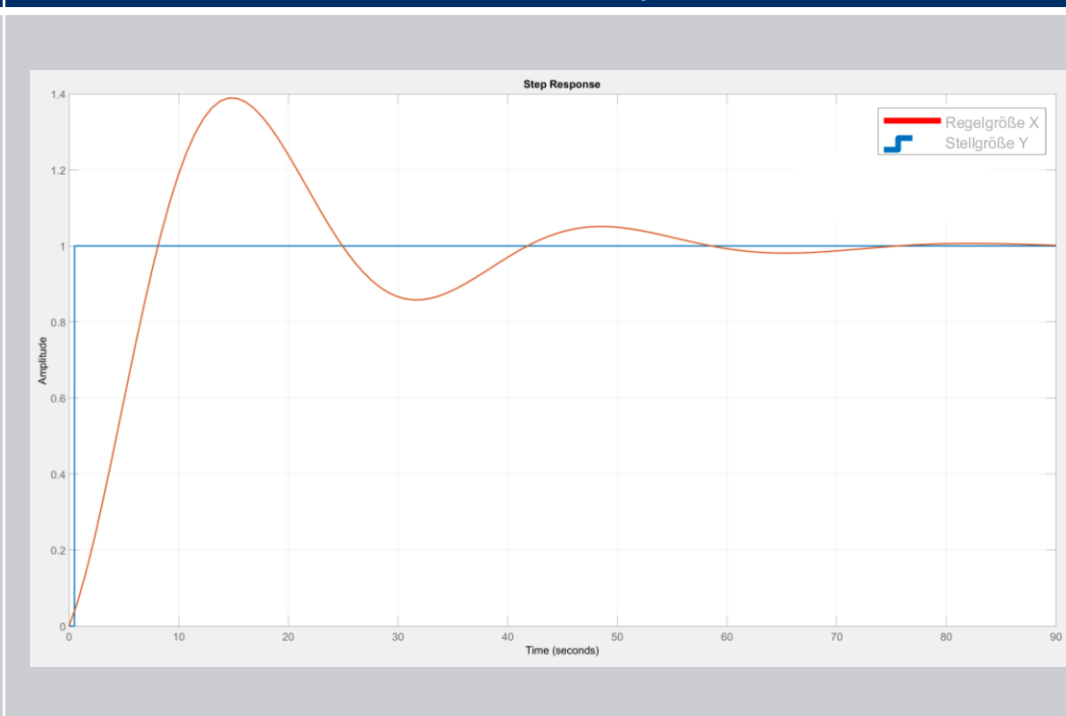
Bode-Aided-Design einer Temperaturregelung

- Ergebnisse / Sprungantwort des geschlossenen Regelkreises $G_W(s)$

Phasenreserve $\mu_{Rd} = 60^\circ$

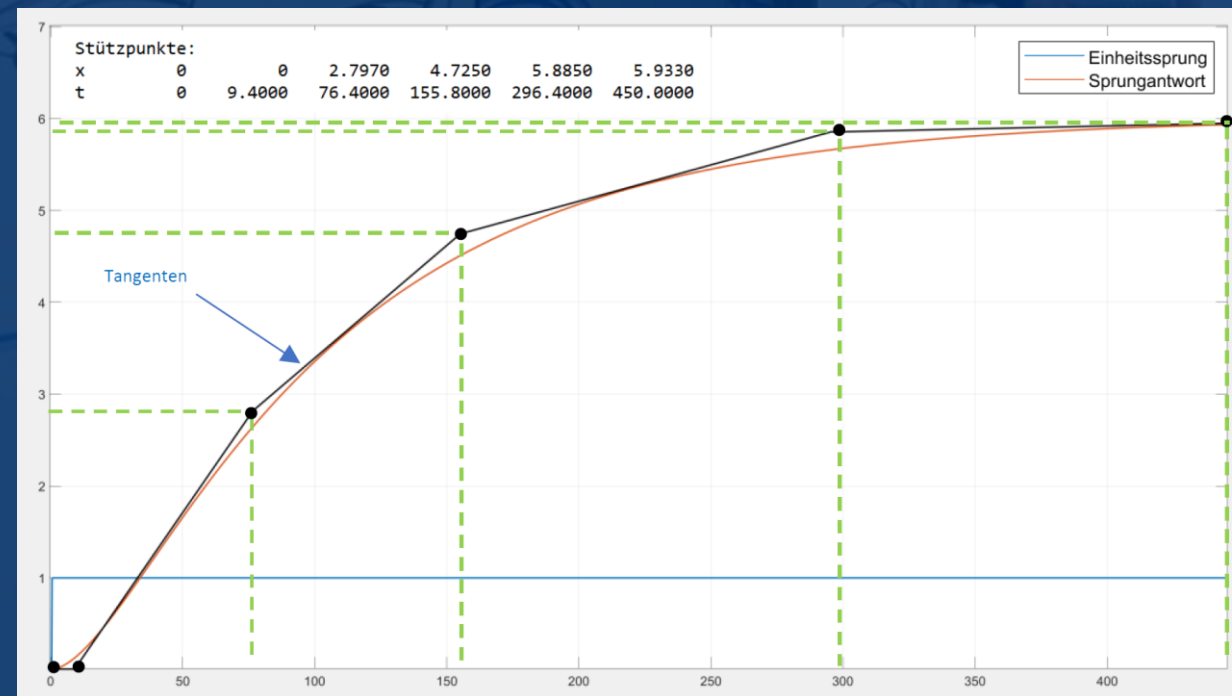


Phasenreserve $\mu_{Rd} = 30^\circ$



Bode-Aided-Design einer Temperaturregelung

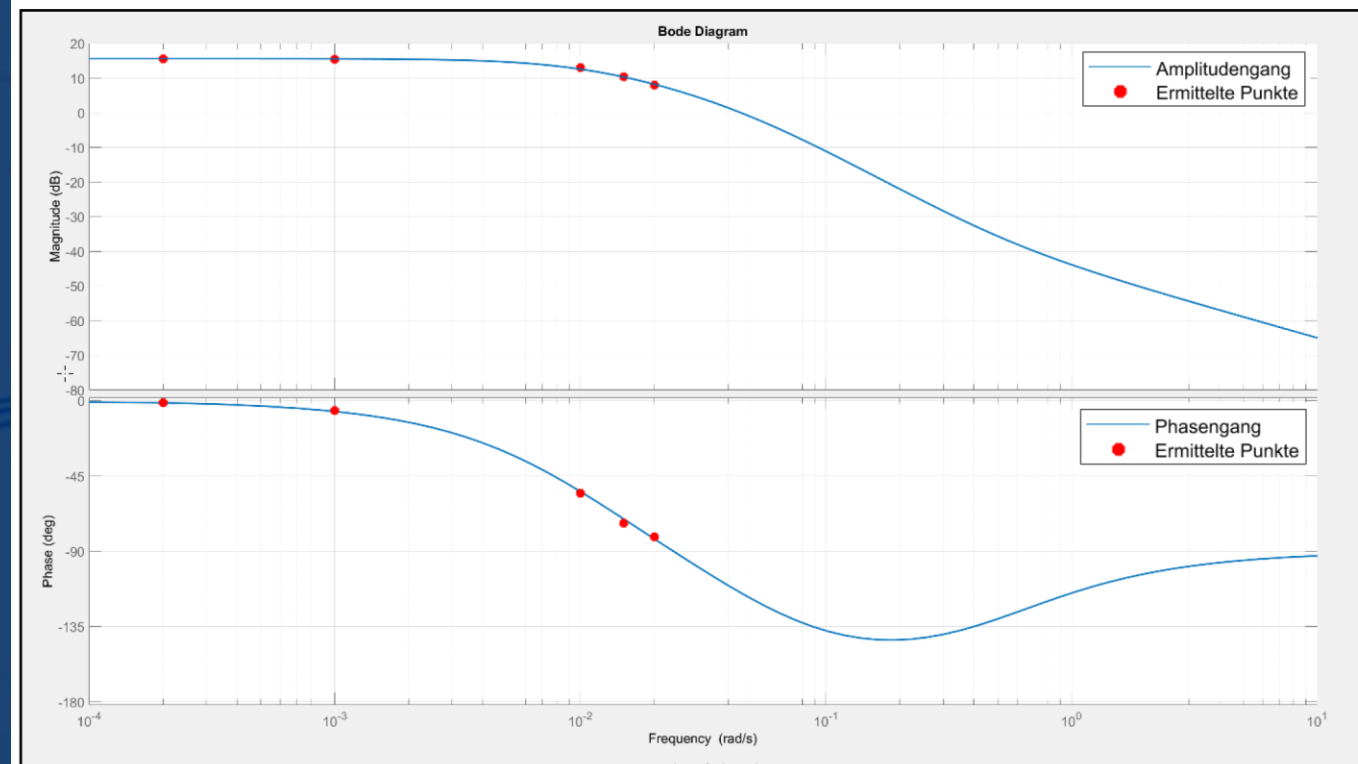
- Durchführung des BAD-Verfahrens mit jeweils einem Punkt der Strecke im Amplituden und Phasengang des Bode-Diagramms
- Die Ermittlung erfolgt mittels Einheitssprung am Streckeneingang



Bode-Aided-Design einer Temperaturregelung

- Auswertung und Erzeugung eines Bode-Diagramms

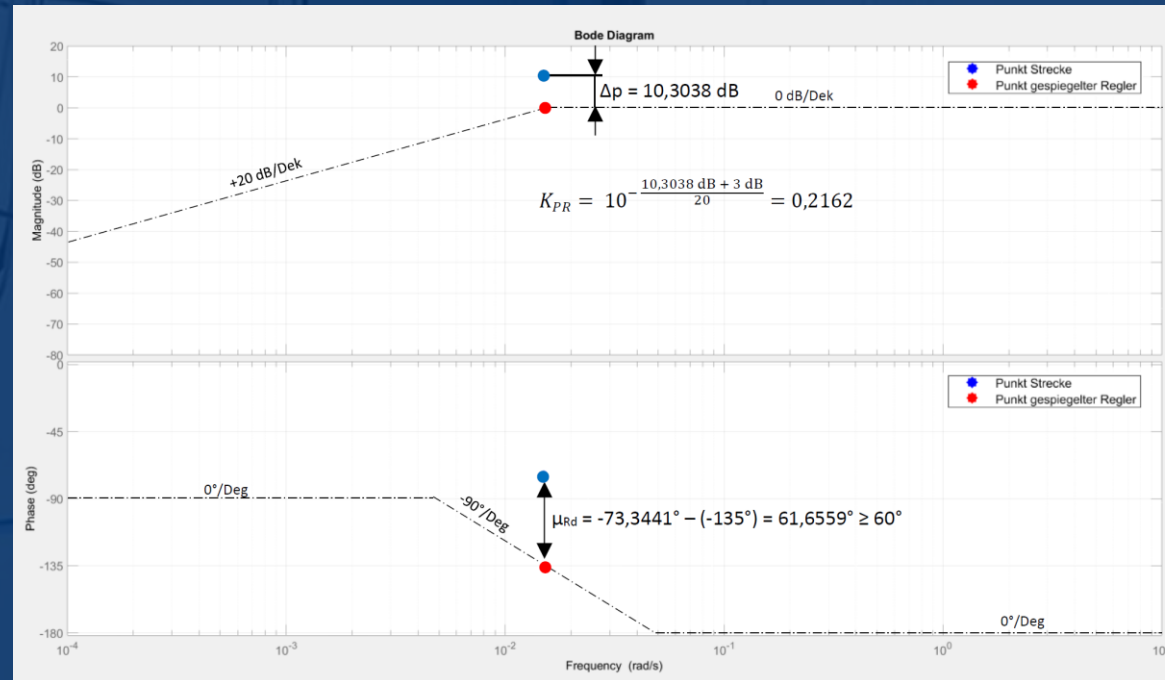
Winkelfrequenz	$\omega = 0.0002 \text{ rad/s}$	$\omega = 0.001 \text{ rad/s}$	$\omega = 0.01 \text{ rad/s}$	$\omega = 0.015 \text{ rad/s}$
Amplitude	15.4644 dB	15.4395 dB	12.9689 dB	10.3038 dB
Phase	-1.2052°	-6.0216°	-55.3737°	-73.3441°



Bode-Aided-Design einer Temperaturregelung

- Durchführung des BAD-Verfahrens für einen gegebenen Punkt der Strecke

$\omega = 0.015 \text{ rad/s}$
10.3038 dB
-73.3441°



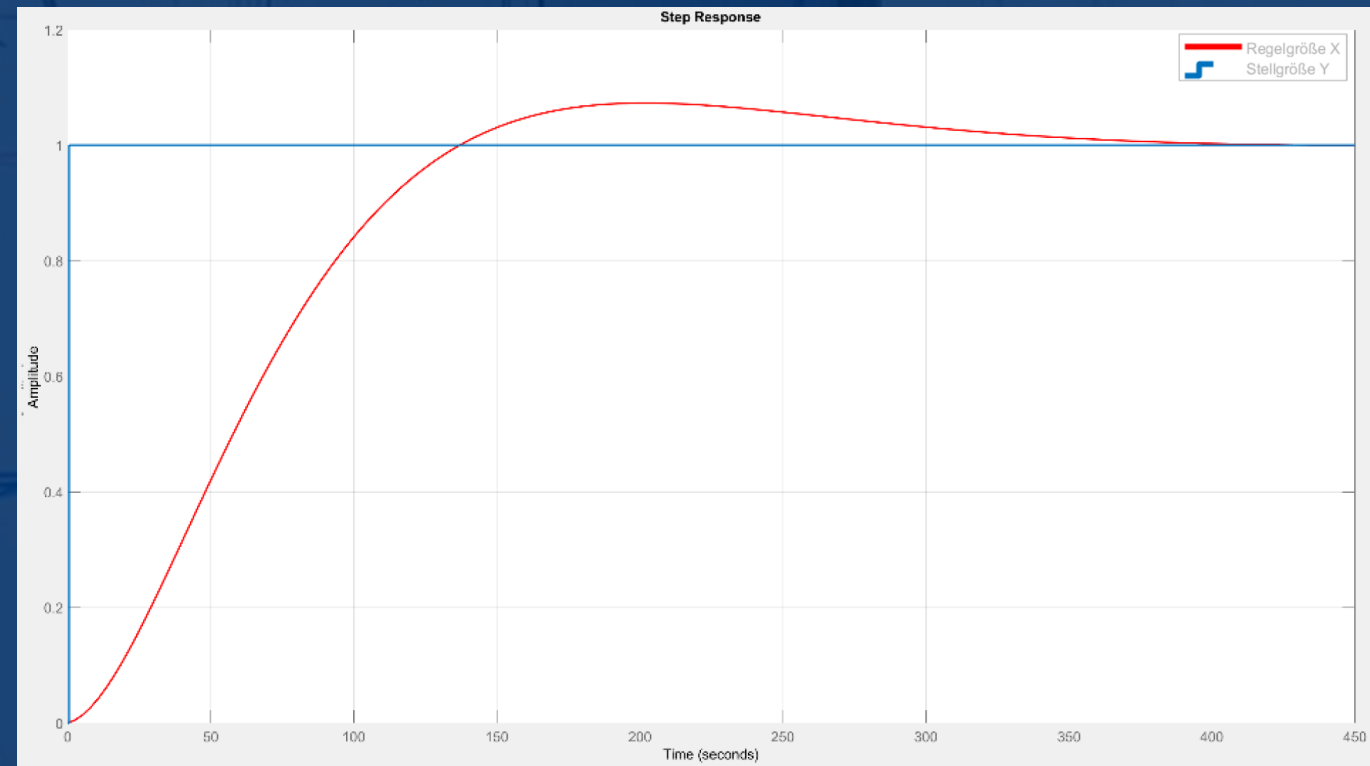
- Ermittelte Reglerparameter:

$$\rightarrow T_n = 66,67 = 1 / \omega_n$$

$$\rightarrow K_{PR} = 0.2162$$

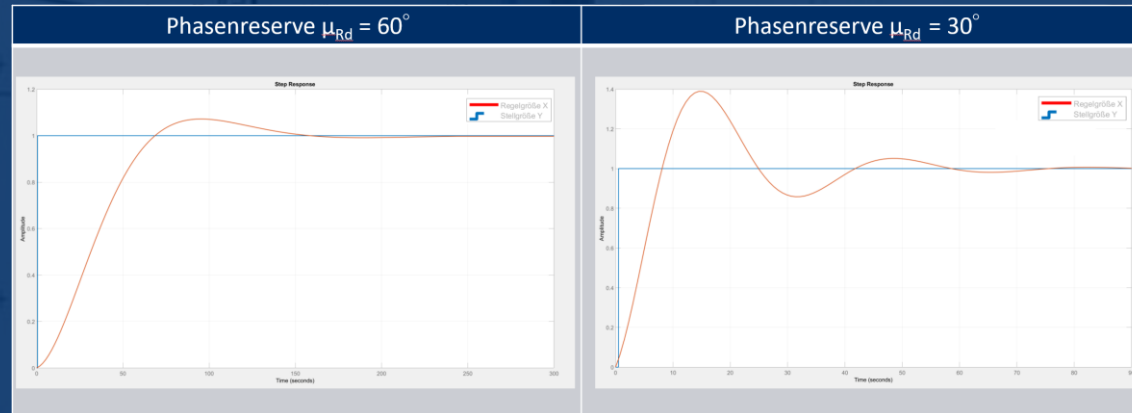
Bode-Aided-Design einer Temperaturregelung

- Ergebnis / Sprungantwort des geschlossenen Regelkreises $G_W(s)$

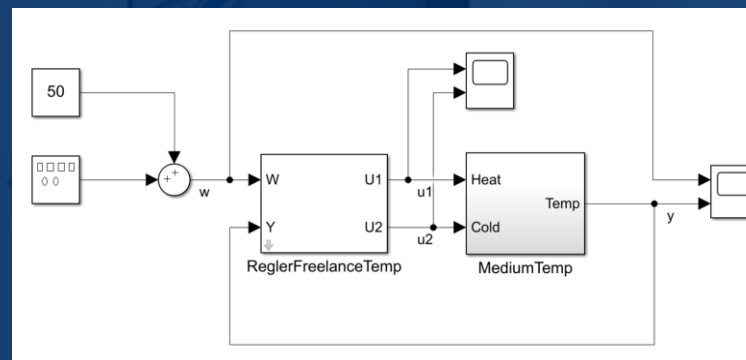


Bode-Aided-Design einer Temperaturregelung

- Je nach Anforderung müssen die Gütekriterien für jede Regelung festgelegt werden

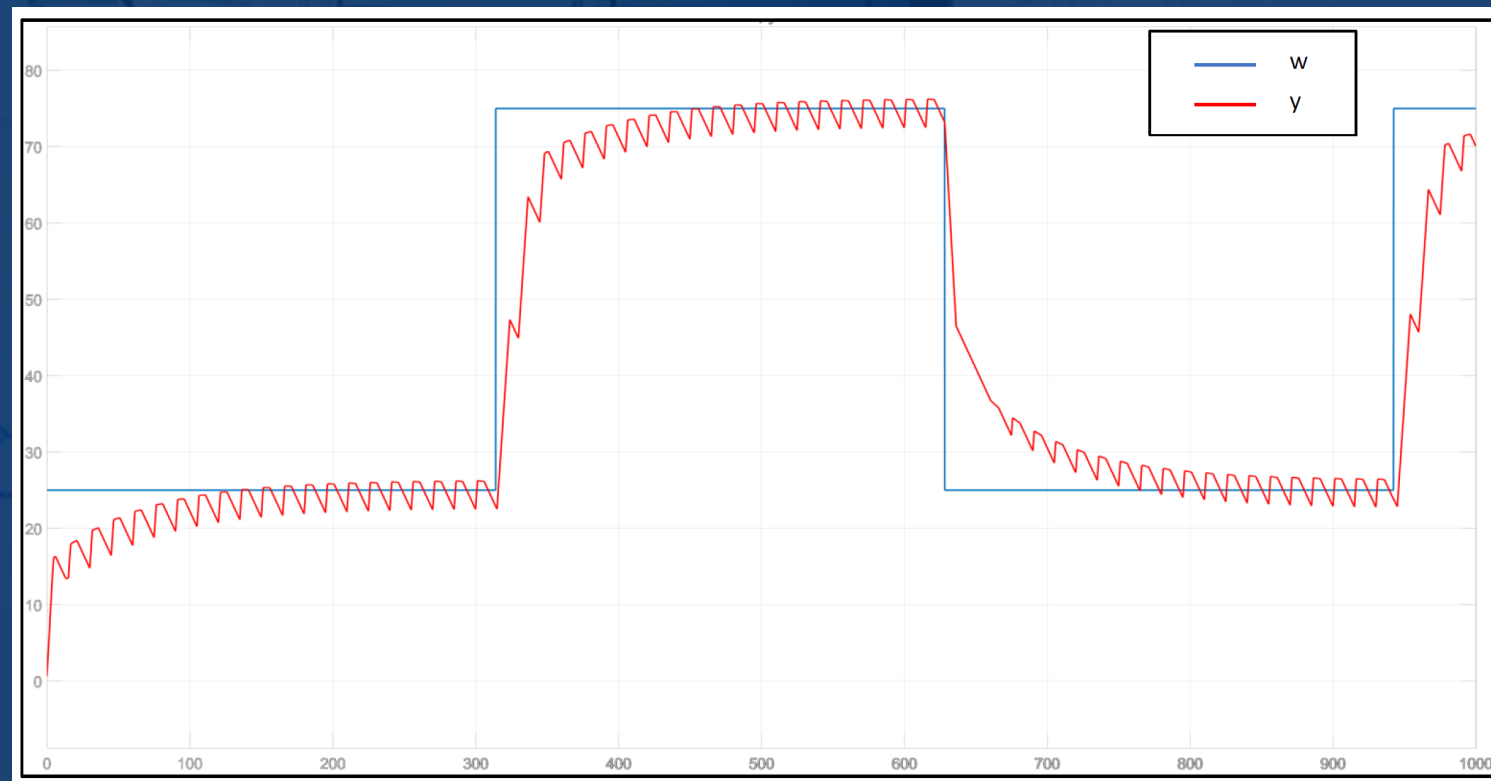


- Bisherige Ergebnisse zeigen das Regelverhalten mit einer stetigen Stellgröße
- Anlagenmodell verwendet eine nicht stetige Stellgröße bestehend aus Heiz- und Kühlelement



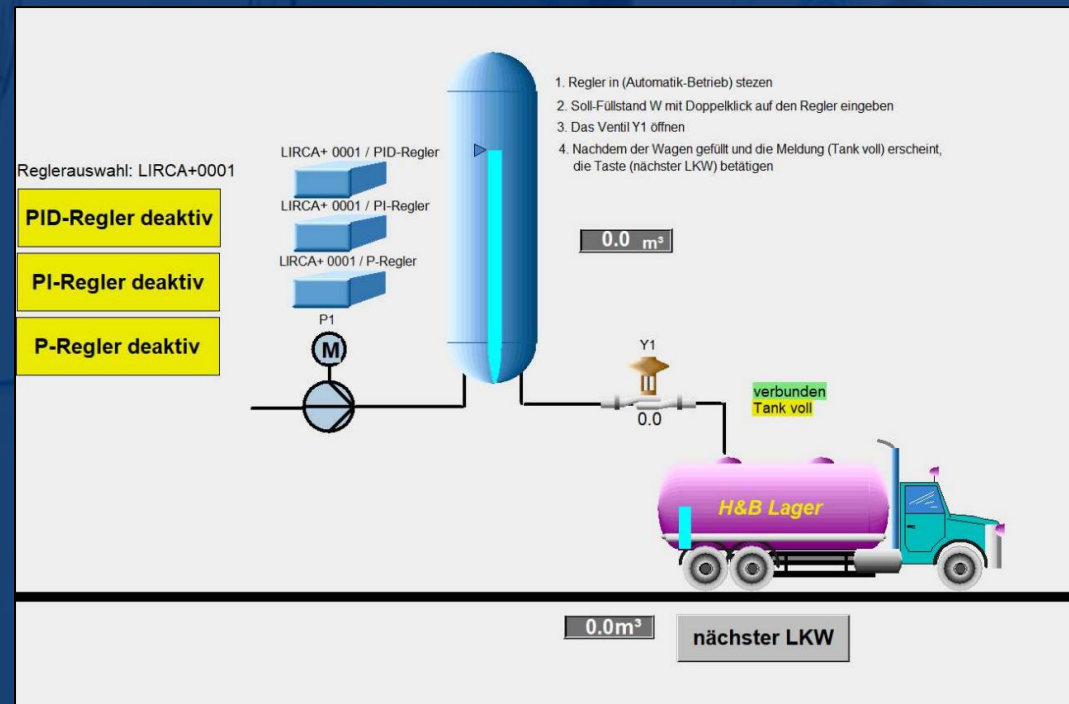
Bode-Aided-Design einer Temperaturregelung

- Die Simulink-Datei wurde angepasst und die Pulsweitenmodulationen (PMW) zur Ansteuerung der Stellglieder für die Regelparameter optimiert



Bode-Aided-Design der Füllstandregelung einer LKW-Abfüllanlage

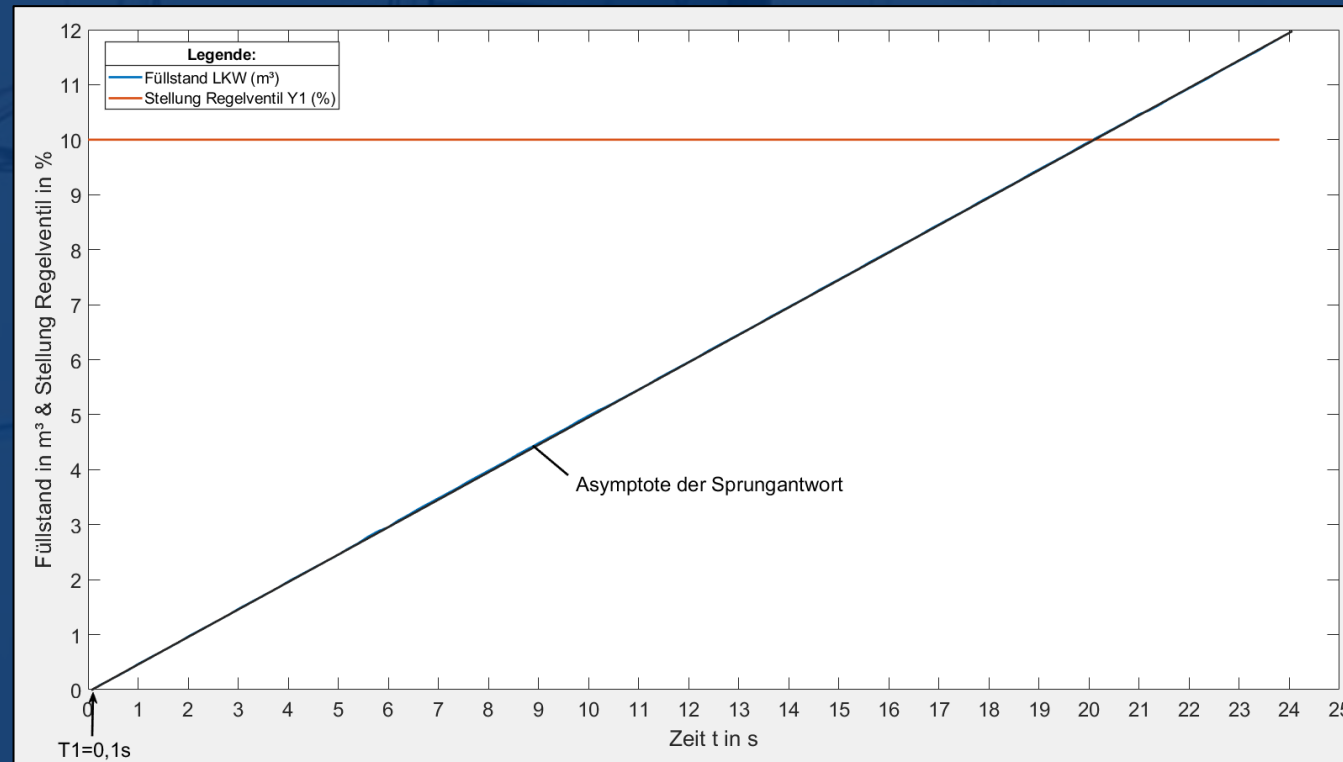
- ABB-Freelance Simulation der LKW-Abfüllanlage
 - Grafikbild nach Anpassung der Funktionsweise



Standard-Entwurfverfahren von Regelkreisen

- Wendetangentenverfahren

- $G_S(s) = \frac{x(s)}{y(s)} = \frac{K_{IS}}{s(1+sT_1)} = I - T_1 - \text{Regelstrecke}$

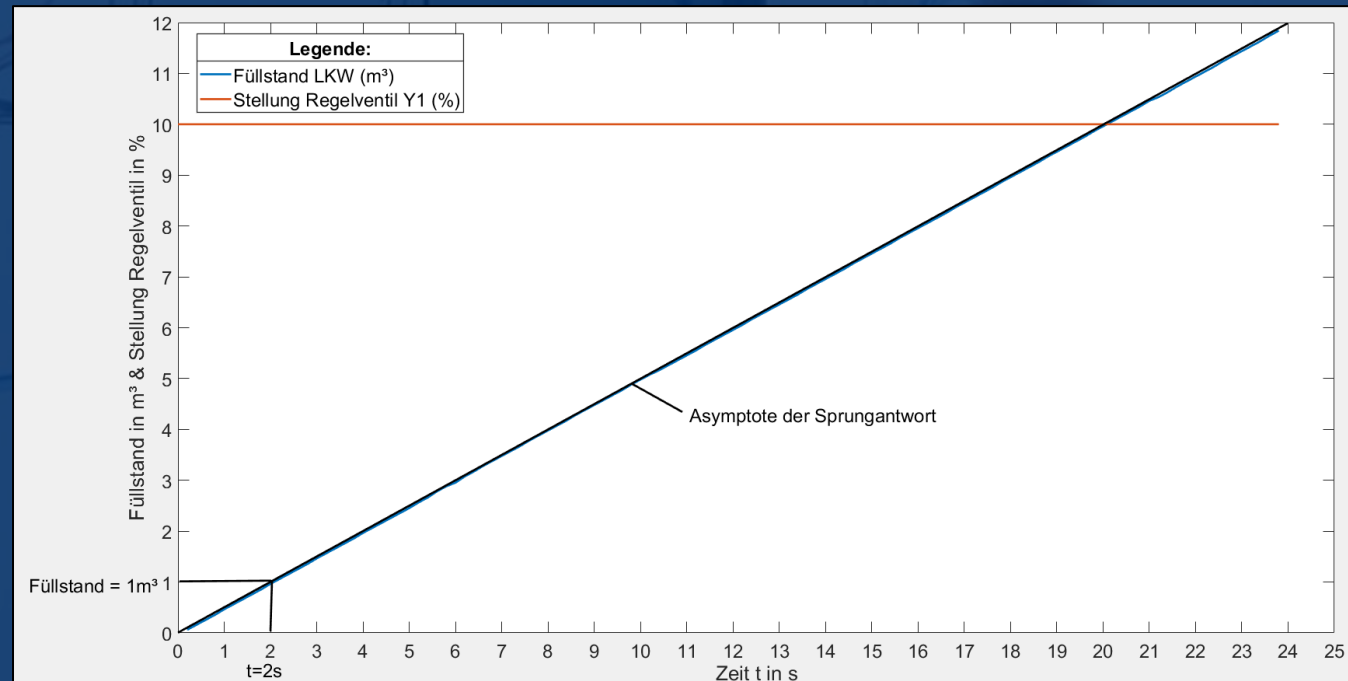


Standard-Entwurfsverfahren von Regelkreisen

- Wendetangentenverfahren

- $T_1 = 0,1s$ $K_{IS} = \frac{x(t)}{\hat{y} * t} = \frac{1m^3}{2s * 10} = 0,05 \frac{m^3}{s}$

$$G_S(s) = \frac{x(s)}{y(s)} = \frac{0,05 \frac{m^3}{s}}{s(1+s0,1sek)}$$



Standard-Entwurfsverfahren von Regelkreisen

- Übertragungsfunktion offener Kreis Typ C

$$G_0(s) = \frac{K_{PR}K_{PS}K_{IS}}{sT_n}$$

- Übertragungsfunktion PD-Regler

$$G_R(s) = K_{PR}(1 + sT_V)$$

- Übertragungsfunktion offener Kreis LKW-Füllst

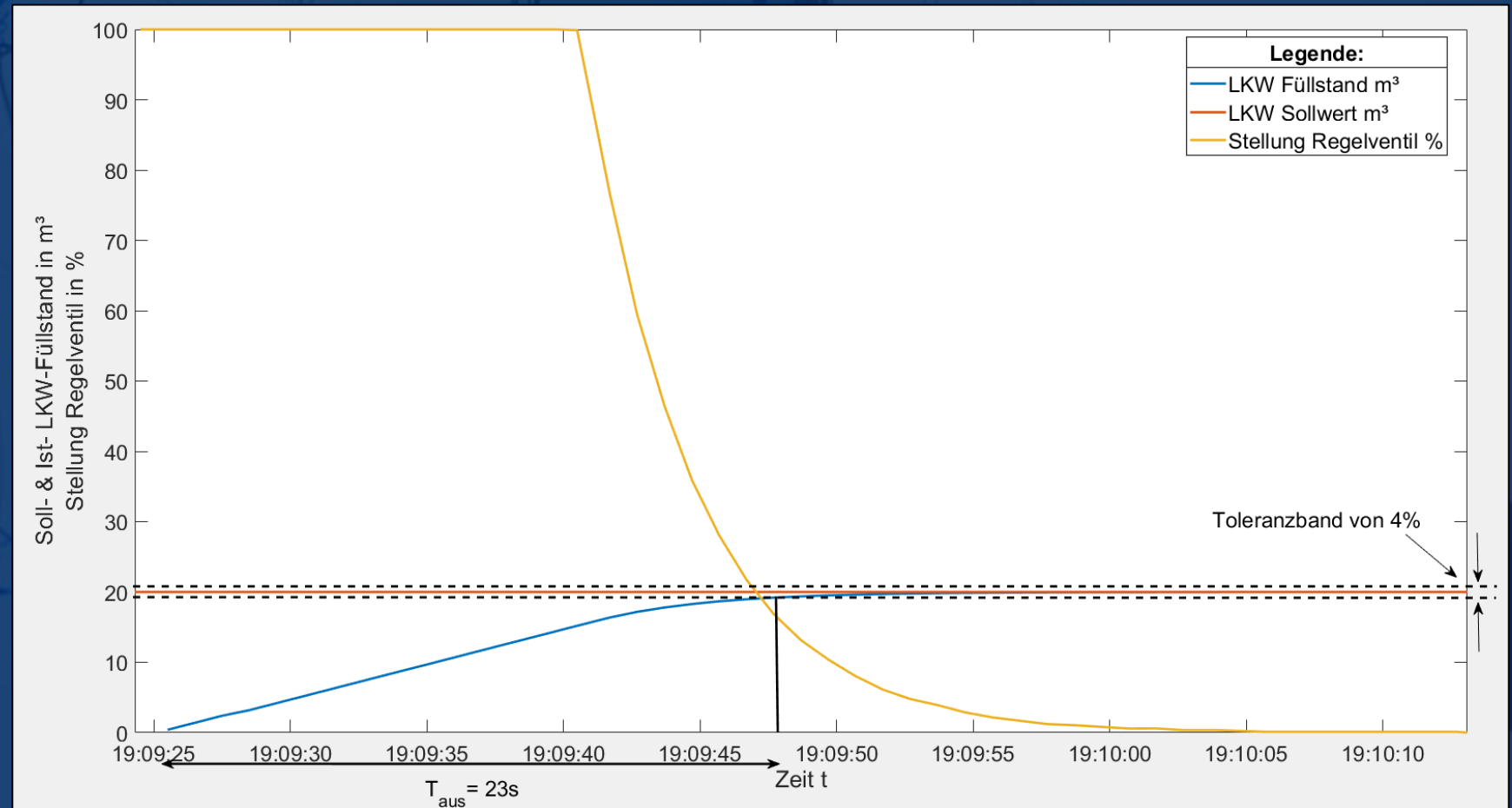
$$G_0(s) = G_R(s) * G_S(s) = \frac{K_{IS}K_{PR}(1+sT_V)}{s(1+sT_1)} = \frac{K_{IS}K_{PR}}{s} \quad T_1 = T_V = 0,1s$$

- Proportionalbeiwert des Reglers

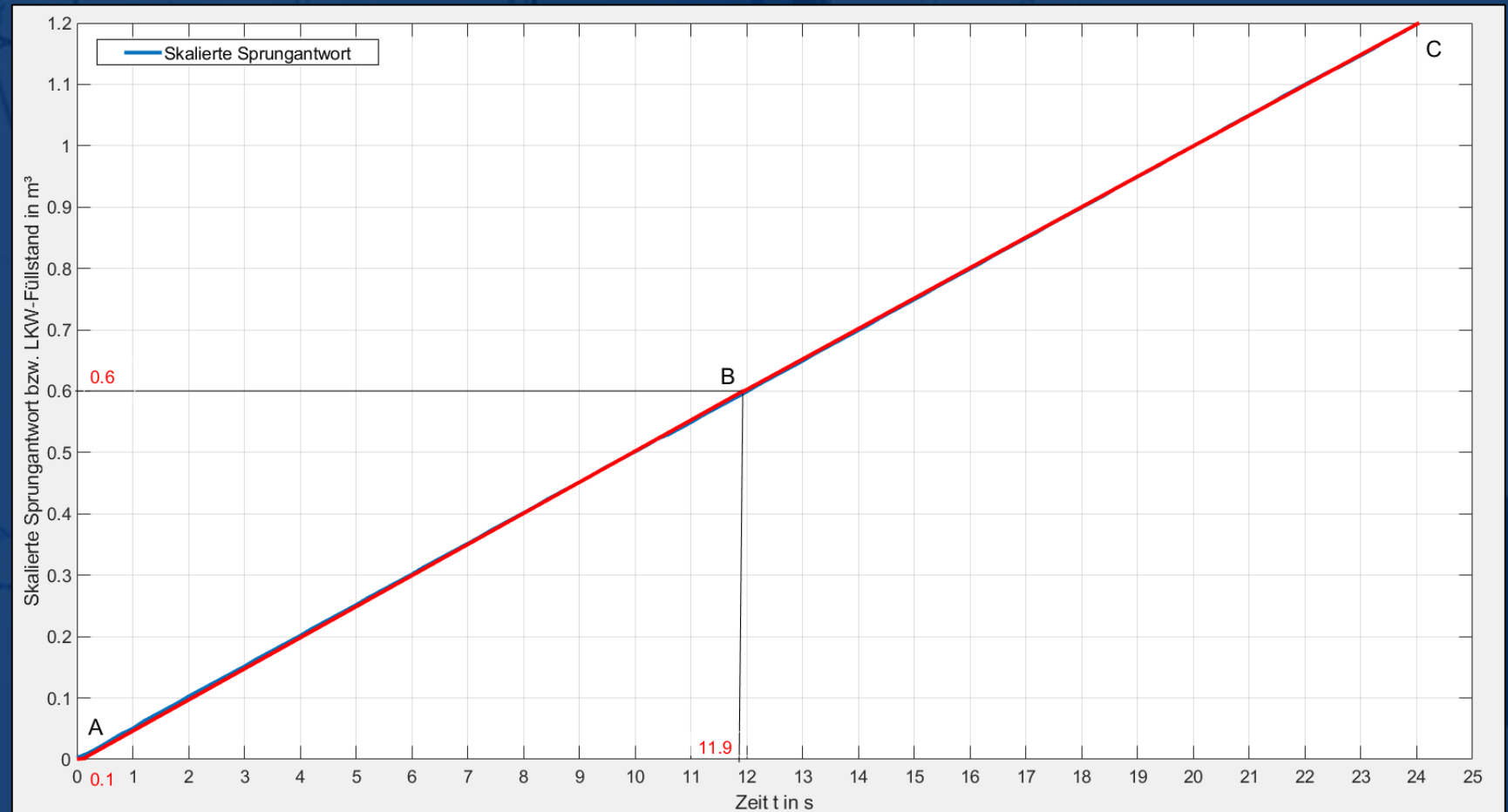
$$K_{PR} = \frac{3,9 * T_n}{K_{PS}K_{IS} * T_{aus}} = \frac{3,9 * 1s}{0,05 \frac{m^3}{s} * 10s} = 7,8 \frac{s}{m^3} \quad T_{aus} = 10s$$

Typ-Bezeichnung	Anzahl von Gliedern		Regelgütekriterien			
	I-Glied	P-T1-Glied	Fehler	Dämpfung	Ausregelzeit	Überschwingung
Typ A	1	1	$e(\infty) = 0$	$\vartheta = 0,707$	$T_{aus} = 11T_E$	$\ddot{U}_{max} = 4,3\%$
Typ B	--	2	<i>Fehler</i>	$\vartheta = 0,707$	$T_{aus} = 11T_E$	$\ddot{U}_{max} = 4,3\%$
Typ C	1	--	$e(\infty) = 0$	$\vartheta = 1$	T_{aus} gegeben	<i>keine</i>
Typ D	--	1	<i>Fehler</i>	$\vartheta = 1$	T_{aus} gegeben	<i>keine</i>
Typ E	2	--	<i>Fehler</i>	$\vartheta = 0$	<i>instabil</i>	
Typ SO	2	1	$e(\infty) = 0$	$\vartheta = 0,5$	$T_{aus} = 18T_E$	$\ddot{U}_{max} = 43\%$

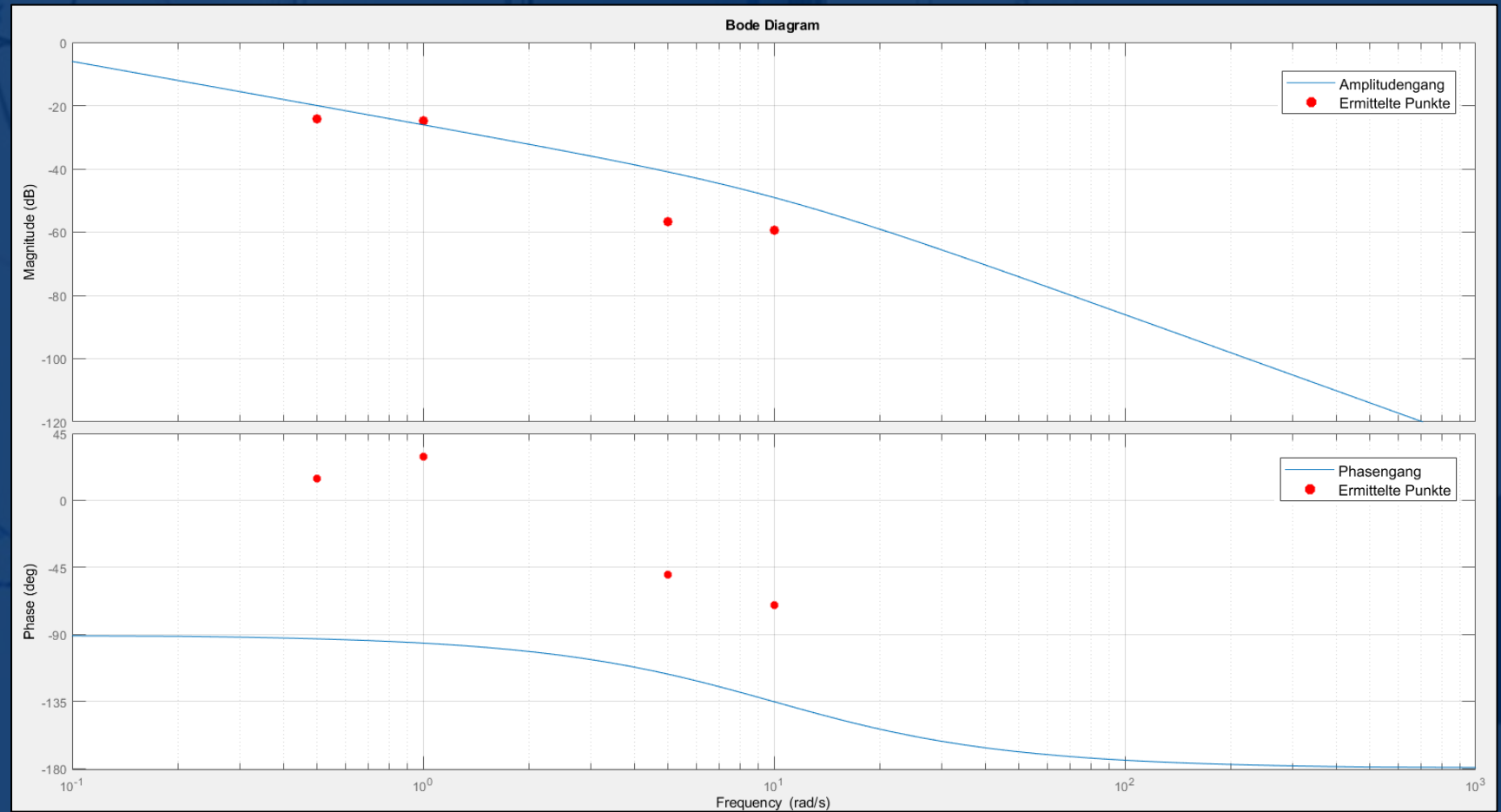
Standard-Entwurfsverfahren von Regelkreisen



Bode-Aided-Design einer Füllstandsregelung



Bode-Aided-Design einer Füllstandsregelung

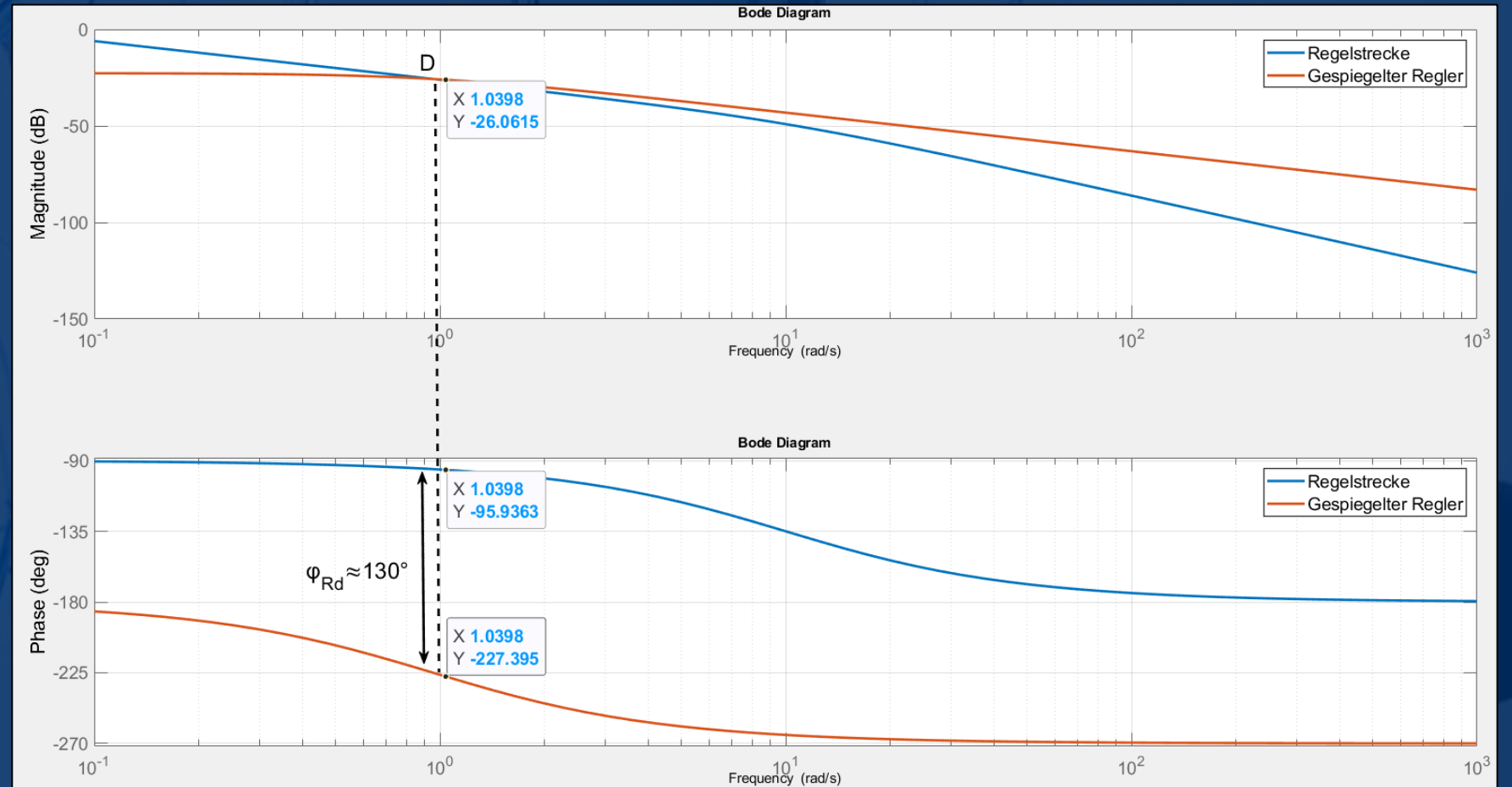


Bode-Aided-Design einer Füllstandsregelung

- Angestrebte Phasenreserve 130°
 - $\varphi_R = -95,4629^\circ - (225^\circ) = 129,5371^\circ \approx 130^\circ$
 - $\varphi_v(\omega_v) = -225^\circ \rightarrow \omega_v = 0,9563 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$
 - $T_V = \frac{1}{\omega_v} = 1,0457\text{s}$
 - $\Delta_p = |G_S(\omega = 0,9563)| = -25,6725\text{dB} + 3\text{dB}$
 - $K_{PR} = 10^{-\frac{\Delta_p}{20}} = 13,6027$

Winkelfrequenz	$\omega = 0.9563 \text{ rad/s}$
Amplitude	-25.6725 dB
Phase	-95.4629°

Bode-Aided-Design einer Füllstandsregelung



Bode-Aided-Design einer Füllstandsregelung

