

BEUTH HOCHSCHULE FÜR TECHNIK BERLIN  
University of Applied Sciences

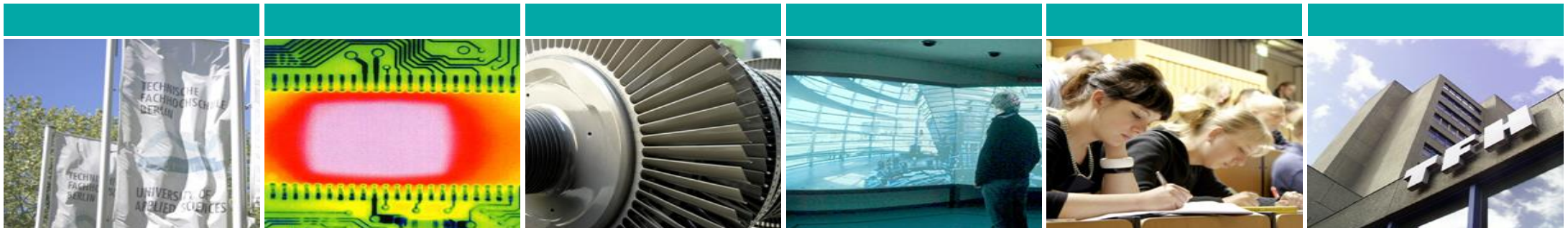


# Summer School 2016

## Offene Gebäudeautomation

### Grundlagen Regelungstechnik

M. Fraaß





# Automationscharakter des Regels

## HEIZUNGSTERMOSTATVENTIL

- wichtigster Regler in der TGA
- weitverbreitetster Regler überhaupt

## GEBÄUDEAUTOMATION

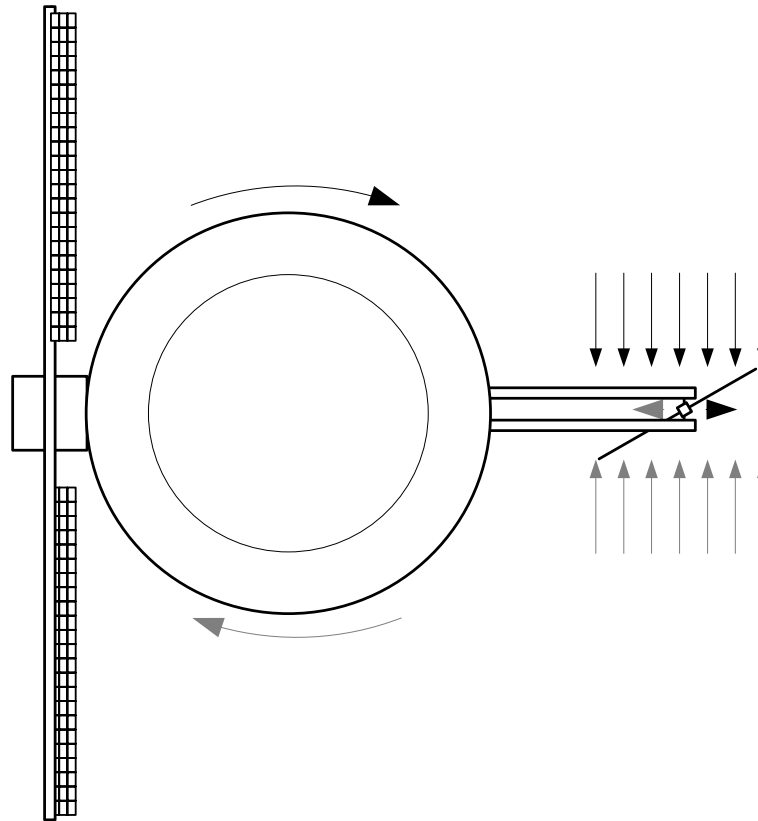
- Regeln als Funktion der Automationsebene
- Regler nicht eigene Geräte, sondern Teil der Gesamtfunktionalität

## FRAGEN

- Wie ordnet sich das Regeln in die Automation ein?
- Worin hebt sich das Regeln von der Automation ab?



# Ursprünglicher Automationsbegriff



## SELBSTDENKEND

- griechisch *autos*: selbst
- indogermanischer Wortstamm *men*: denken

➤ *Automatia*

## STELUNGSREGELUNG

- I-Algorithmus
- Regeln Form der Automation

# Heutiger Automationsbegriff

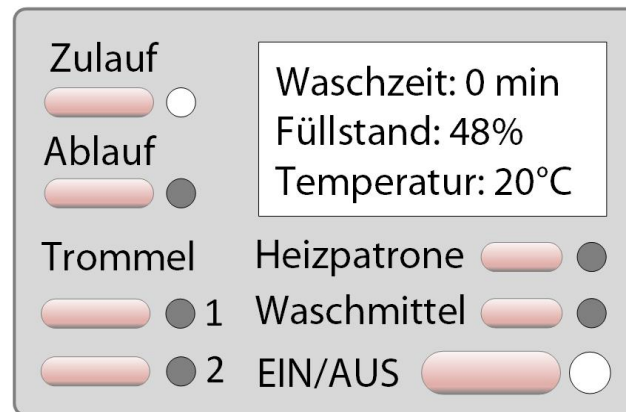
## SELBSTTÄTIG

- Automation ersetzt Personal
- Gegenteil des automatischen Betriebs ist der manuelle Betrieb

## BEISPIEL WASCHMASCHINE



automatisch



manuell



## Aufgaben und Algorithmen

### Waschbehälter füllen

„Öffne das Zulaufventil des Waschbehälters solange, bis der maximale Zustand erreicht ist !“

### Waschtemperatur auf 40°C bringen

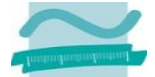
„Schalte die Heizpatrone zu, wenn die Waschtemperatur 39° C unterschreitet !“

„Schalte die Heizpatrone ab, wenn die Waschtemperatur 41° C überschreitet !“

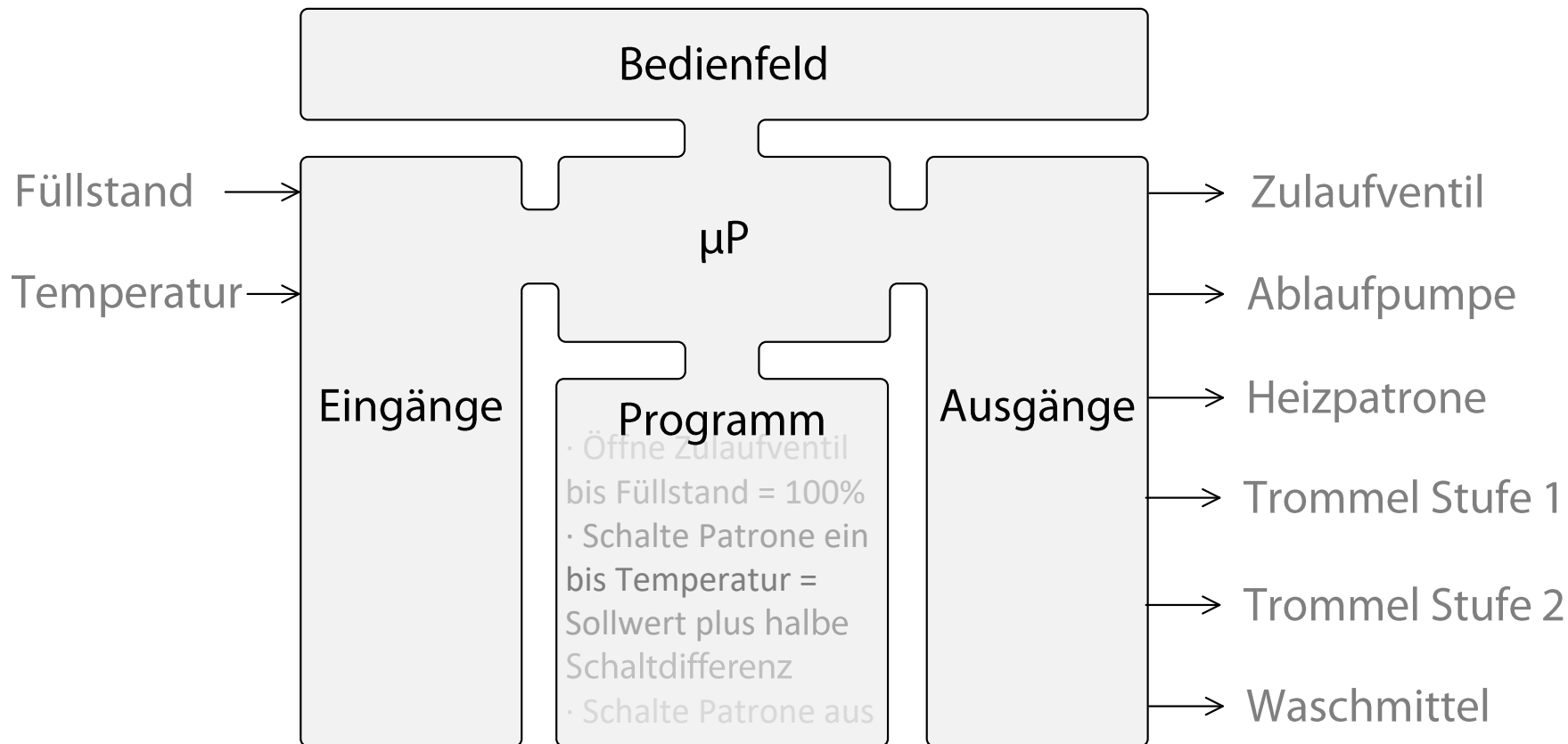
### Rotorblätter einer Windmühle in den Wind stellen

„Drehe das Mühlenhaus bei jeder Umdrehung des Führungsrotors um x Grad gleichsinnig zur Drehung des Führungsrotors !“

➤ Algorithmen sind Folgen von Handlungsanweisungen zur Erledigung einer Aufgabe.



# Automationseinrichtungen

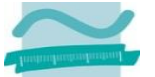


## EXPLIZITE ALGORITHMEN

- Controller

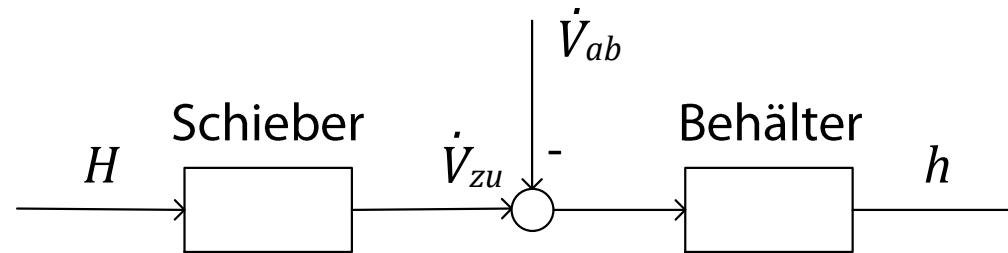
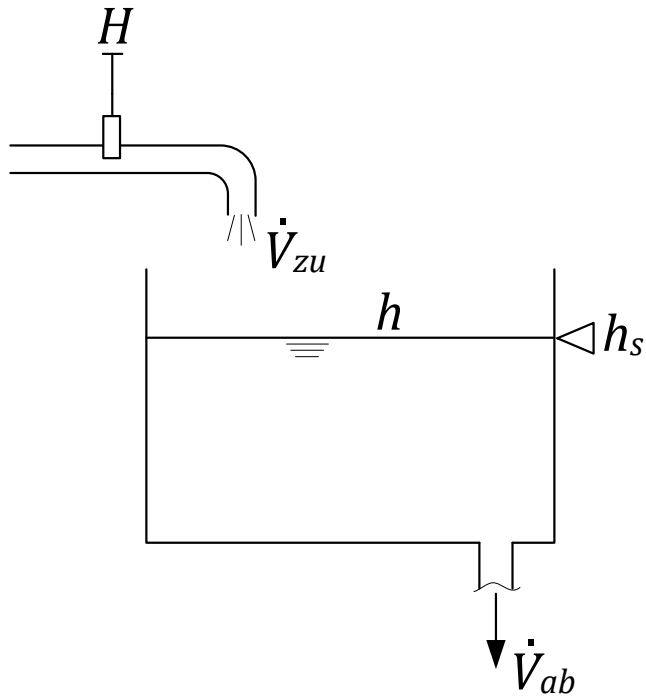
## IMPLIZITE ALGORITHMEN

- Schaltungen
- Mechanismen



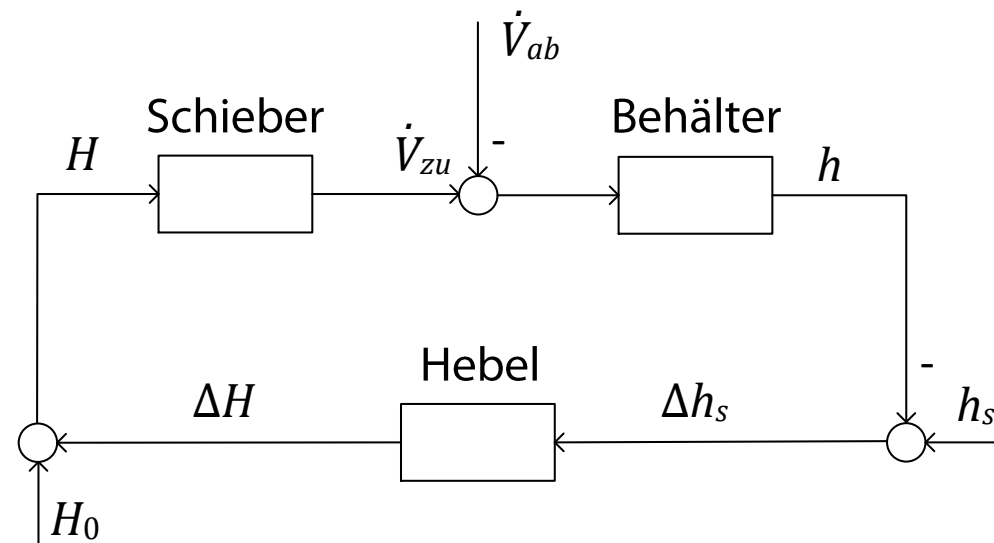
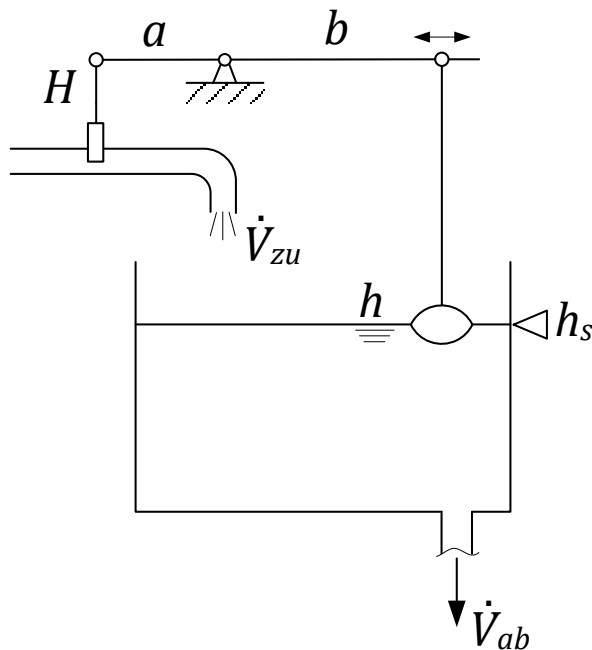
# Regelungsaufgaben

## FÜLLSTAND IN EINEM BEHÄLTER



# Regelung

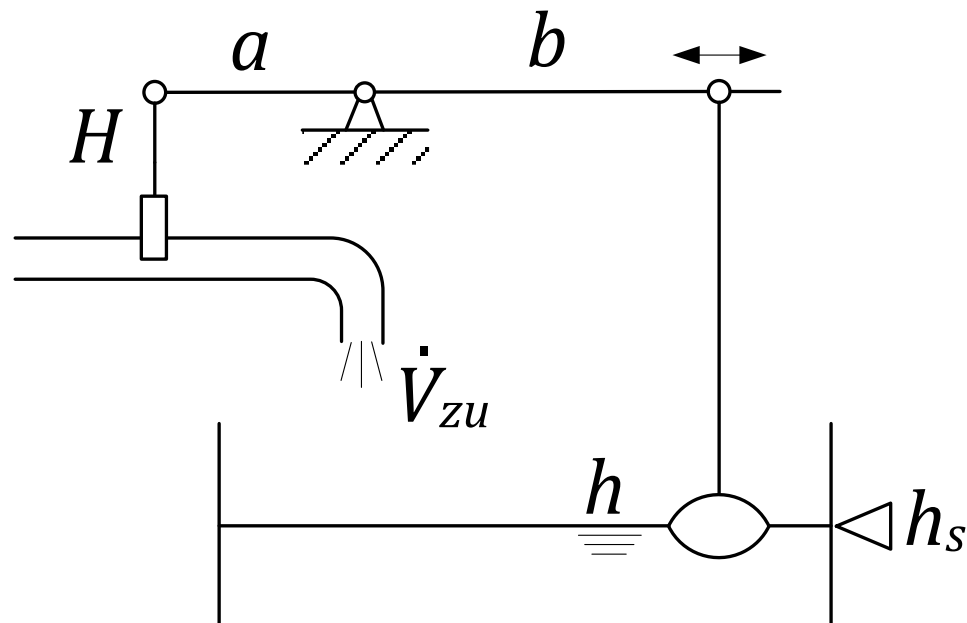
## MECHANISCHE FÜLLSTANDSREGELUNG



➤ Regeln schafft automatischen Betrieb



# Regelalgorithmus



## RELATIVER HUB

$$H = \frac{H_x}{H_{100}}$$

- $H_x$ : absoluter Hub in der Einheit von  $h$
- $H_{100}$ : maximaler Hub

## STRAHLENSATZ

$$\frac{H \cdot H_{100}}{a} = \frac{h_s - h}{b}$$

## PROPORTIONALALGORITHMUS

$$H = \frac{1}{H_{100}} \frac{a}{b} (h_s - h)$$

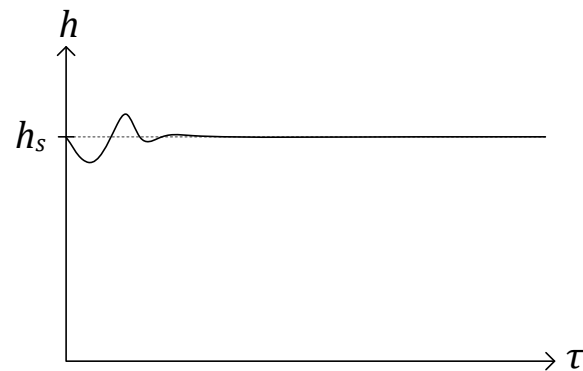
➤ Regelalgorithmen werden mathematisch formuliert



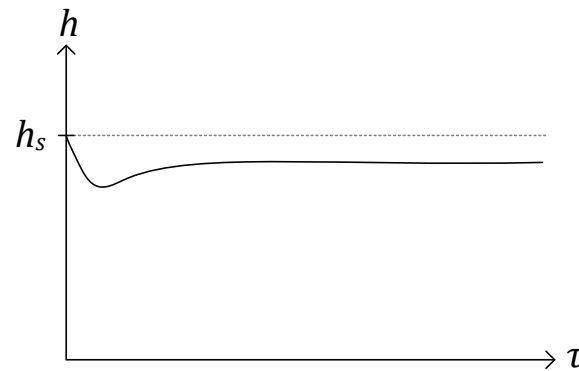


# Mathematische Begründung der Regelungstechnik

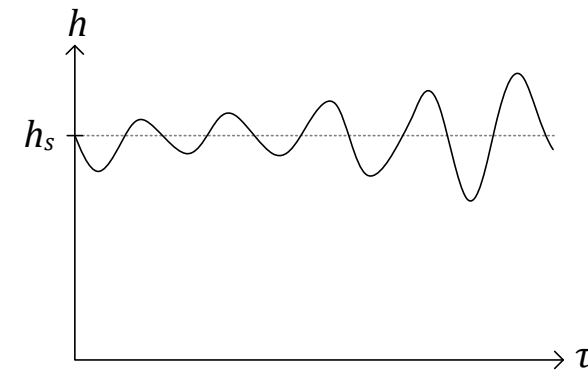
## VERLÄUFE DES FÜLLSTANDS BEI UNTERSCHIEDLICHEN EINSTELLUNGEN



gut



ungenau

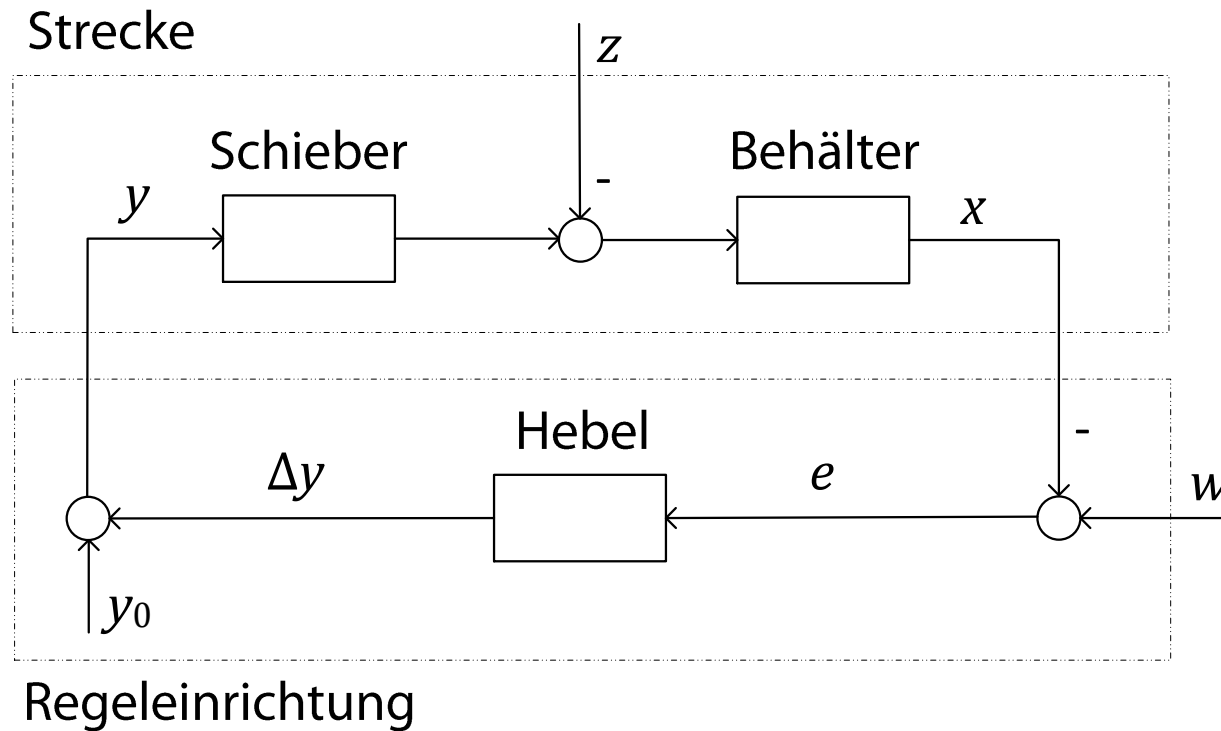
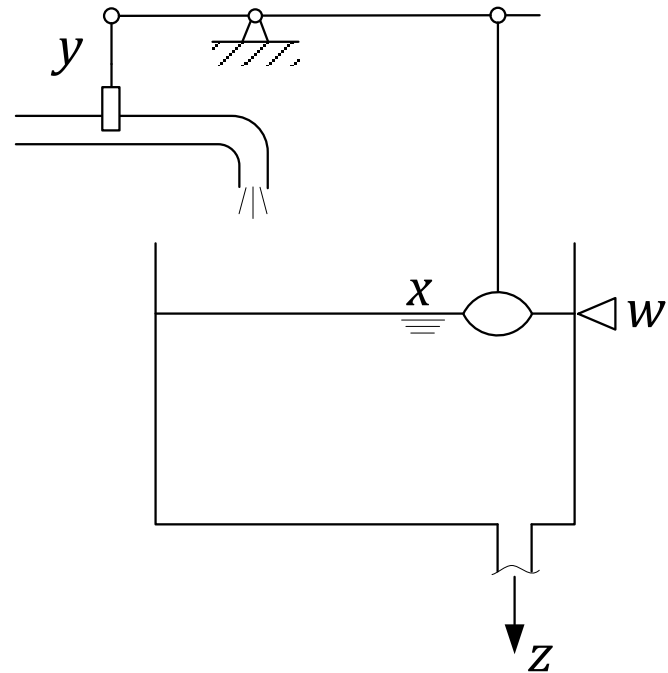


astabil

- technische Erklärungsversuche nur begrenzt tauglich
- Reglereinstellung, Reglerauswahl, Stellgliedauslegung mit Hilfe der Mathematik



# Strecke und Regeleinrichtung



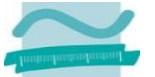
$w$ : Führungsgröße

$x$ : Regelgröße

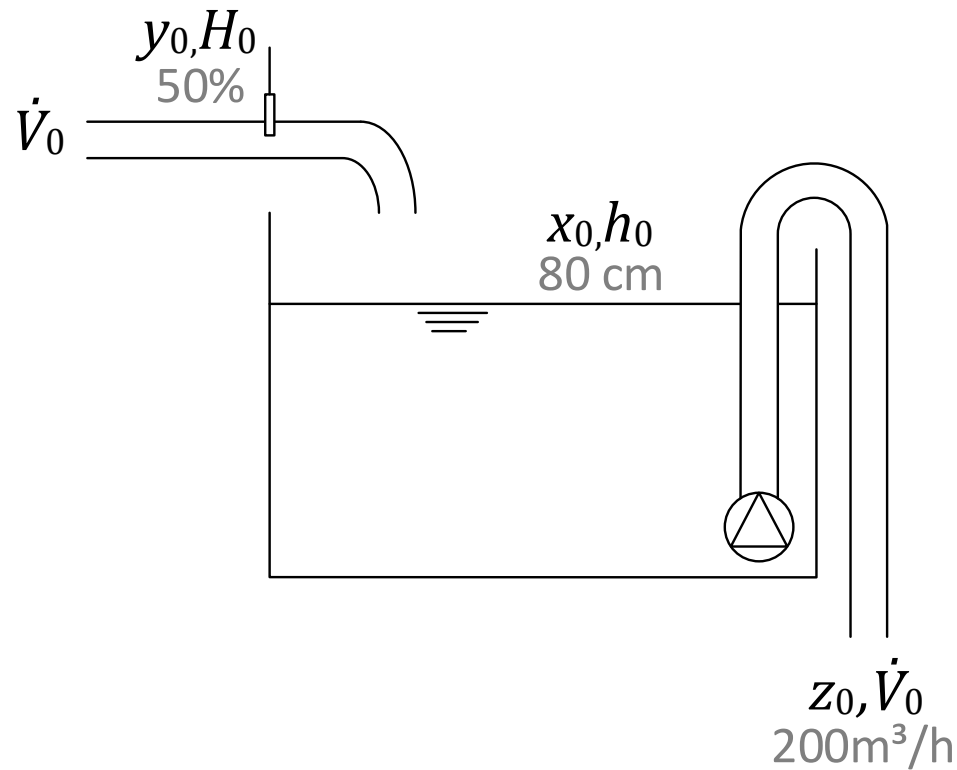
$y$ : Stellgröße

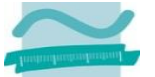
$z$ : Störgröße



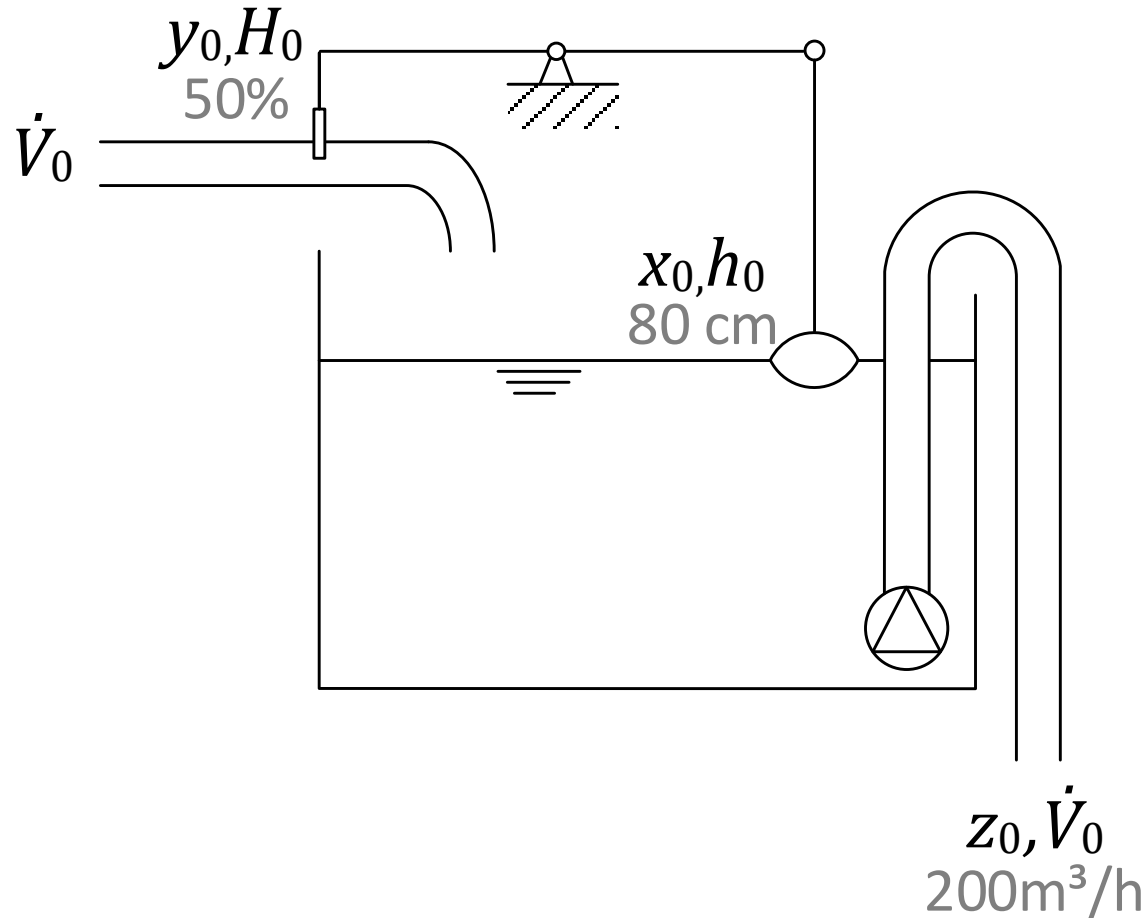


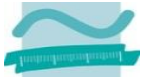
# Grundzustand der Strecke



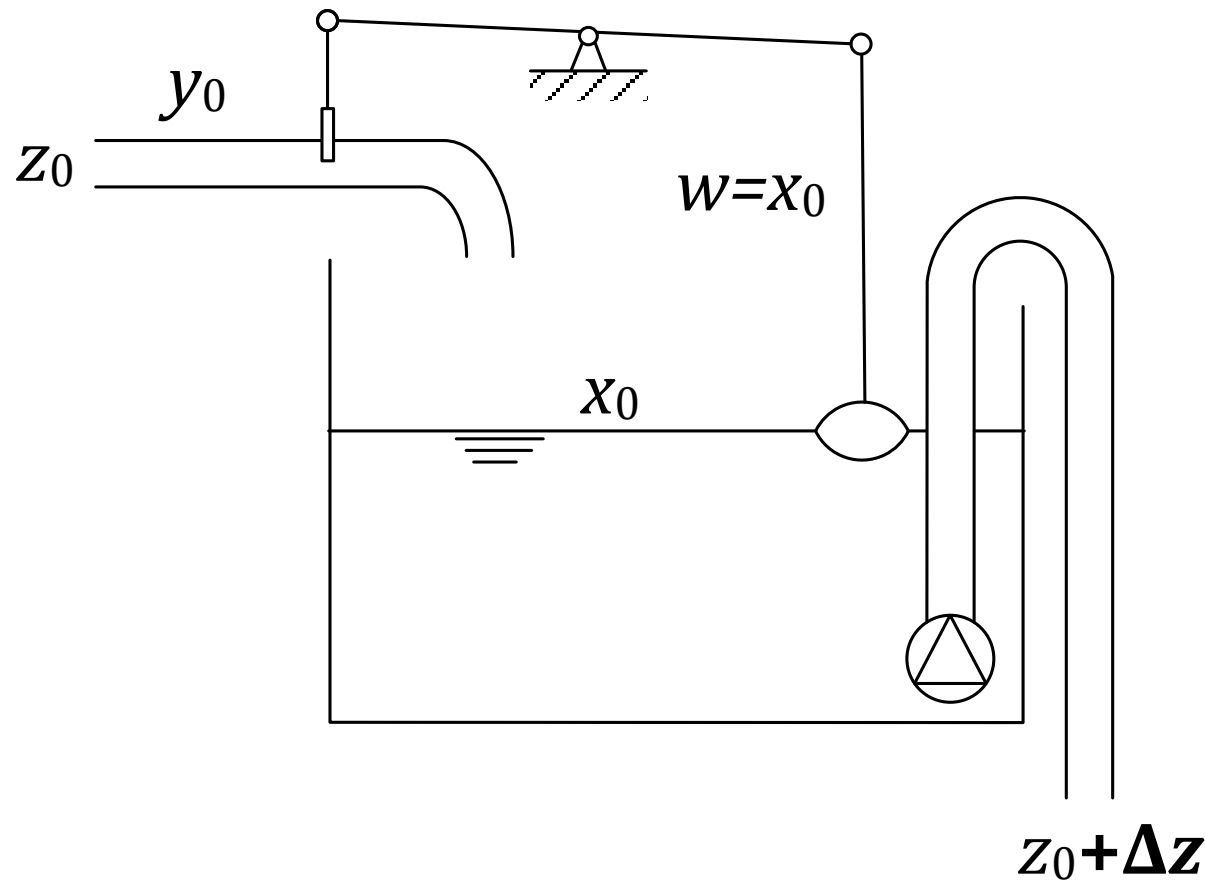


# Grundzustand der Regeleinrichtung / Justierung

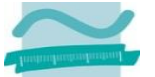




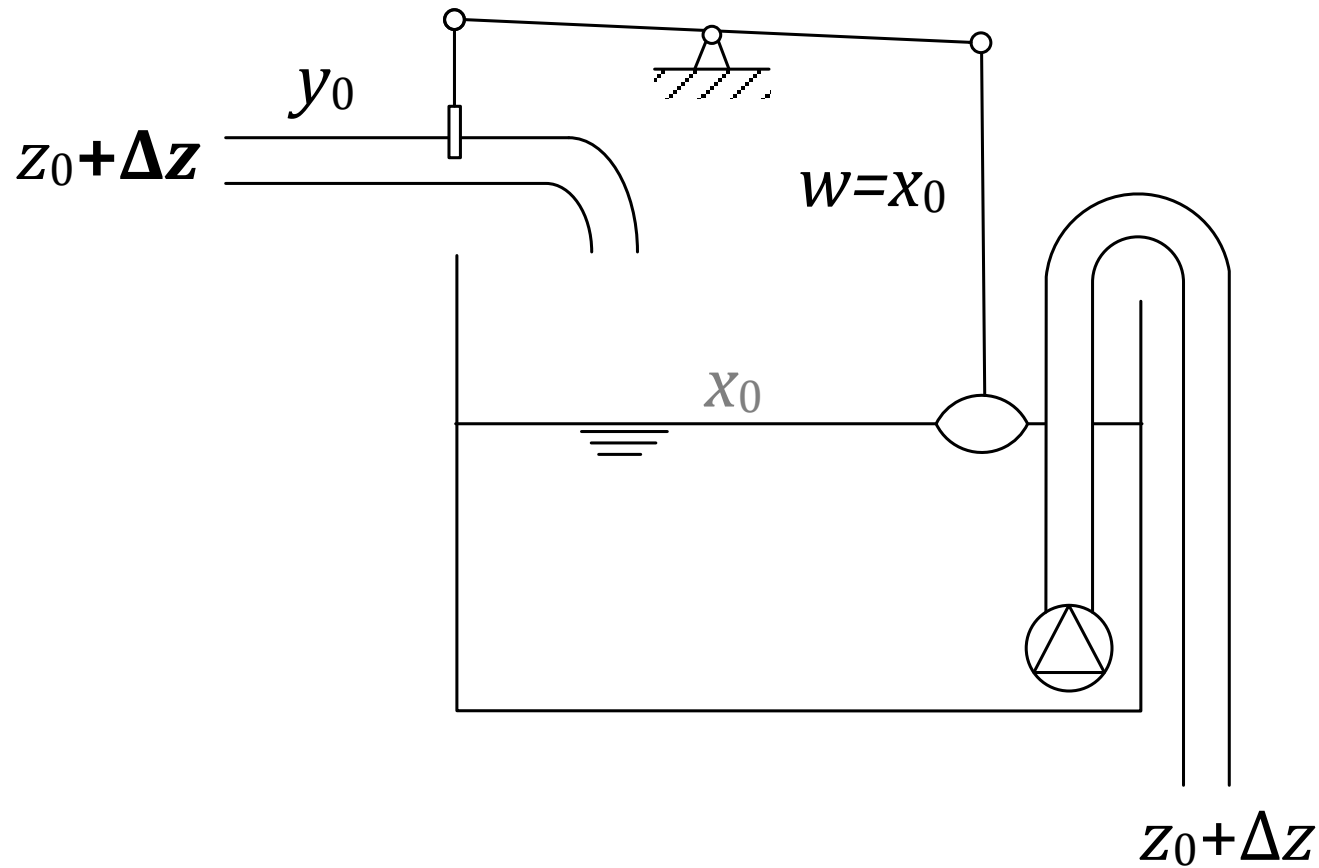
# Bleibende Regelabweichung nach Störung



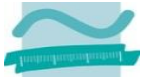
Störung:  
 $\Delta z = z_1 - z_0$



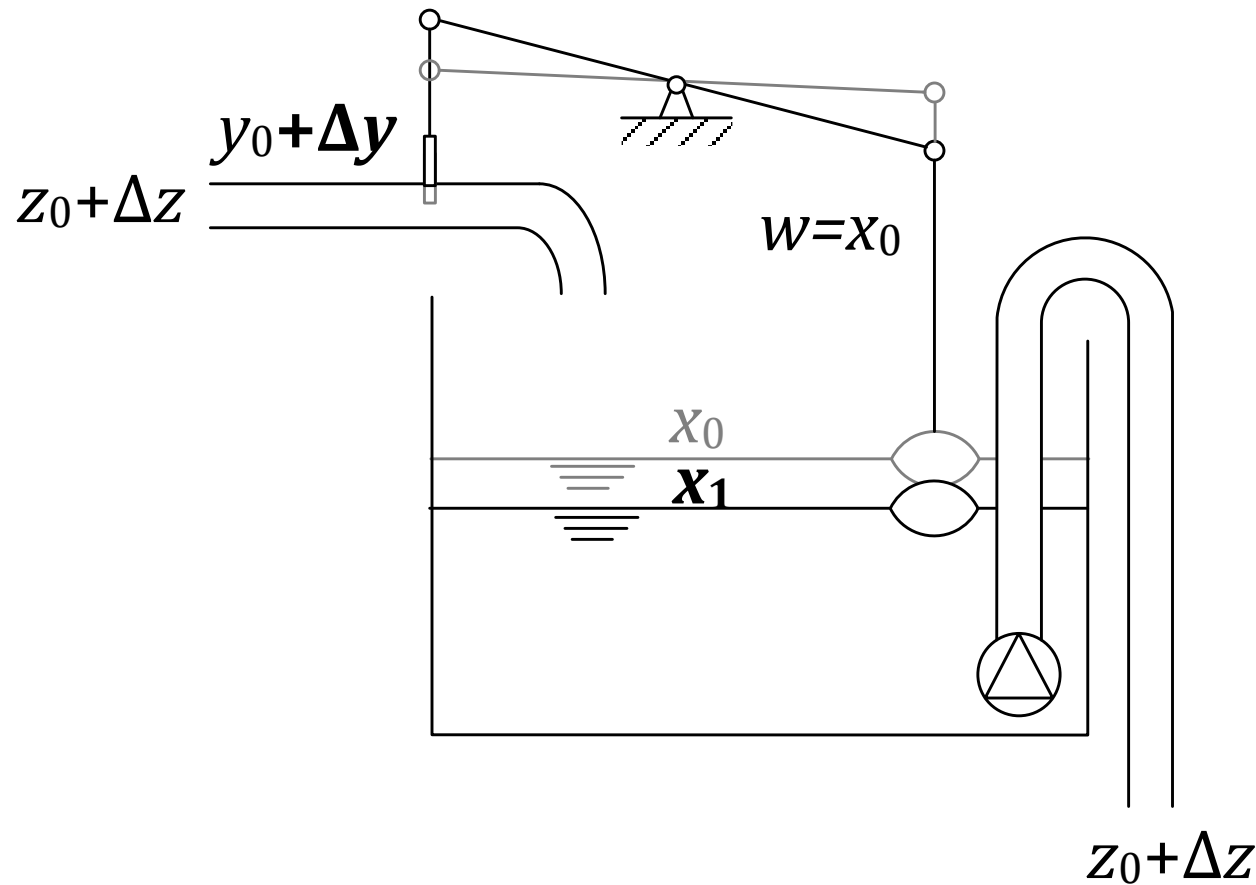
## Bleibende Regelabweichung nach Störung (2)



Störung:  $\Delta z = z_1 - z_0$

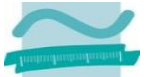


# Bleibende Regelabweichung nach Störung (3)

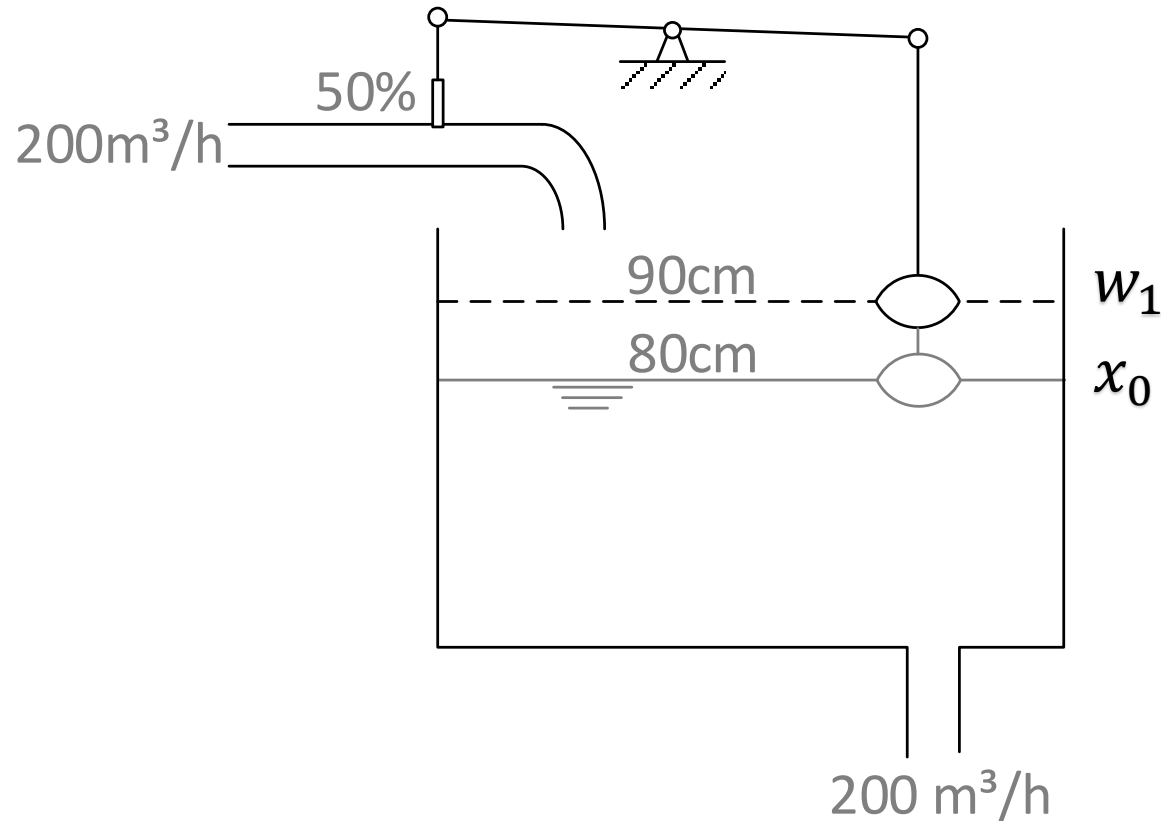


Bleibende Regelabweichung:  
 $x_{wb} = x_1 - x_0$



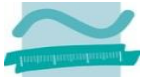


# Bleibende Regelabweichung nach Nutzereingriff

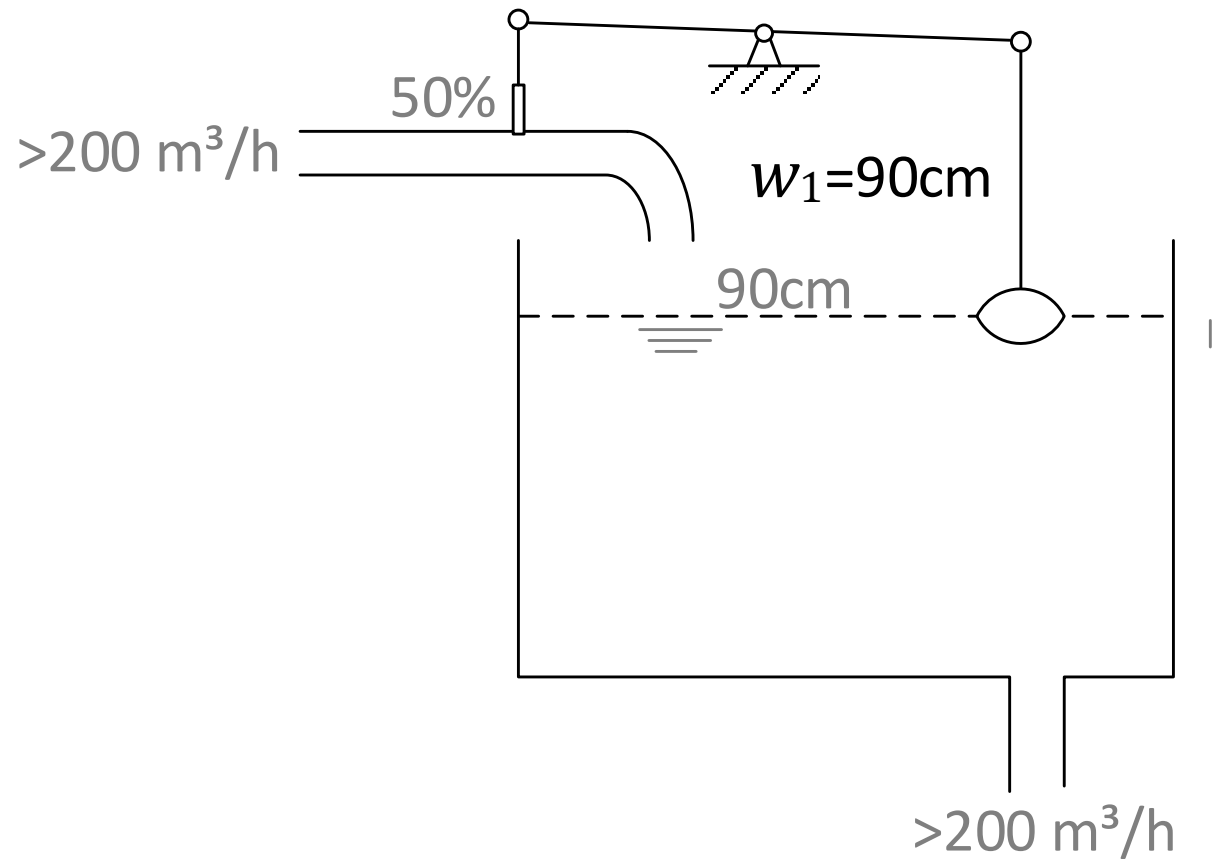


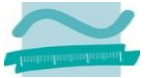
Nutzereingriff:  
 $\Delta w = w_1 - x_0$



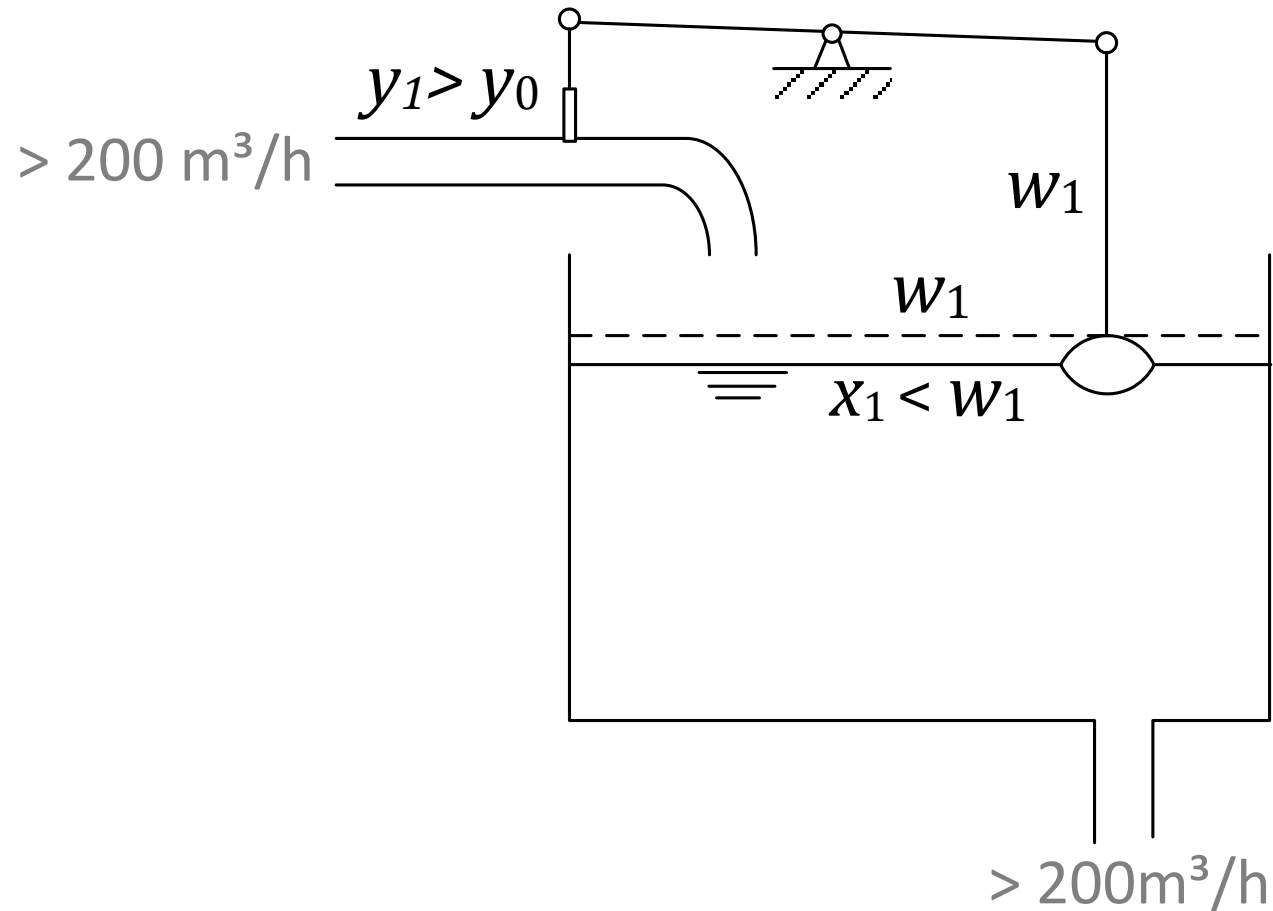


## Bleibende Regelabweichung nach Nutzereingriff (2)



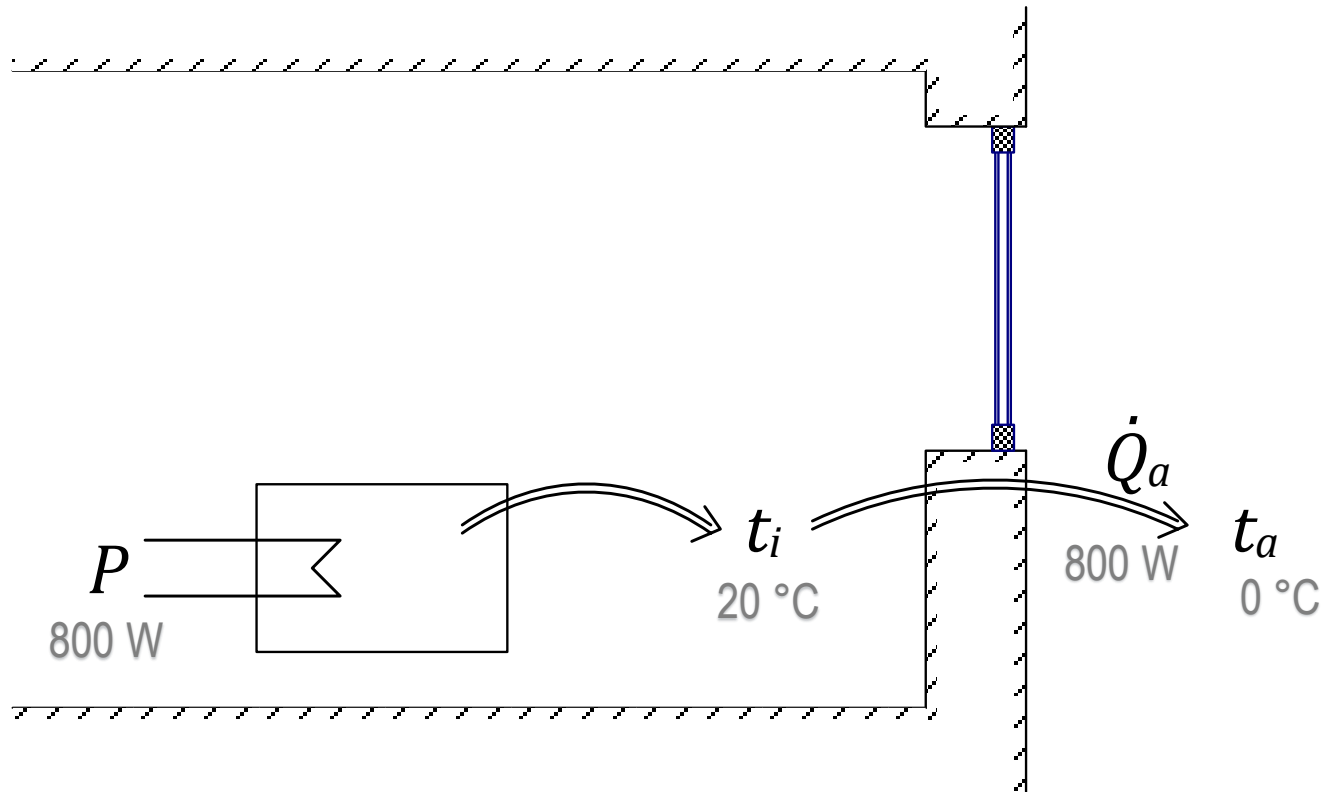


## Bleibende Regelabweichung nach Nutzereingriff (3)

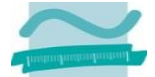


Bleibende Regelabweichung:  
 $x_{wb} = x_1 - w_1$

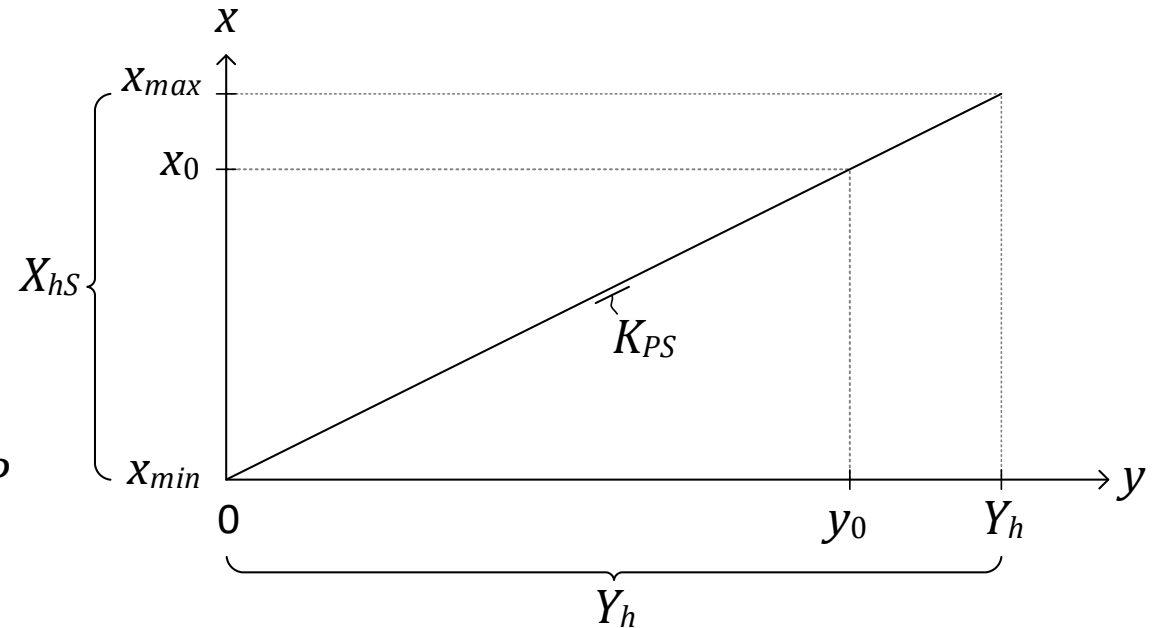
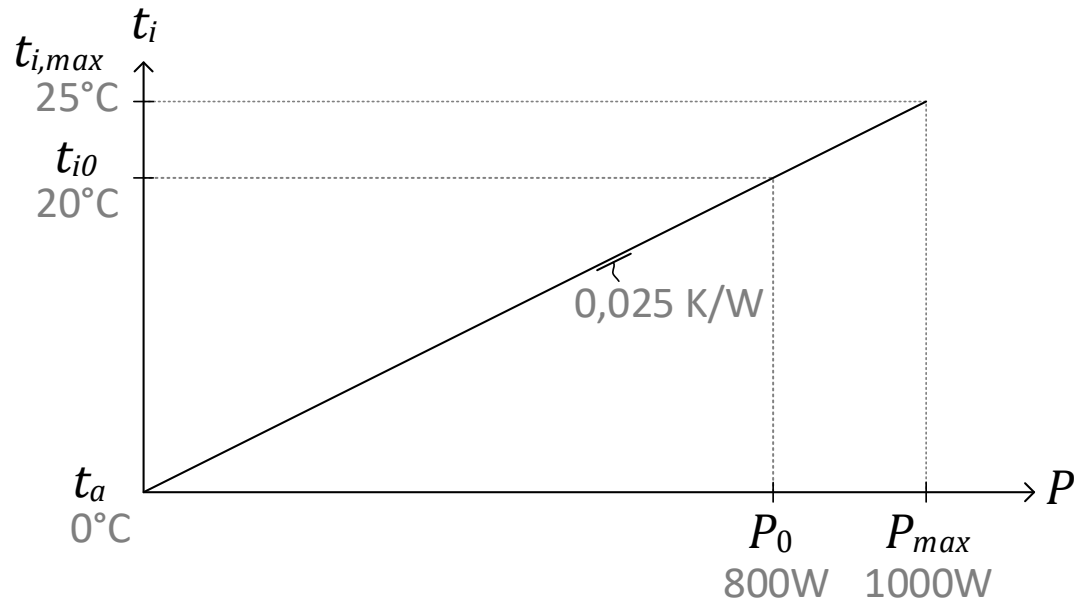
# Elektrische Raumbeheizung



$$P = \dot{Q}_a = (H_T + H_V)(t_i - t_a)$$



# Streckenkenlinie



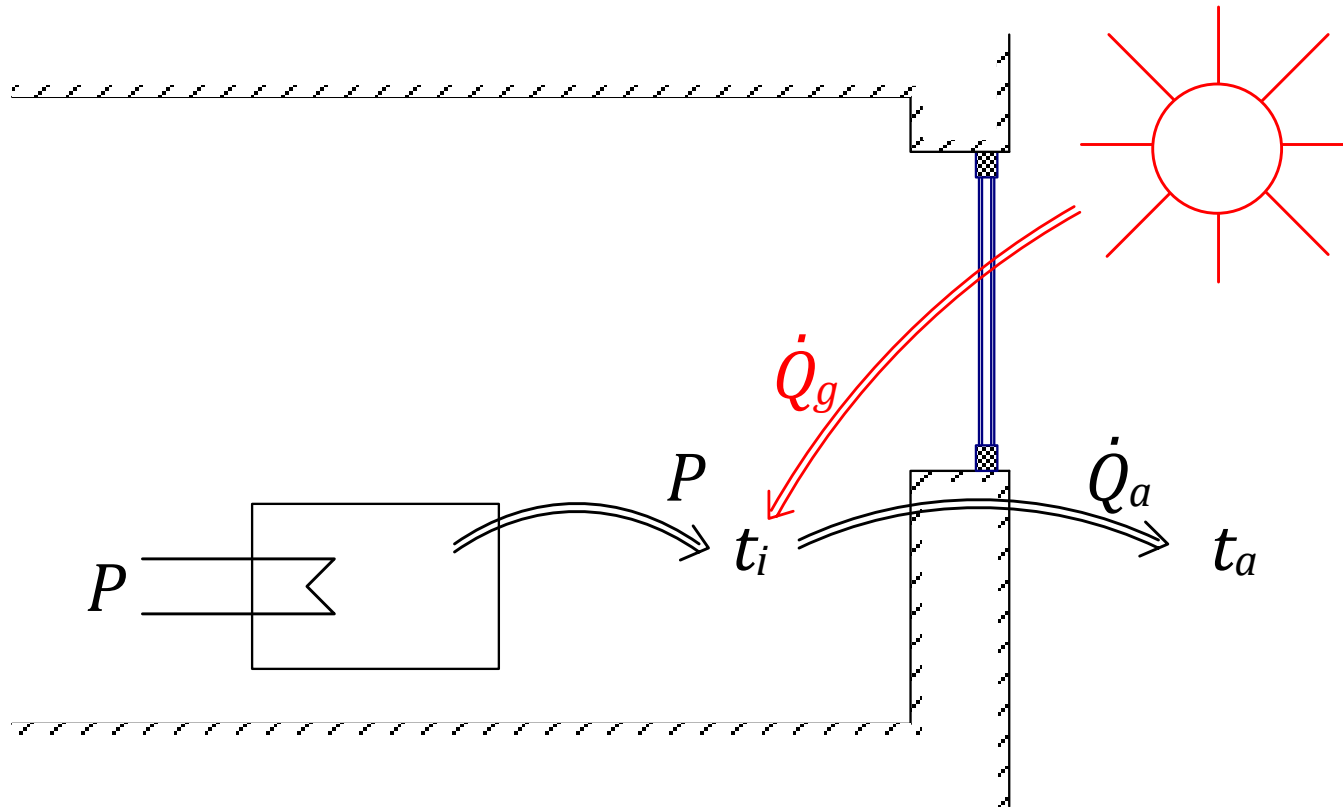
$K_{PS}$ : Proportionalkoeffizient Strecke

$Y_h$ : Stellbereich

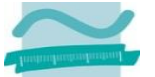
$X_{hS}$ : Regelbereich Strecke



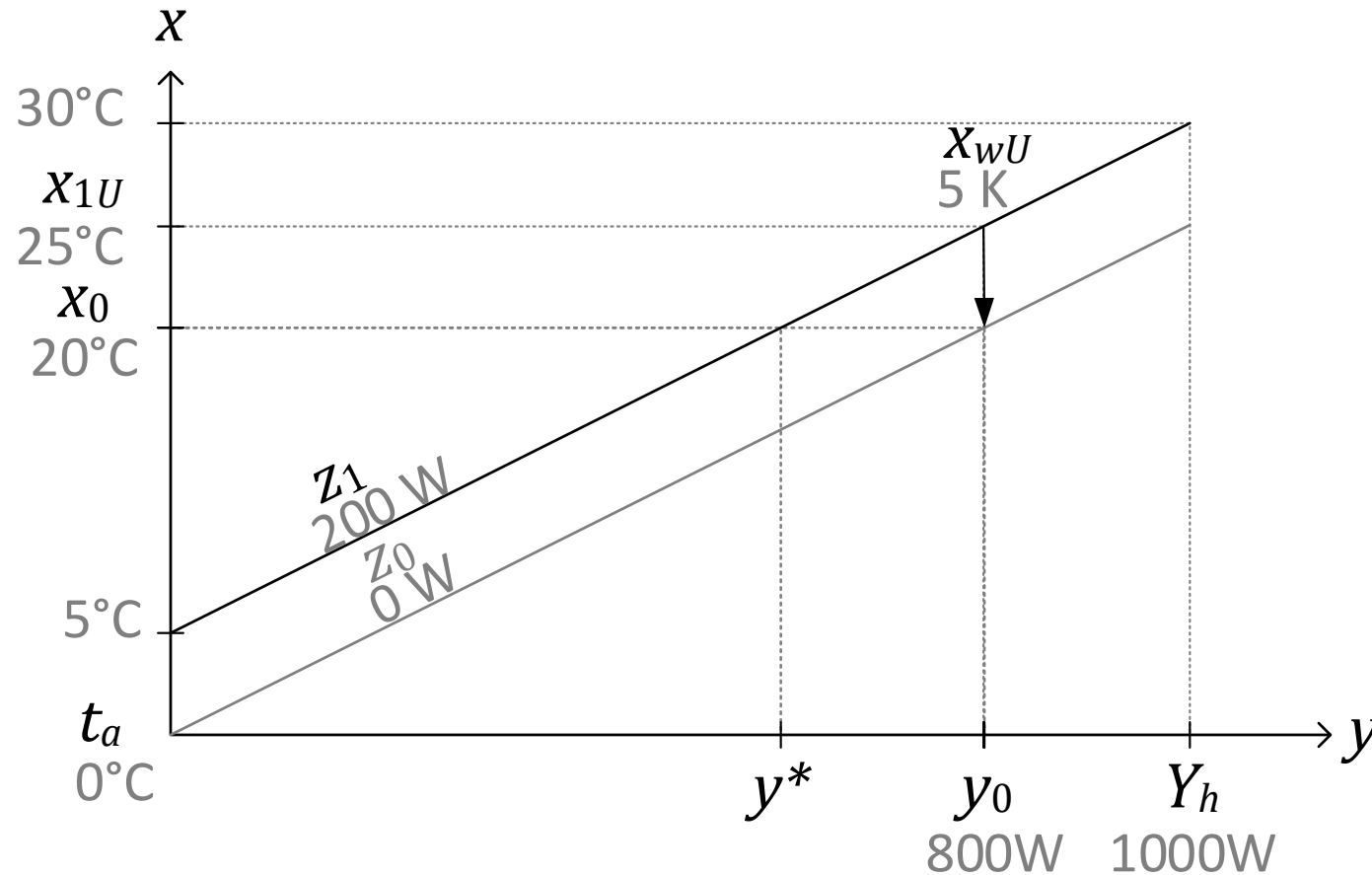
# Störung Wärmegewinn



$$P = \dot{Q}_a - \dot{Q}_g$$



# Streckenkenlinie nach Störung

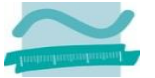


Regelabweichung ungeregelt:

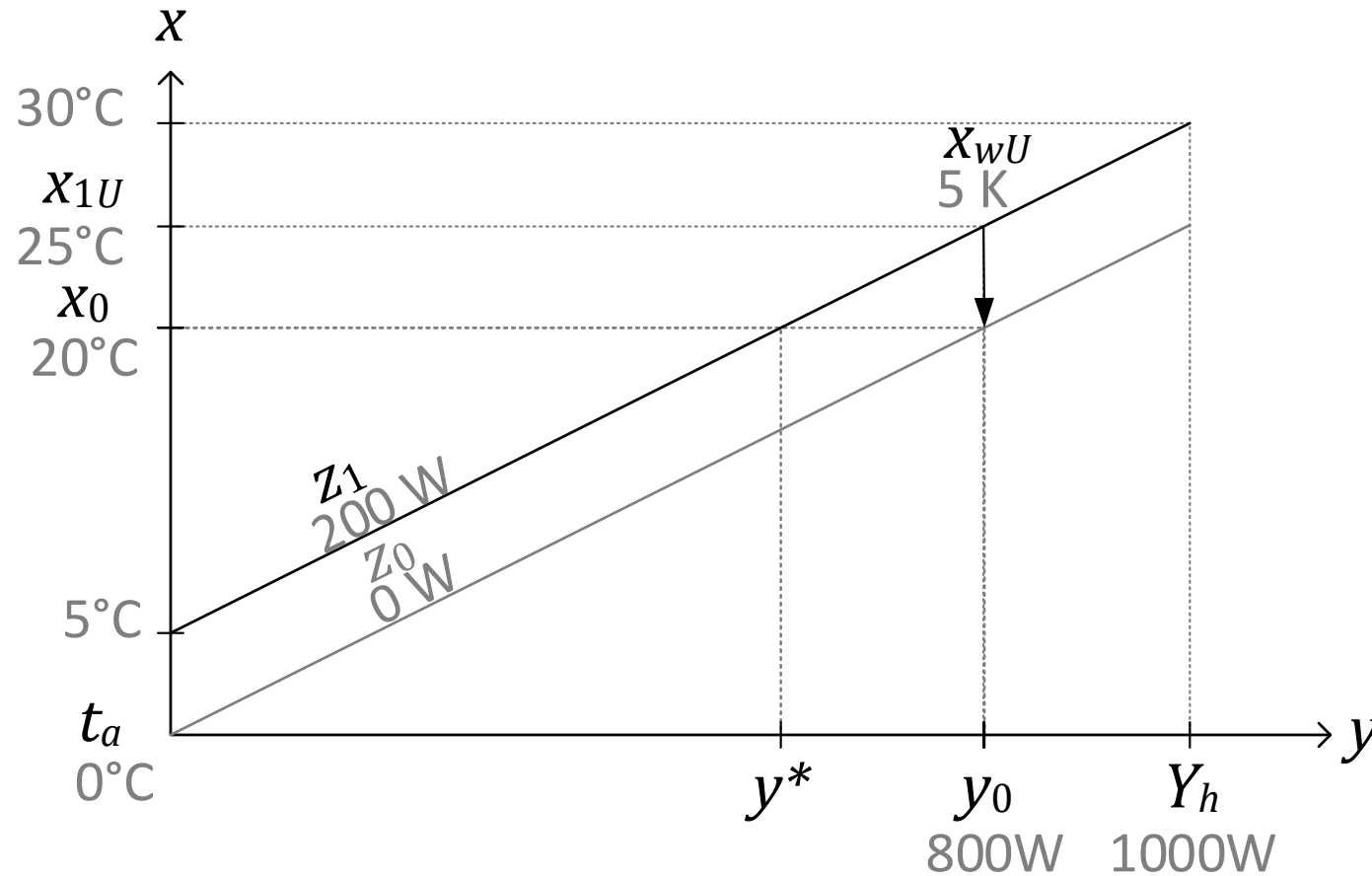
$$x_{wU} = x_{1U} - w_1$$

Hier:

$$x_{wU} = K_{PS} \Delta z$$



# Streckenkenlinie nach Störung



Regelabweichung ungeregelt:

$$x_{wU} = x_{1U} - w_1$$

Hier:

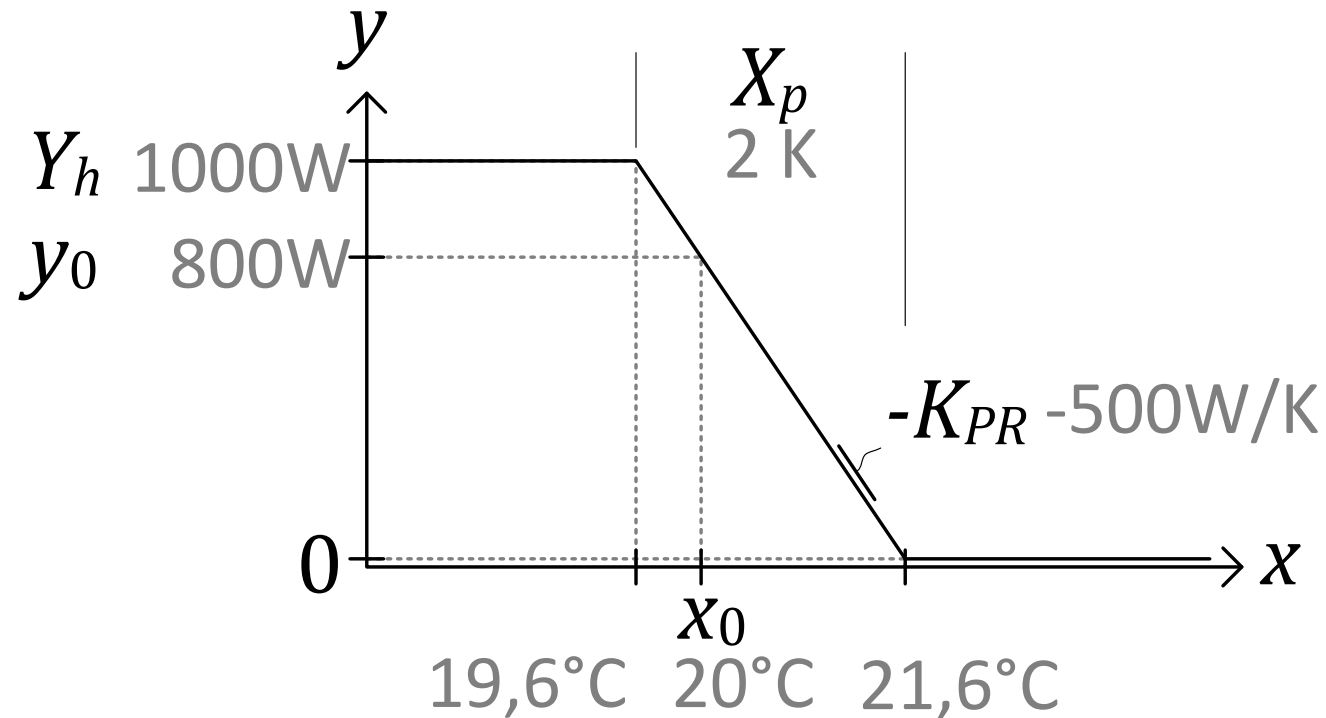
$$x_{wU} = K_{PS} \Delta z$$







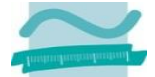
# Kennlinie der Regeleinrichtung



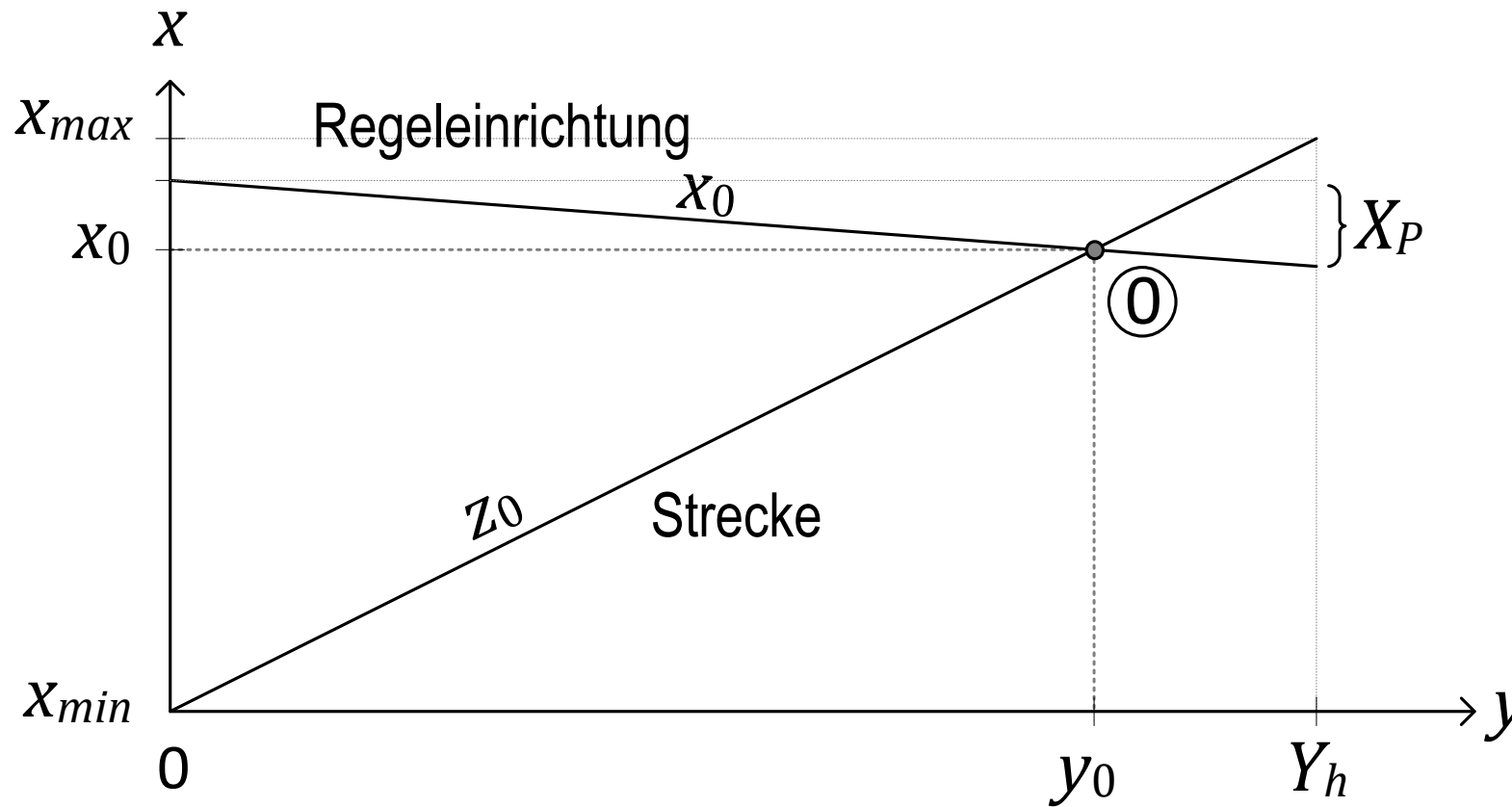
Proportionalbereich:  
 $X_P$

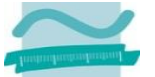
Proportionalkoeffizient:  
 $K_{PR} = \frac{Y_h}{X_P}$



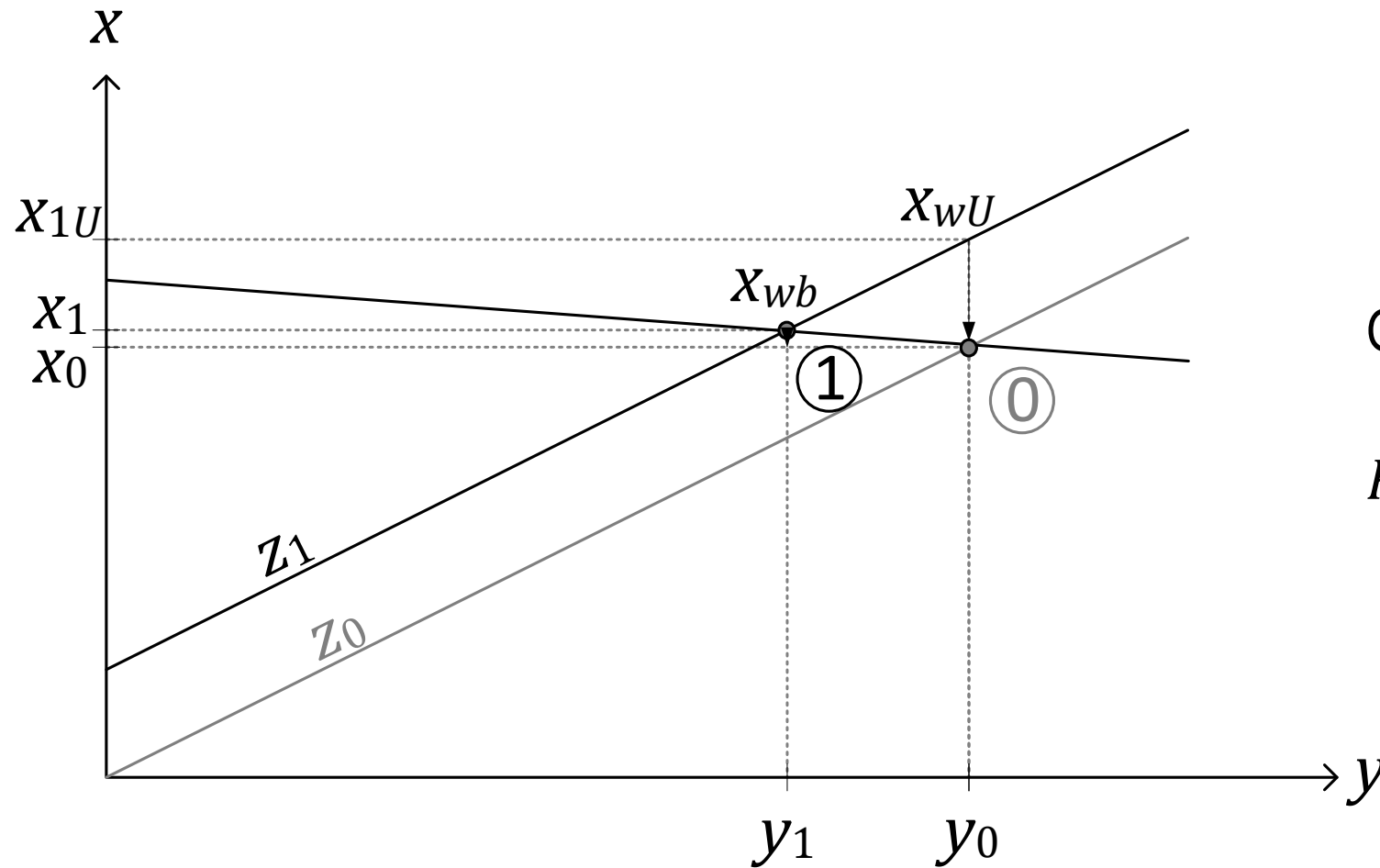


# Kennlinien im Regelkreis





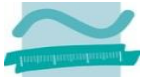
# Kennlinien im Regelkreis nach Störung (Störverhalten)



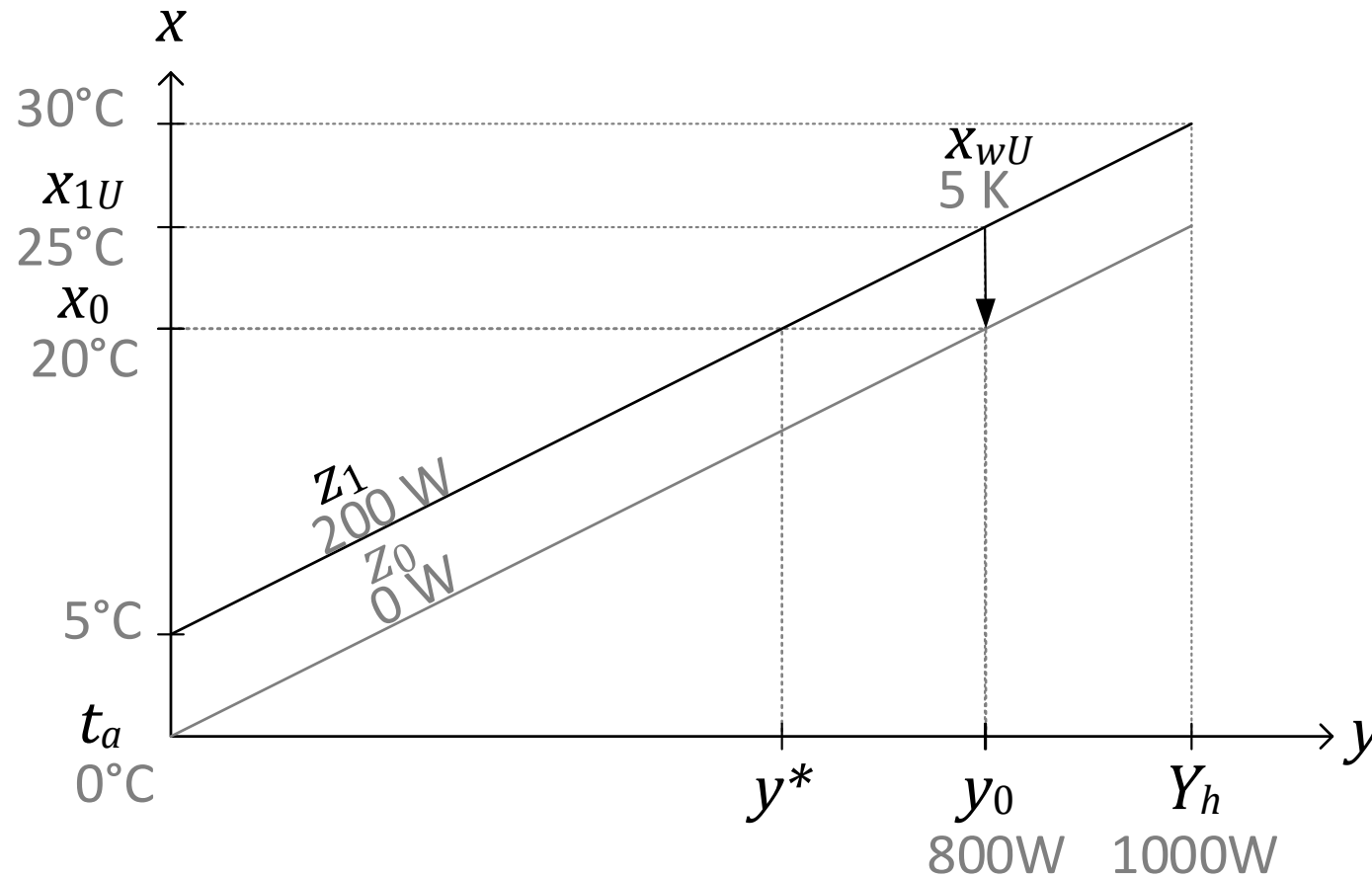
Gütemaß Regelfaktor:

$$R = \frac{x_{wb}}{x_{wU}}$$





# Streckenkenlinie nach Störung



Regelabweichung ungeregelt:

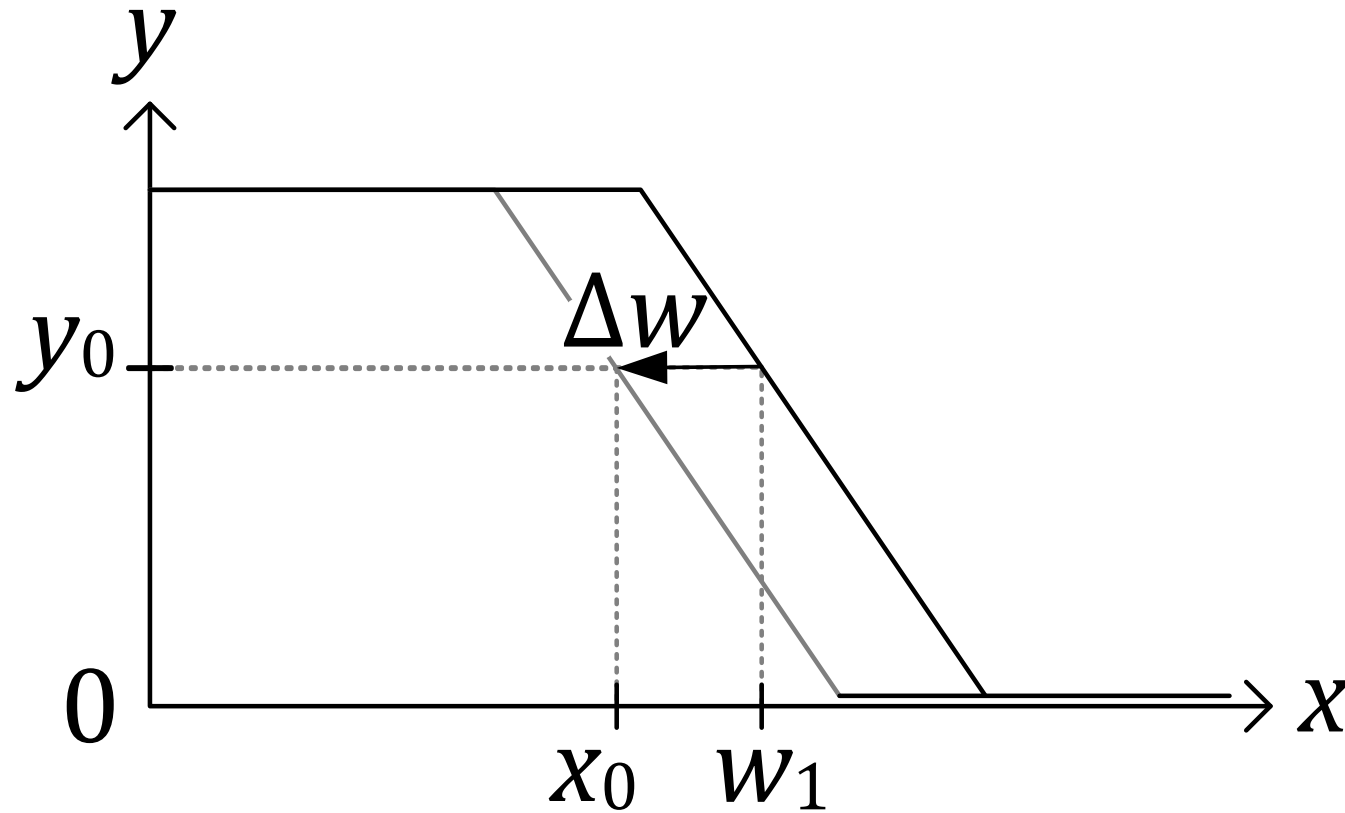
$$x_{wU} = x_{1U} - w_1$$

Hier:

$$x_{wU} = K_{PS} \Delta z$$



# Kennlinie der Regeleinrichtung nach Nutzereingriff

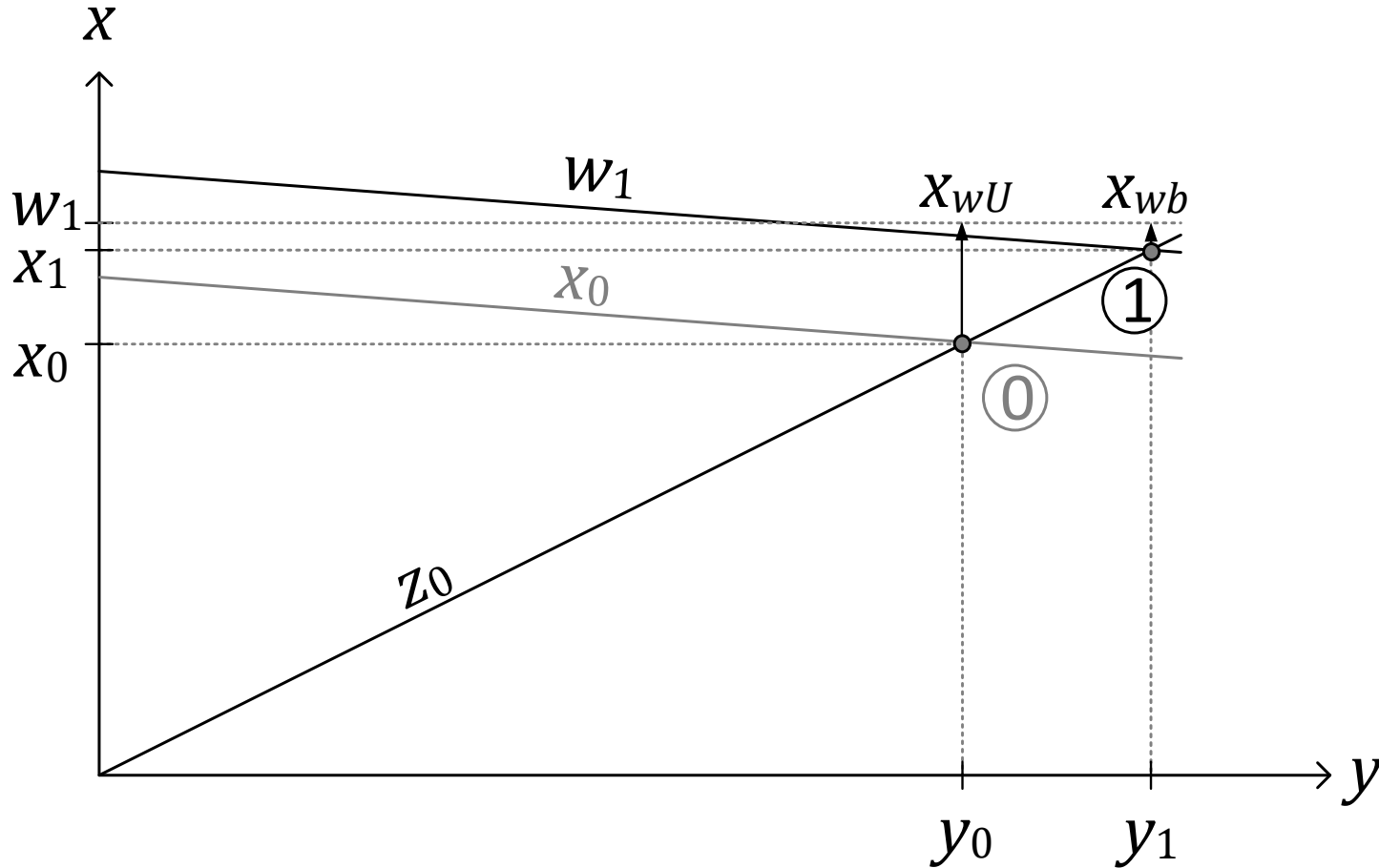


Regelabweichung ungeregelt:  
 $x_{wU} = -\Delta w$



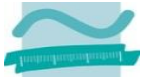


# Kennlinien im Regelkreis nach Nutzereingriff (Führungsverhalten)

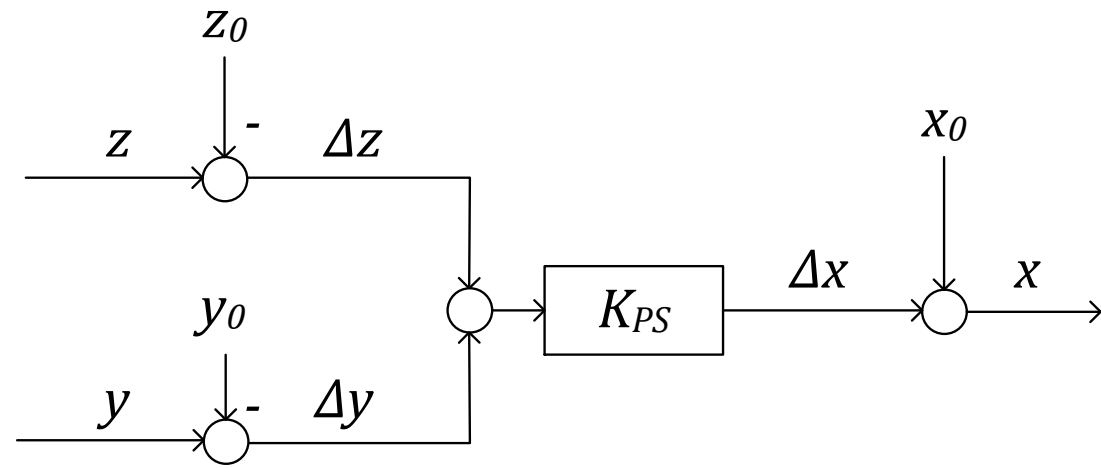
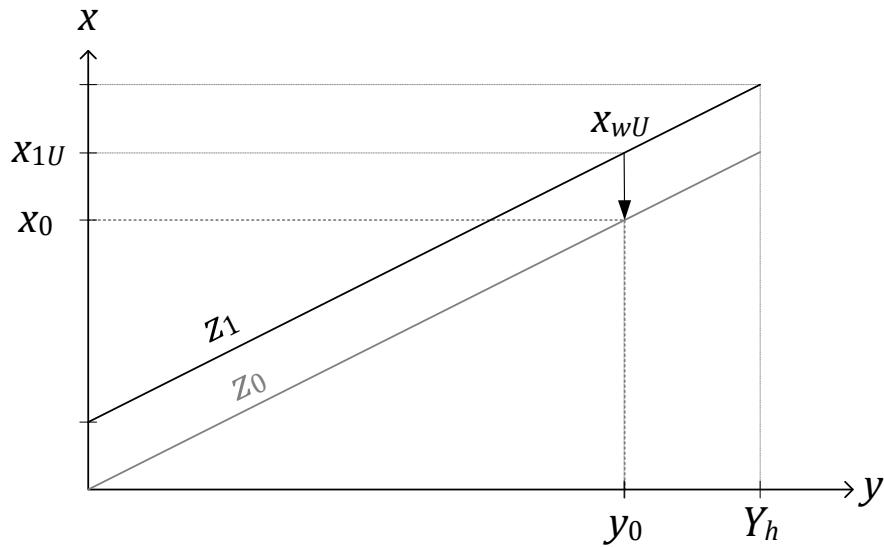


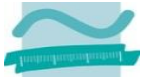
Gütemaß Regelfaktor:

$$R = \frac{x_{wb}}{x_{wU}}$$



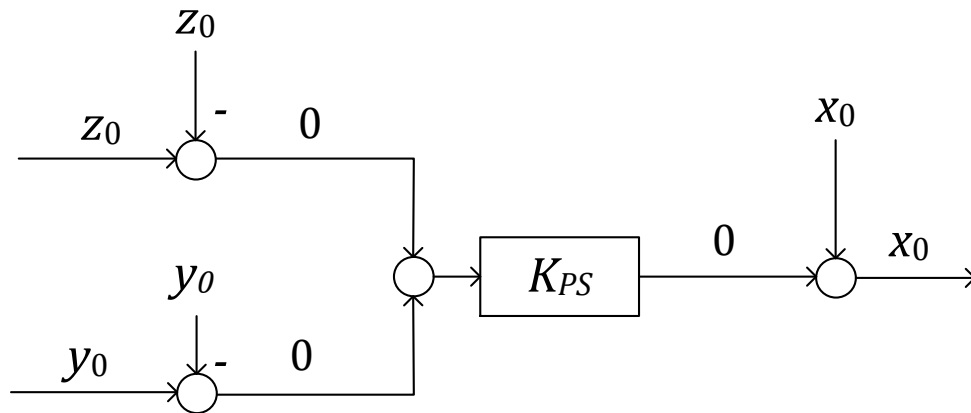
# Wirkungsplan Strecke mit Störgrößenangriff am Eingang



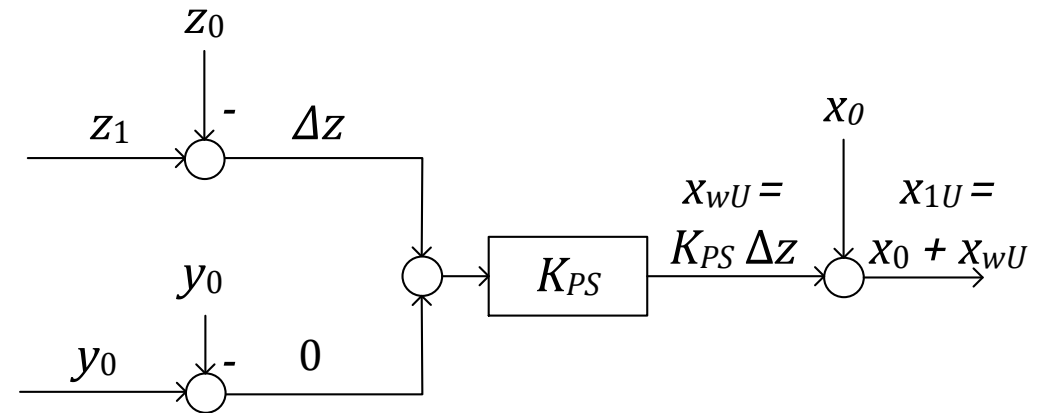


# Strecke im Grundzustand und nach Störung

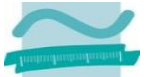
GRUNDZUSTAND



NACH STÖRUNG

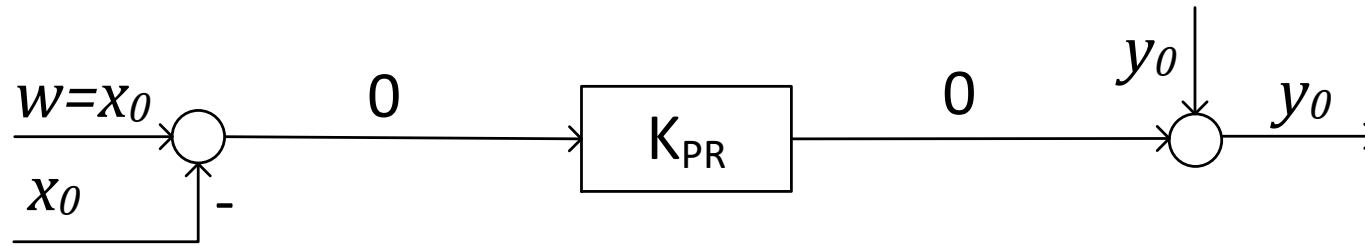




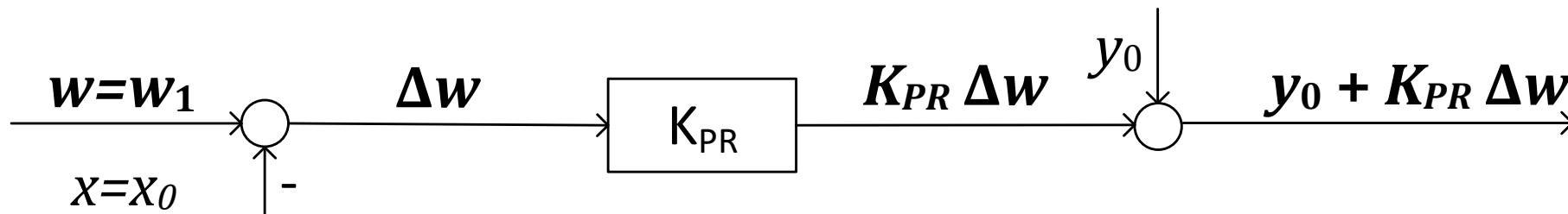


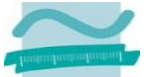
# Regeleinrichtung im Grundzustand und nach Nutzereingriff

## GRUNDZUSTAND

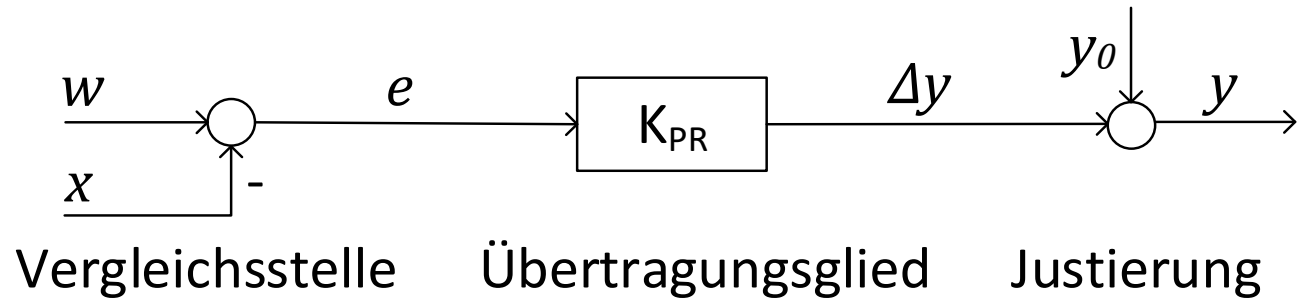
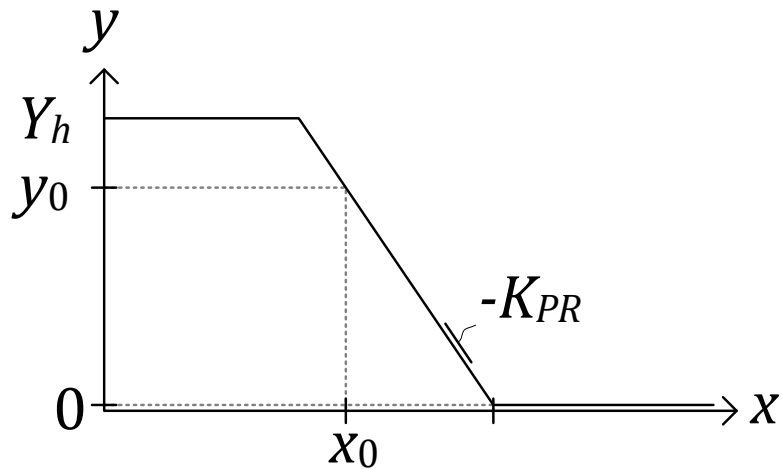


## NACH NUTZEREINGRIFF





# Wirkungsplan Regeleinrichtung



$e$ : Regeldifferenz

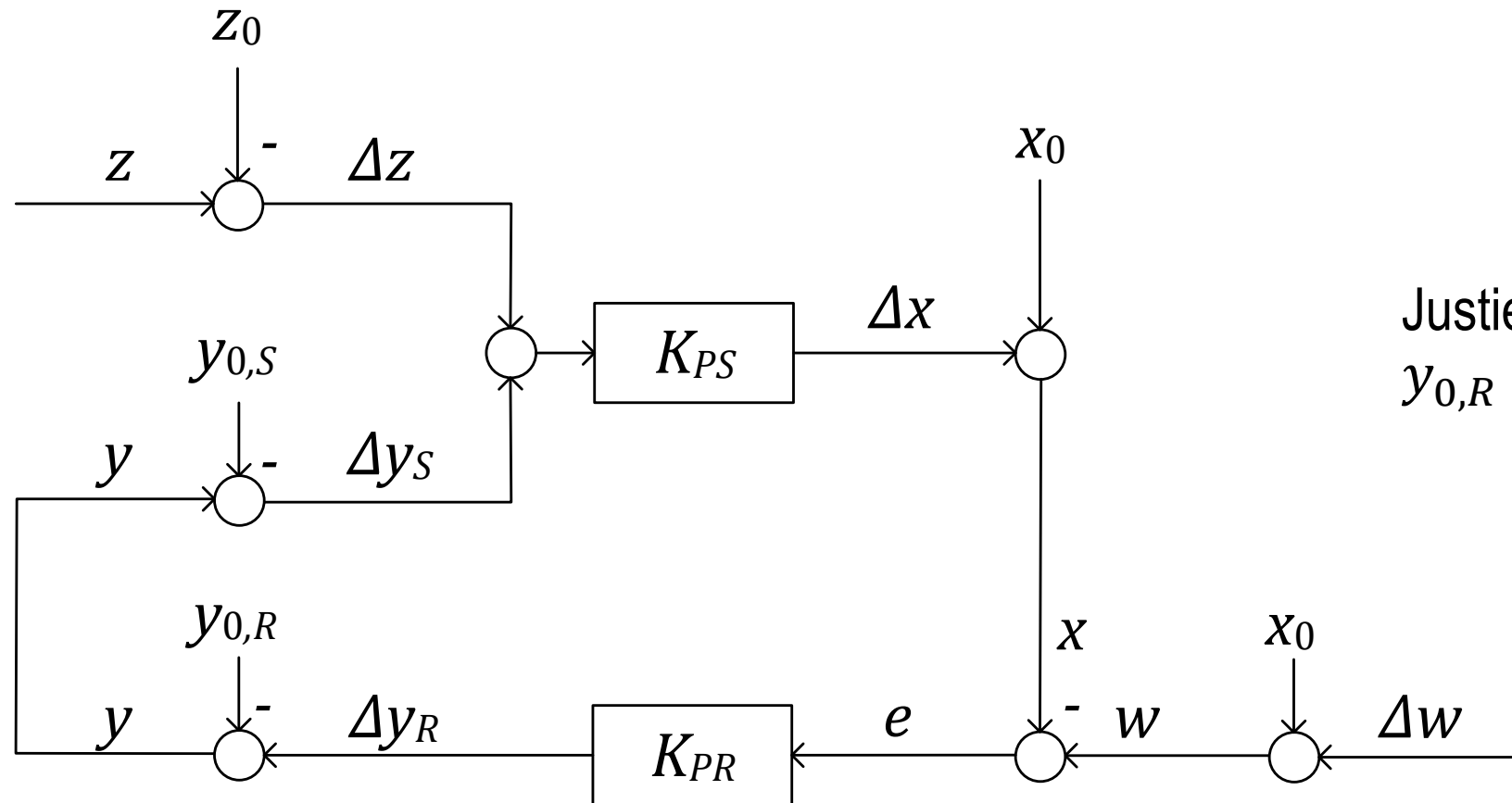
$\Delta y$ : Regeleingriff

$y_0$ : justierter Wert der Stellgröße

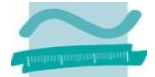




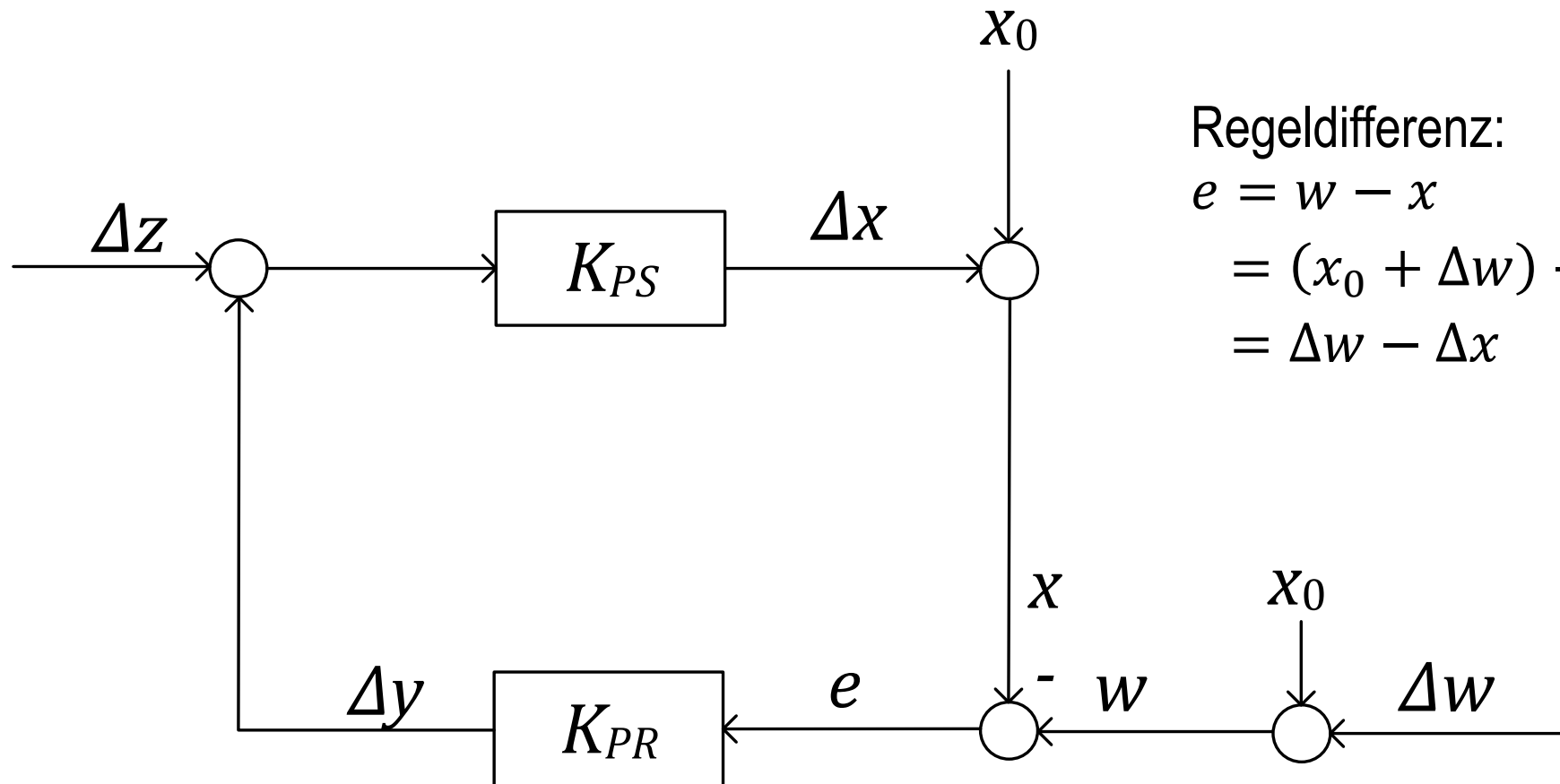
## Wirkungsplan Regelkreis (Störgrößenangriff am Streckeneingang)



Justierung:  
 $y_{0,R} = y_{0,S} = y_0$



# Wirkungsplan Regelkreis nach Justierung

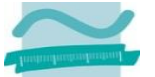


Regeldifferenz:

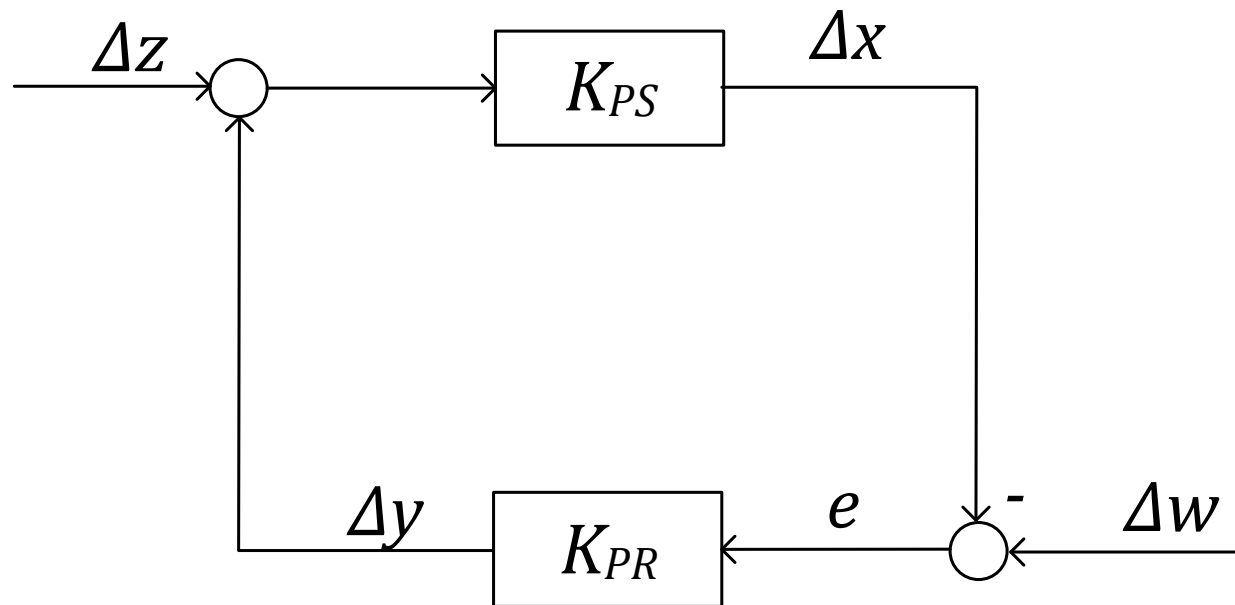
$$e = w - x$$

$$= (x_0 + \Delta w) - (x_0 + \Delta x)$$

$$= \Delta w - \Delta x$$



# Wirkungsplan Regelkreis ausschließlich mit Differenzgrößen



## STÖRVERHALTEN

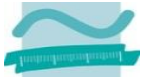
$$\Delta w = 0$$

- nur Störung

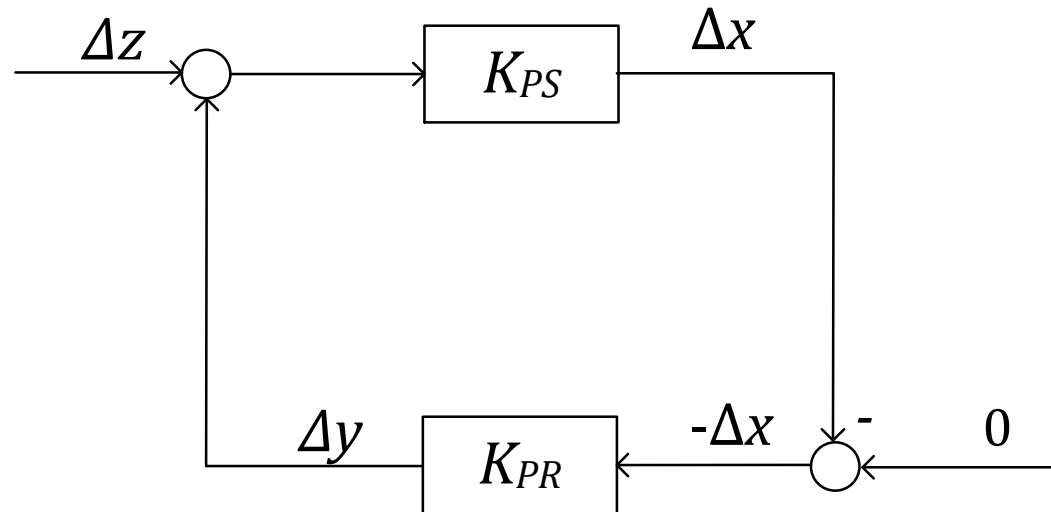
## FÜHRUNGSVERHALTEN

$$\Delta z = 0$$

- nur Nutzereingriff



# Störverhalten



## REGELABWEICHUNG UNGEREGELT

$$x_{wU} = K_{PS} \Delta z$$

## BLEIBENDE REGELABWEICHUNG

$$\Delta x = K_{PS} (\Delta z + \Delta y) \quad (1)$$

$$\Delta y = -K_{PR} \Delta x \quad (2)$$

(2) in (1):

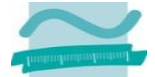
$$\Delta x = -K_{PS} K_{PR} \Delta x + K_{PS} \Delta z$$

$$x_{wb} = \Delta x = \frac{K_{PS} \Delta z}{1 + K_{PS} K_{PR}} = \frac{1}{1 + K_{PS} K_{PR}} x_{wU}$$

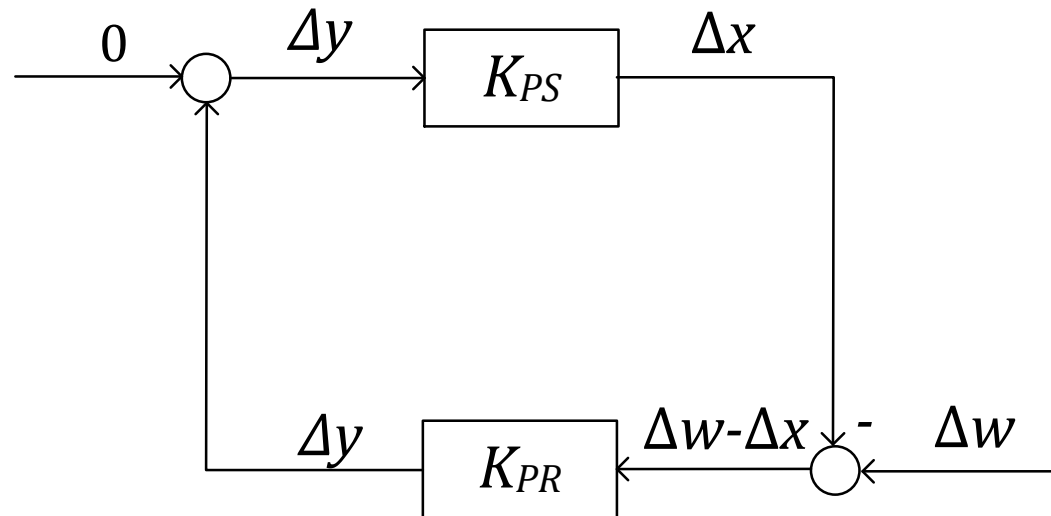
## REGELFAKTOR

$$R = \frac{x_{wb}}{x_{wU}} = \frac{1}{1 + K_{PS} K_{PR}}$$





# Führungsverhalten



## REGELABWEICHUNG UNGEREGELT

$$x_{wU} = - \Delta w$$

## BLEIBENDE REGELABWEICHUNG

$$\Delta x = K_{PS} \Delta y \quad (1)$$

$$\Delta y = K_{PR} (\Delta w - \Delta x) \quad (2)$$

(2) in (1):

$$\Delta x = K_{PS} K_{PR} \Delta w - K_{PS} K_{PR} \Delta x$$

$$\Delta x = \frac{K_{PS} K_{PR} \Delta w}{1 + K_{PS} K_{PR}} = - \frac{K_{PS} K_{PR} x_{wU}}{1 + K_{PS} K_{PR}}$$

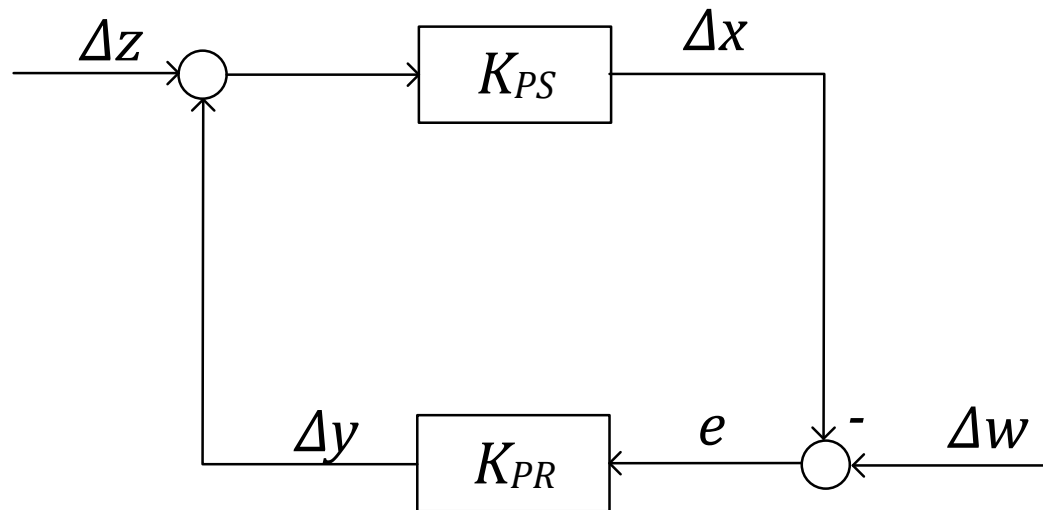
$$x_{wb} = \Delta x - \Delta w = \frac{1}{1 + K_{PS} K_{PR}} x_{wU}$$

## REGELFAKTOR

$$R = \frac{x_{wb}}{x_{wU}} = \frac{1}{1 + K_{PS} K_{PR}}$$



# Kreisverstärkung



## KREISVERSTÄRKUNG

$$V_0 = K_{PS} K_{PR}$$

## REGELFAKTOR

$$R = \frac{1}{1 + V_0}$$

## KRITISCHE KREISVERSTÄRKUNG

$$V_{0,krit}$$

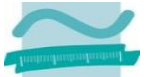
- Regelkreis schwingt gleichmäßig

## OPTIMALE KREISVERSTÄRKUNG

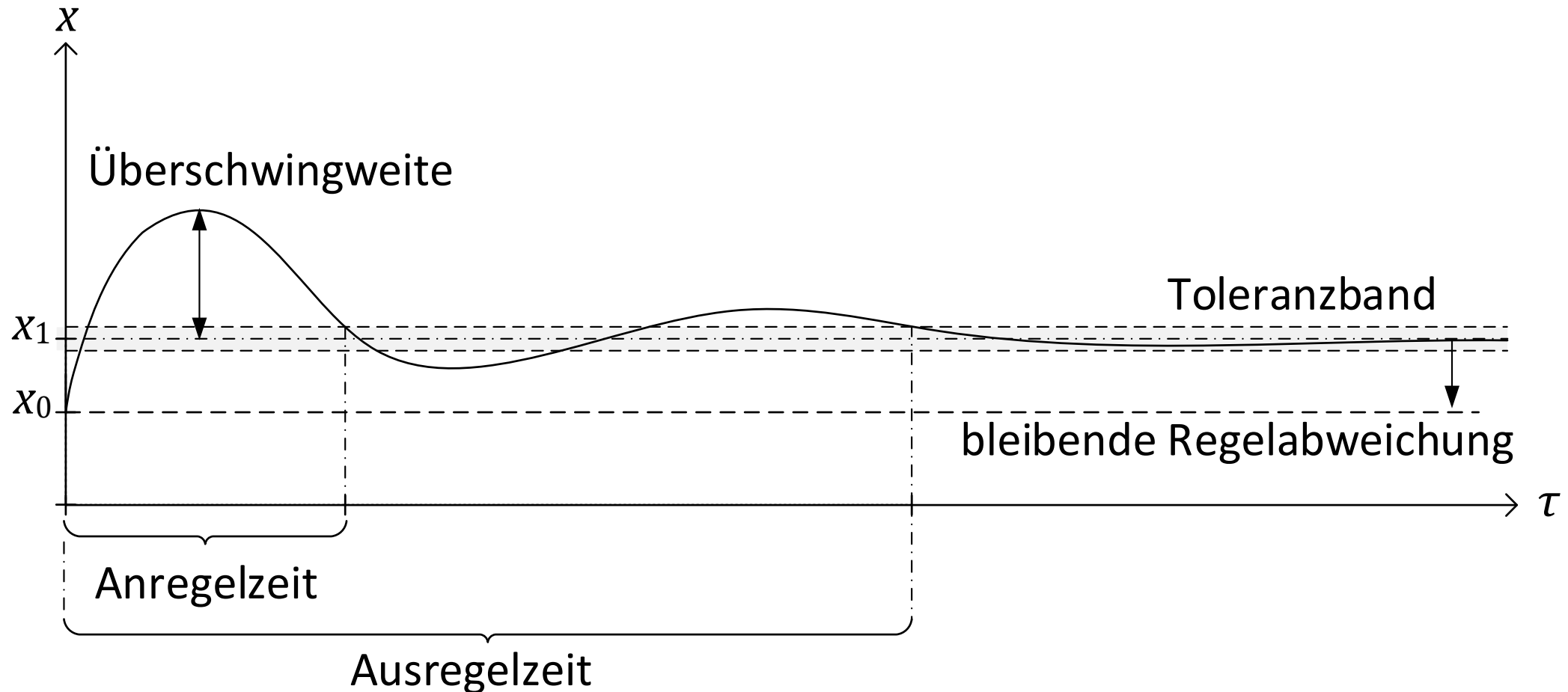
$$V_{0,opt} = V_{0,krit} / 2 \quad (\text{P-Regelung})$$

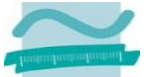




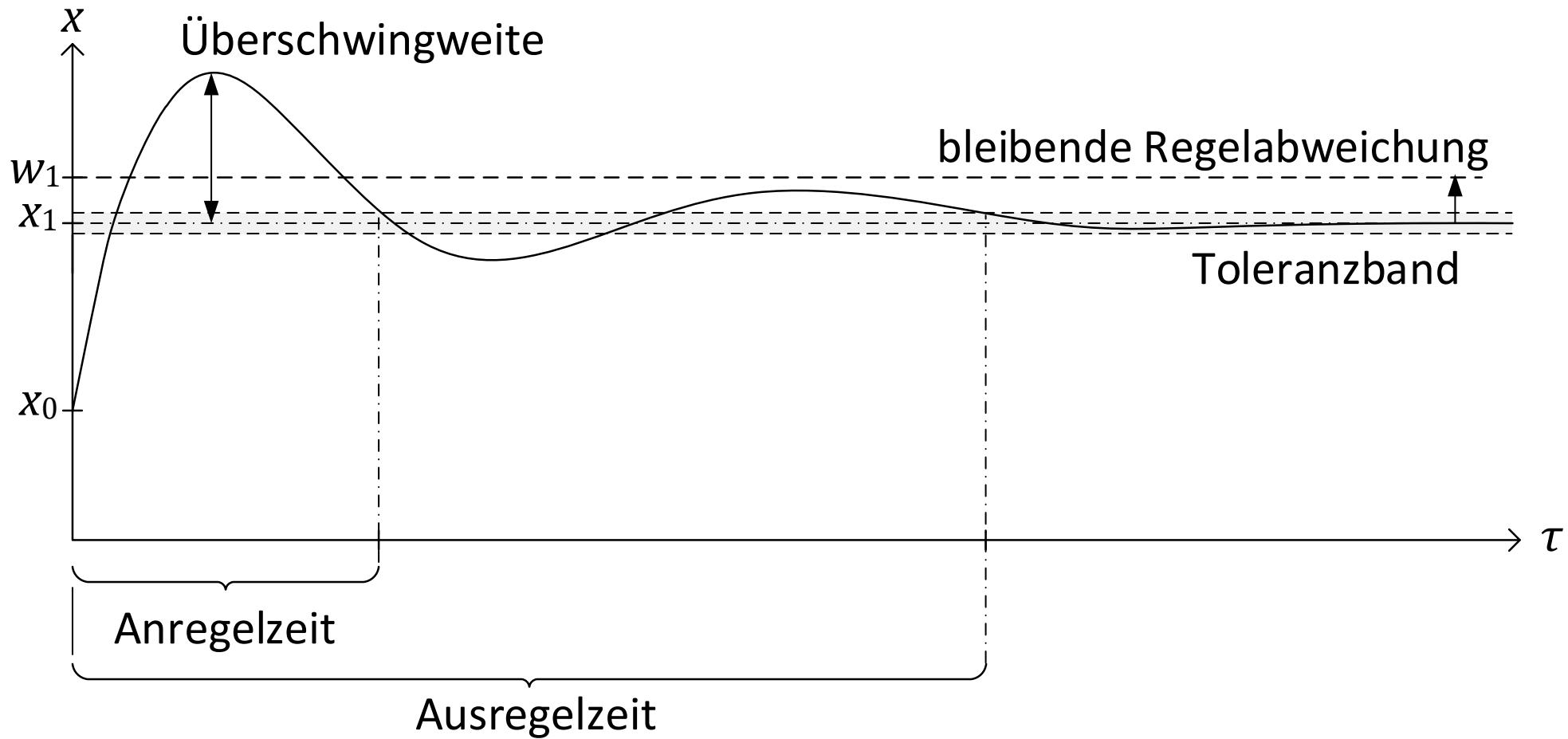


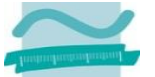
# Statische und dynamische Gütekriterien im Störverhalten



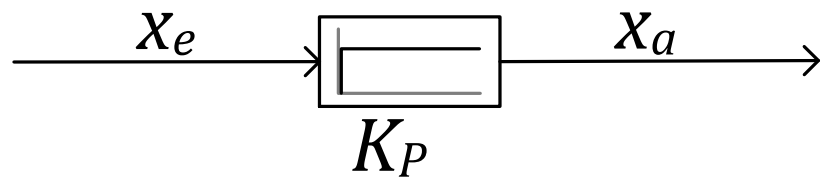
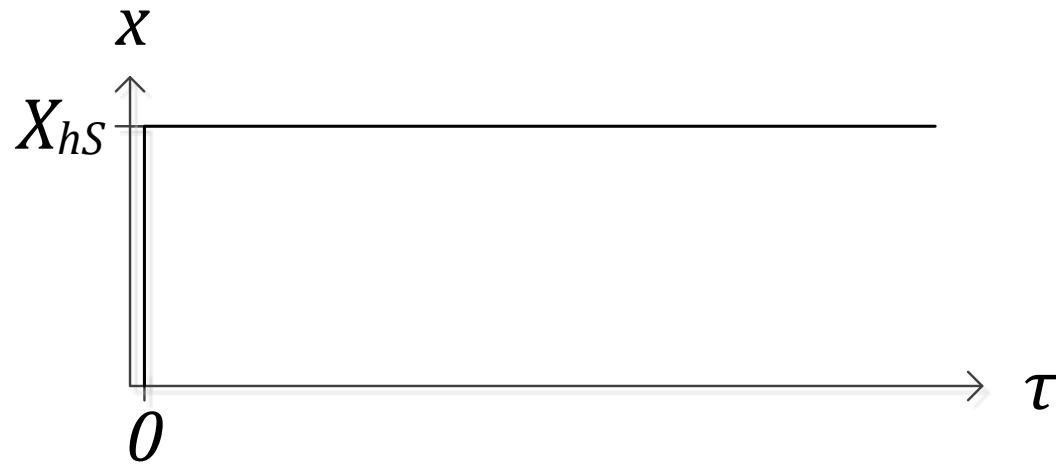
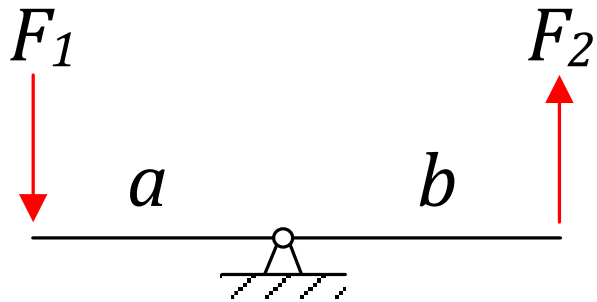


# Statische und dynamische Gütekriterien im Führungsverhalten

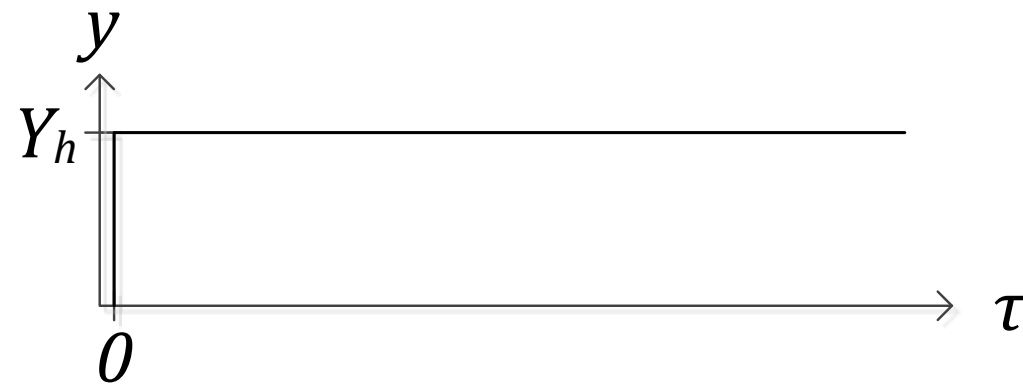


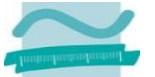


# Proportionalglied (P-Glied)

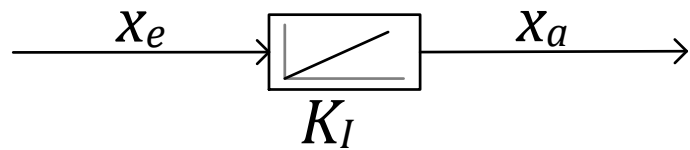
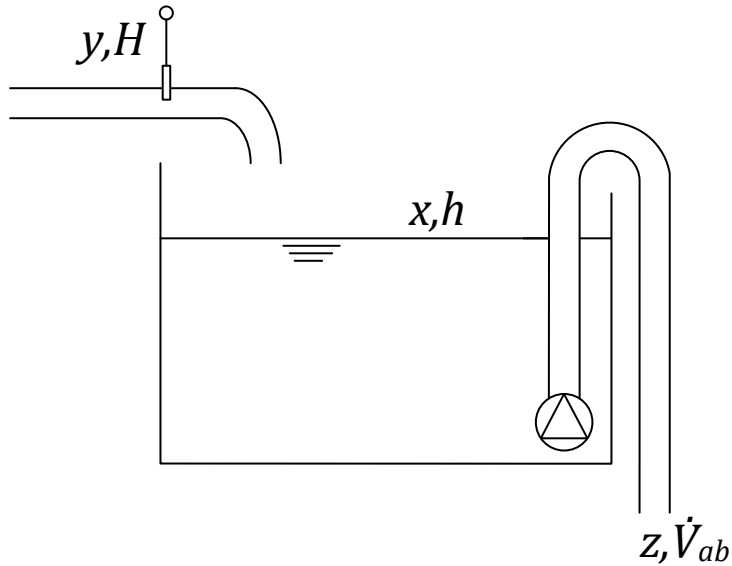


$$x_a = K_P x_e$$

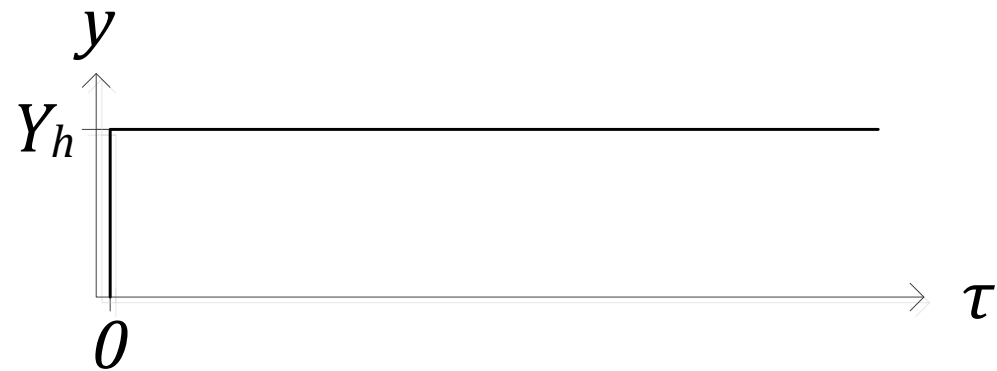
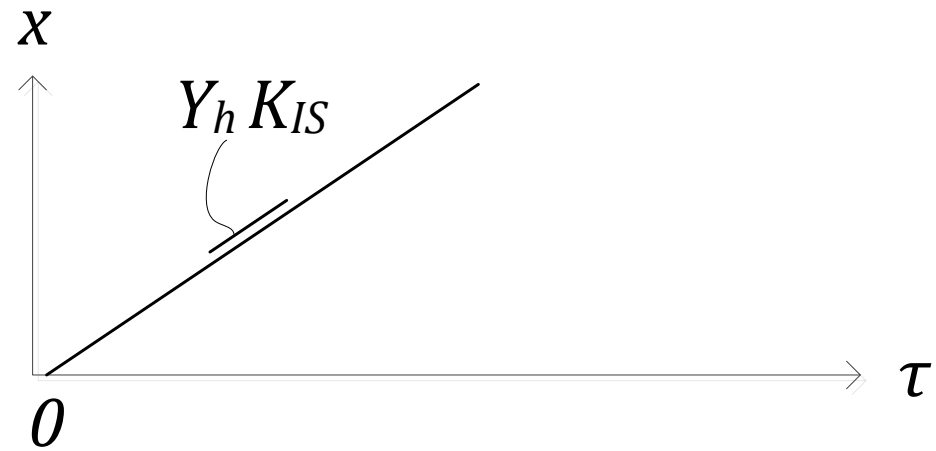




# Integrierglied (I-Glied)

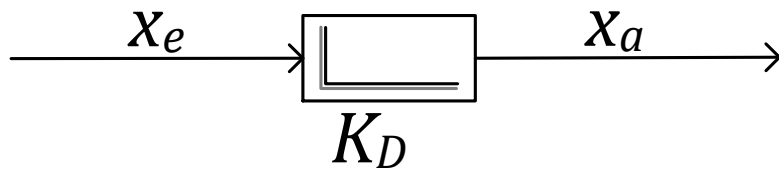


$$x_a = x_{a0} + K_I \int x_e(\tau) d\tau$$

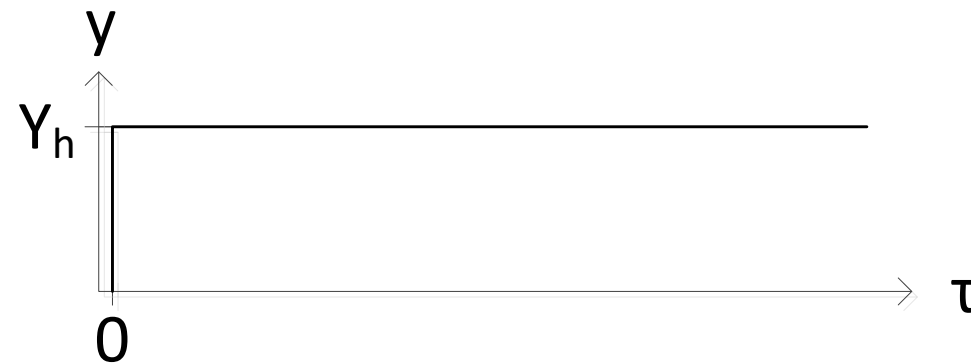


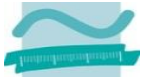


# Differenzierglied (D-Glied)

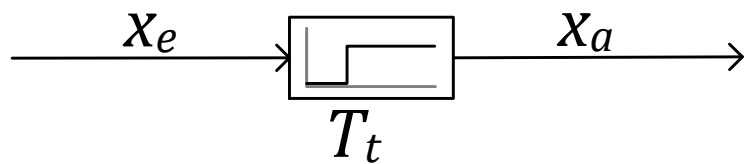
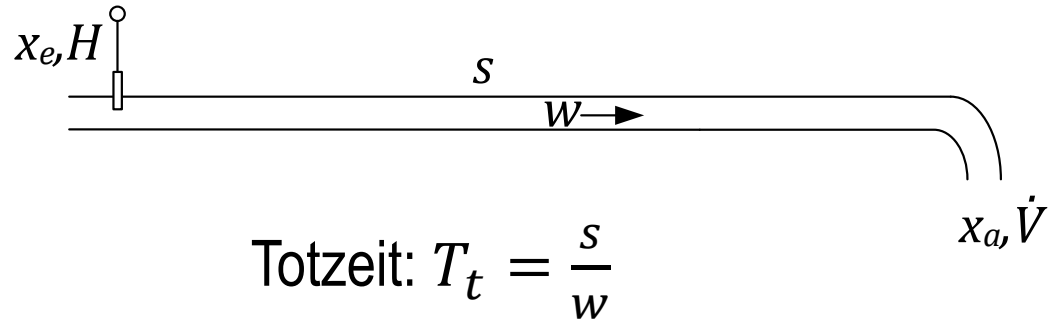


$$\dot{x}_a = K_D x_e$$



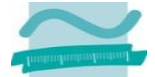


# Totzeitglied ( $T_t$ -Glieder)

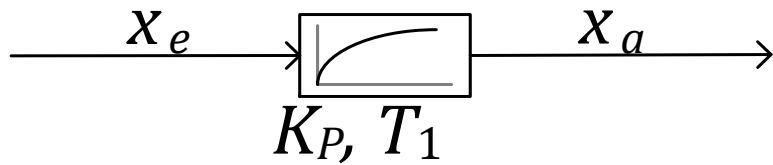
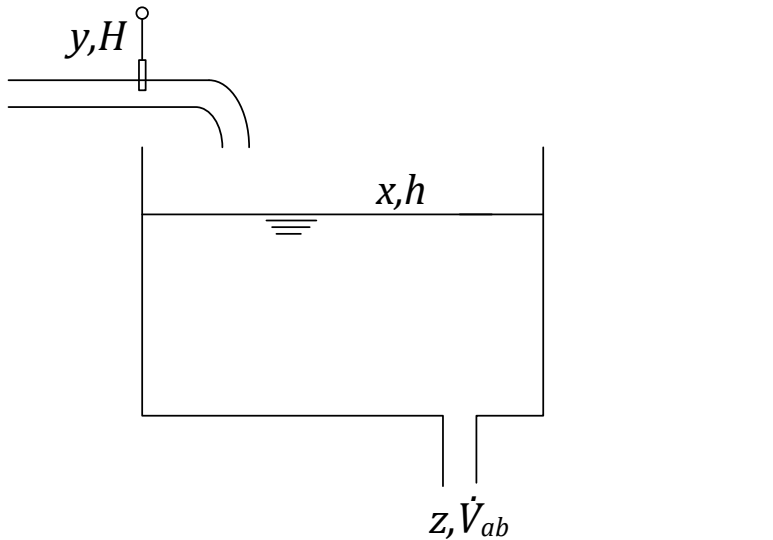


$$x_a(\tau) = x_e(\tau - T_t)$$

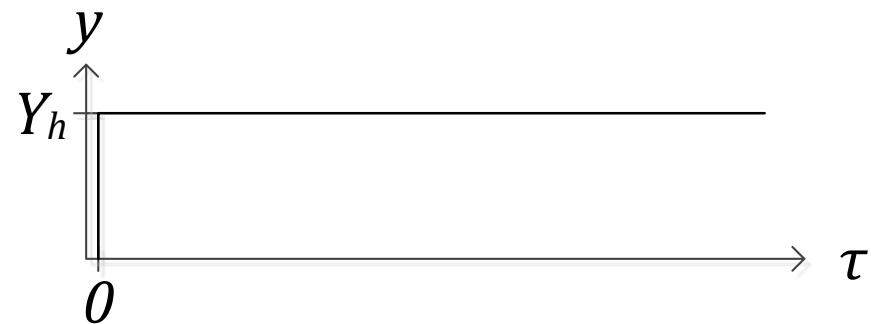
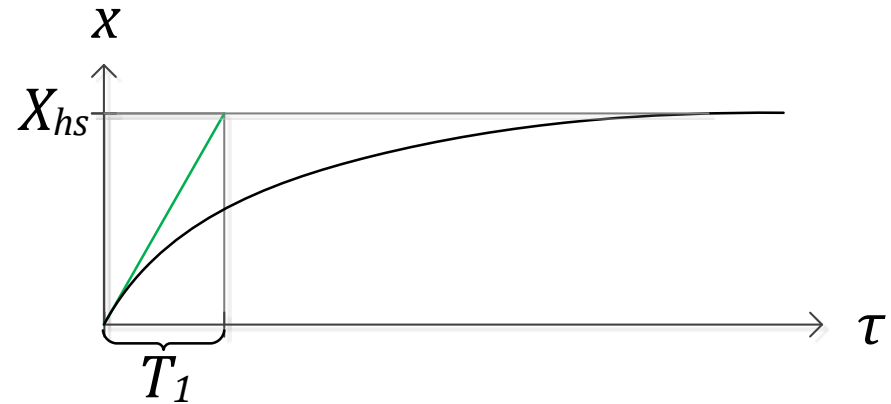




# Verzögerungsglied 1. Ordnung (PT<sub>1</sub>-Glied)

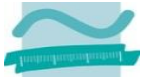


$$T_1 \dot{x}_a + x_a = K_P x_e$$

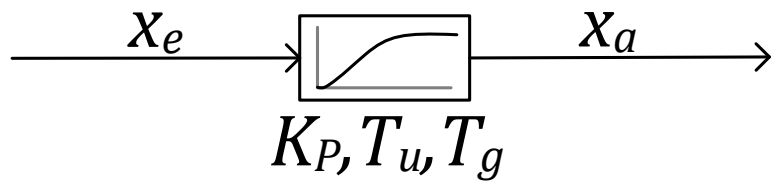


$T_1$ : Zeitkonstante, Verzögerungszeit

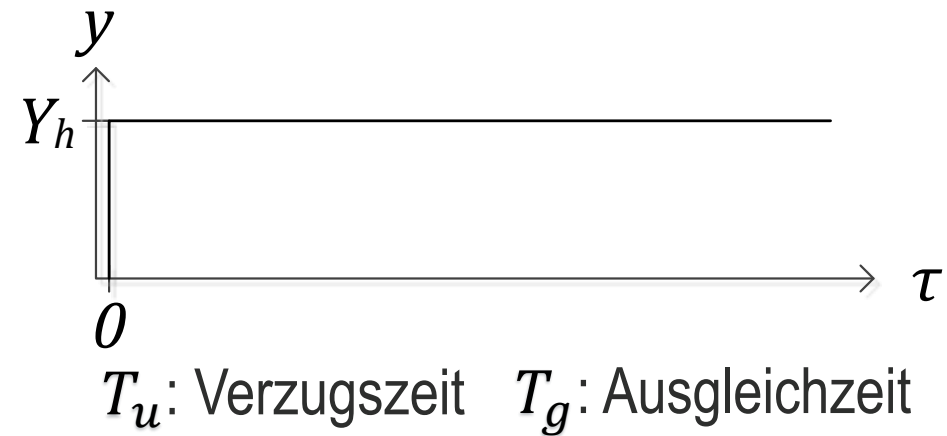
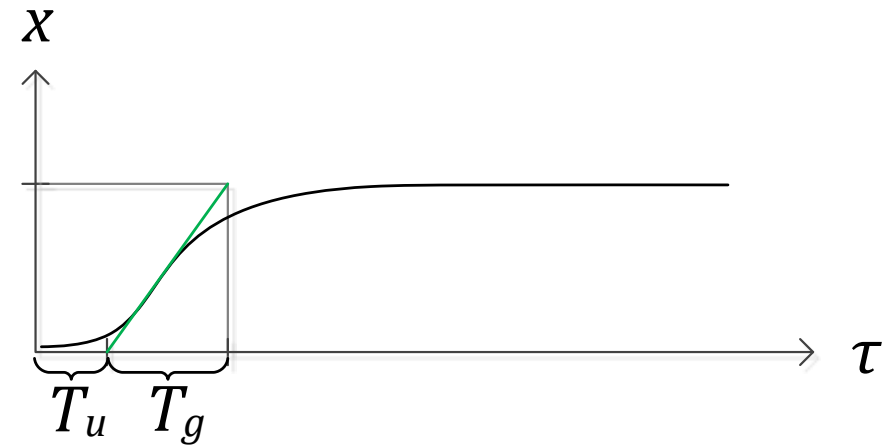




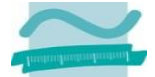
# Verzögerungsglied höherer Ordnung (PT<sub>n</sub>-Glied)



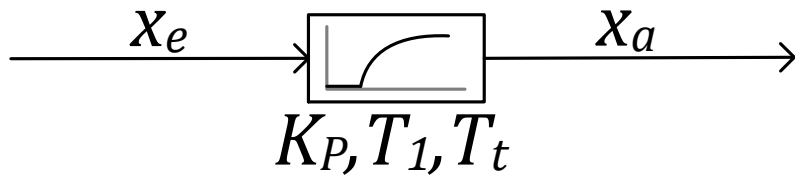
Zeitverhalten unbekannt



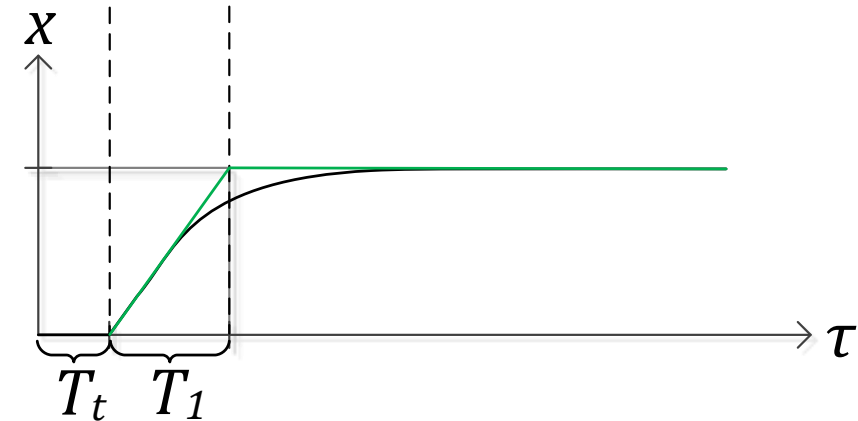
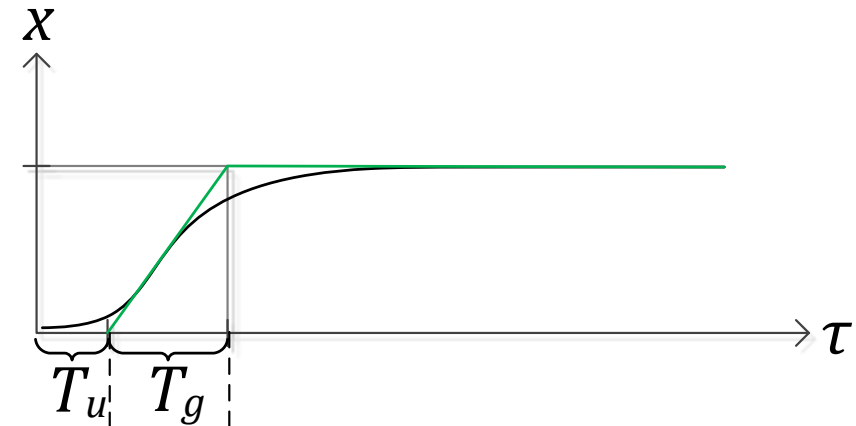




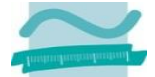
# Verzögerungsglied mit Totzeit (PT<sub>1</sub>-T<sub>t</sub>-Glied)



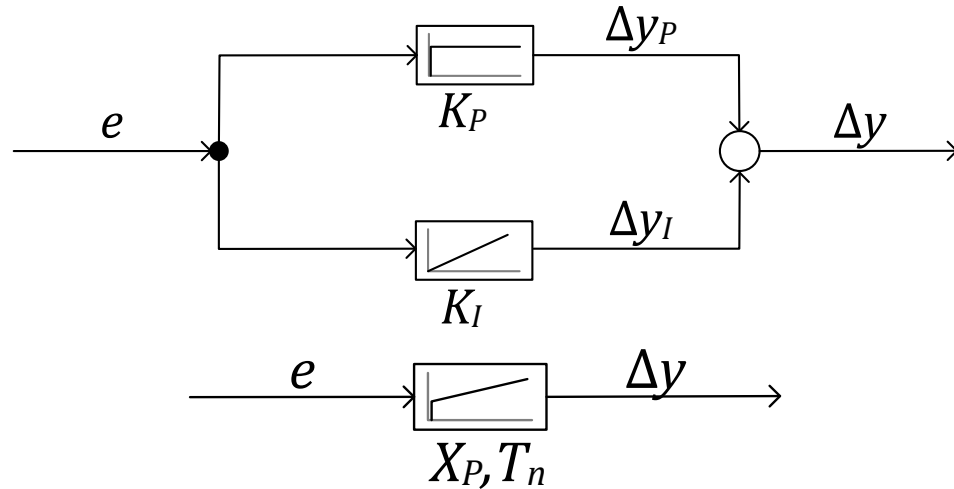
$$T_1 \dot{x}_a + x_a = K_P x_e (\tau - T_t)$$



$T_u$ : Ersatztotzeit  $T_g$ : Ersatzzeitkonstante



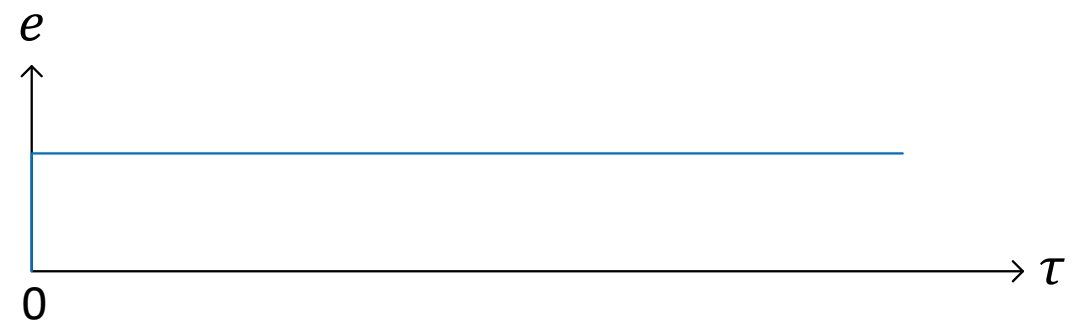
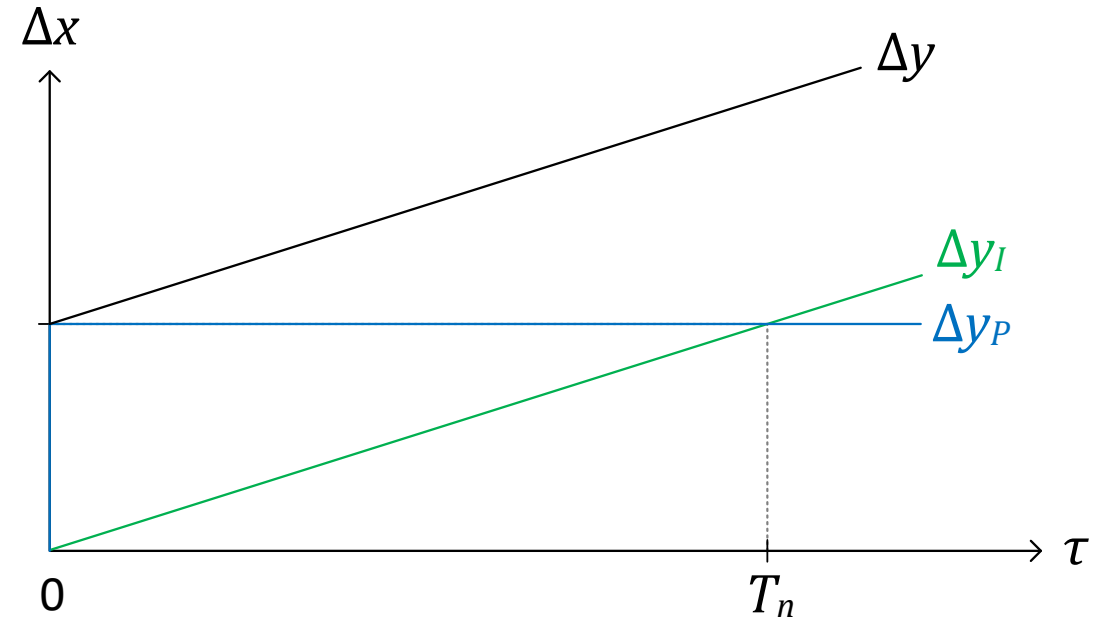
# PI-Glied



$$\begin{aligned} \Delta y &= \Delta y_P + \Delta y_I \\ &= K_{PR} e + K_{IR} \int e d\tau \\ &= K_{PR} \left( e + \frac{1}{T_n} \int e d\tau \right) \end{aligned}$$

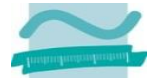
$T_n$ : Nachstellzeit

$\Delta y_P$ : P-Anteil

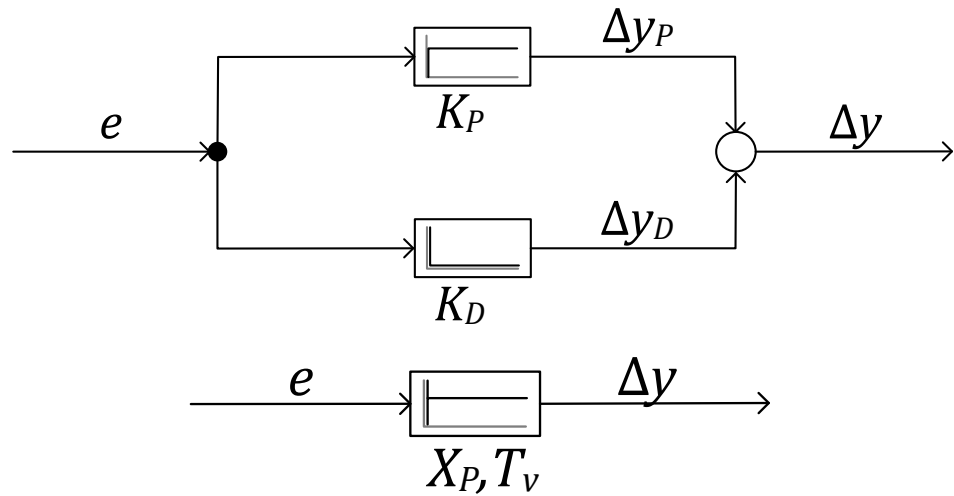


$\Delta y_I$ : I-Anteil





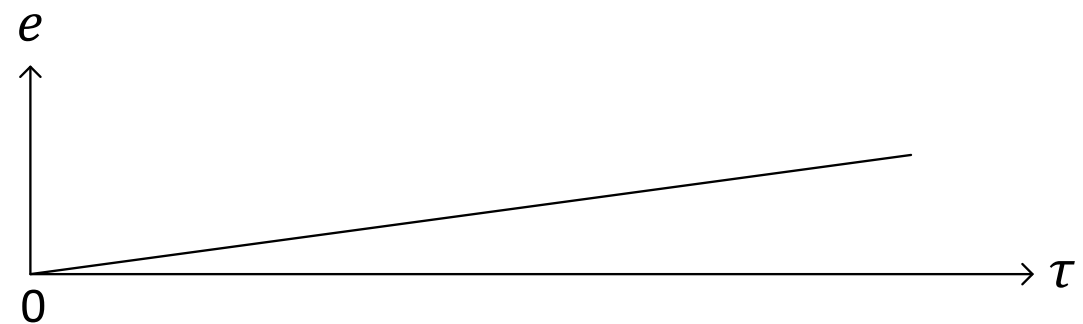
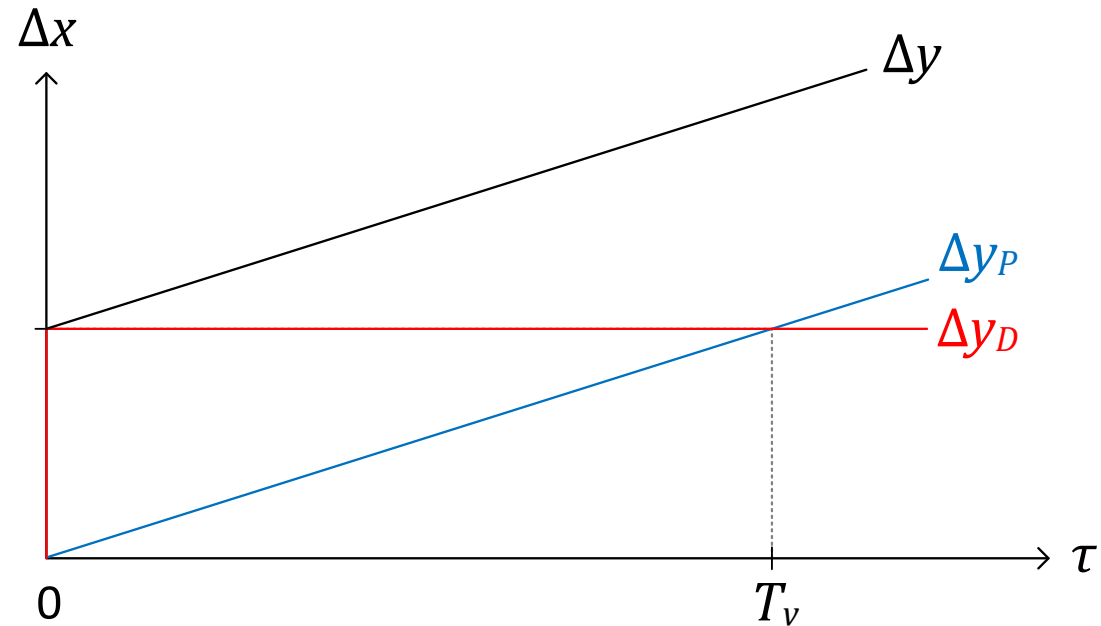
# PD-Glied

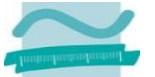


$$\begin{aligned} \Delta y &= \Delta y_P + \Delta y_D \\ &= K_{PR} e + K_{DR} \dot{e} \\ &= K_{PR} (e + T_v \dot{e}) \end{aligned}$$

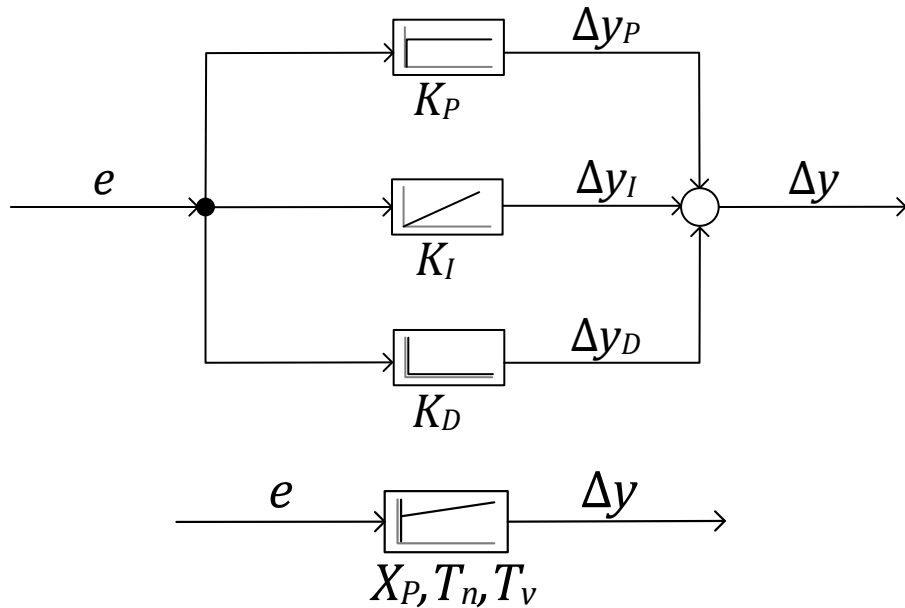
$T_v$ : Vorhaltezeit

$\Delta y_D$ : D-Anteil





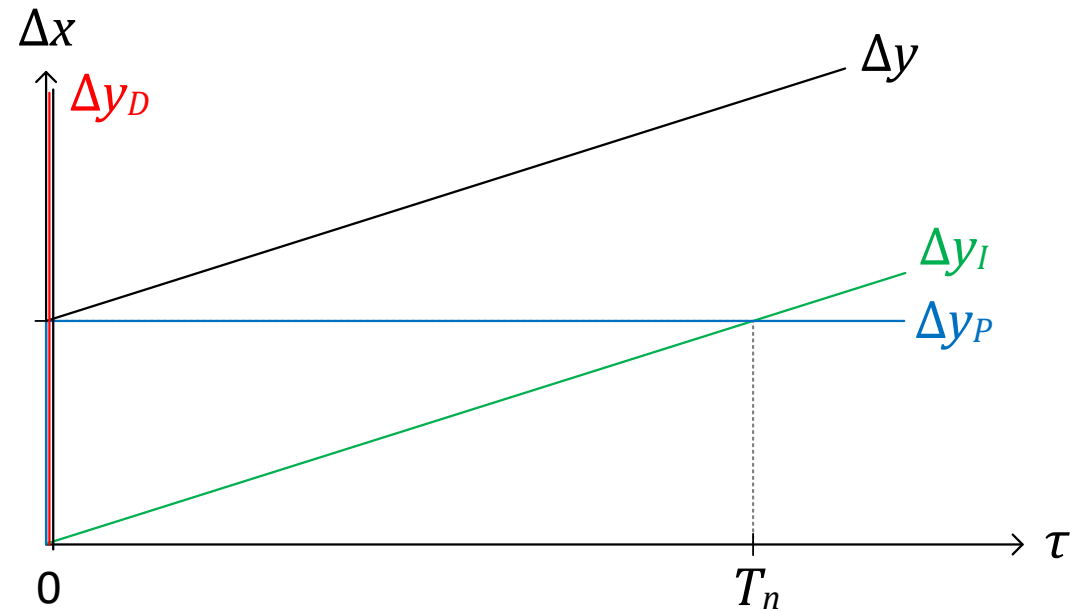
# PID-Glied



$$\begin{aligned} \Delta y &= \Delta y_P + \Delta y_D \\ &= K_{PR} e + K_{IR} \int e d\tau + K_{DR} \dot{e} \\ &= K_{PR} \left( e + \frac{1}{T_n} \int e d\tau + T_v \dot{e} \right) \end{aligned}$$

$T_n$ : Nachstellzeit

$\Delta y_P$ : P-Anteil



$\Delta y_I$ : I-Anteil



# Zweipunktregler

**STETIGER REGLER**

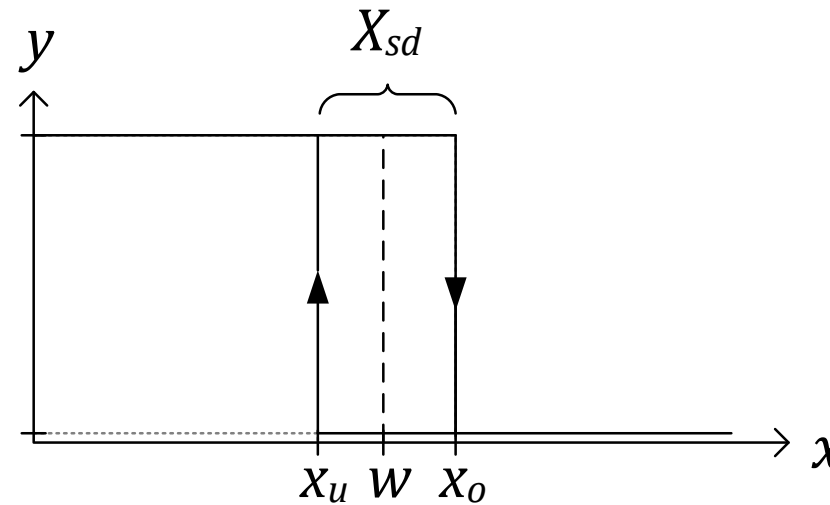
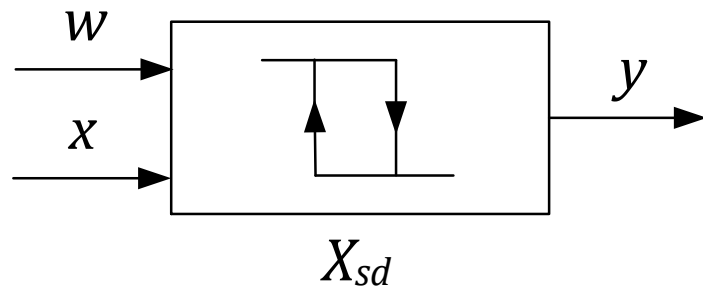
$$y \in [0, Y_h]$$

**UNSTETIGE REGLER**

$$y \in \{y_1, y_2, \dots\}$$

**ZWEIPUNKTREGLER**

$$y \in \{0, Y_h\}$$

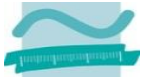


$x_u$ : untere Schaltgrenze

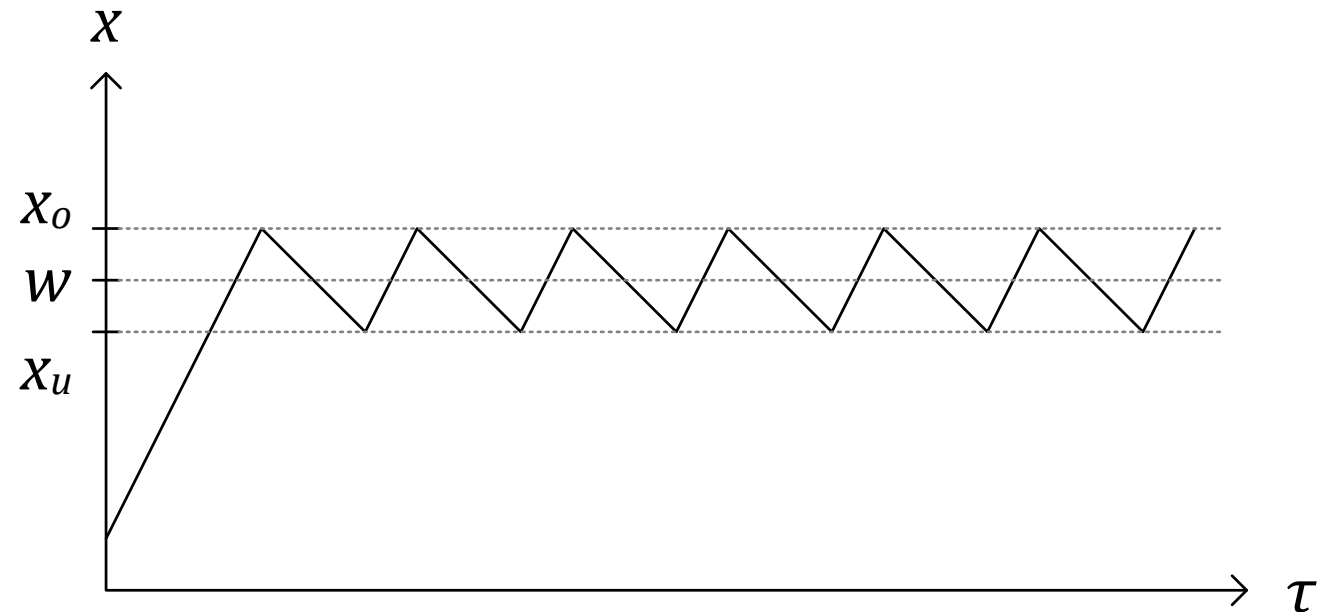
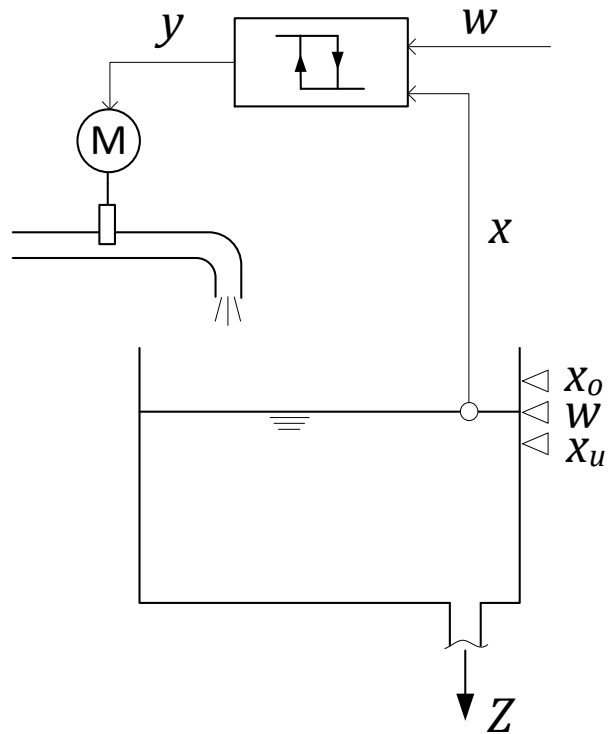
$x_o$ : obere Schaltgrenze

$X_{sd}$ : Schaltdifferenz





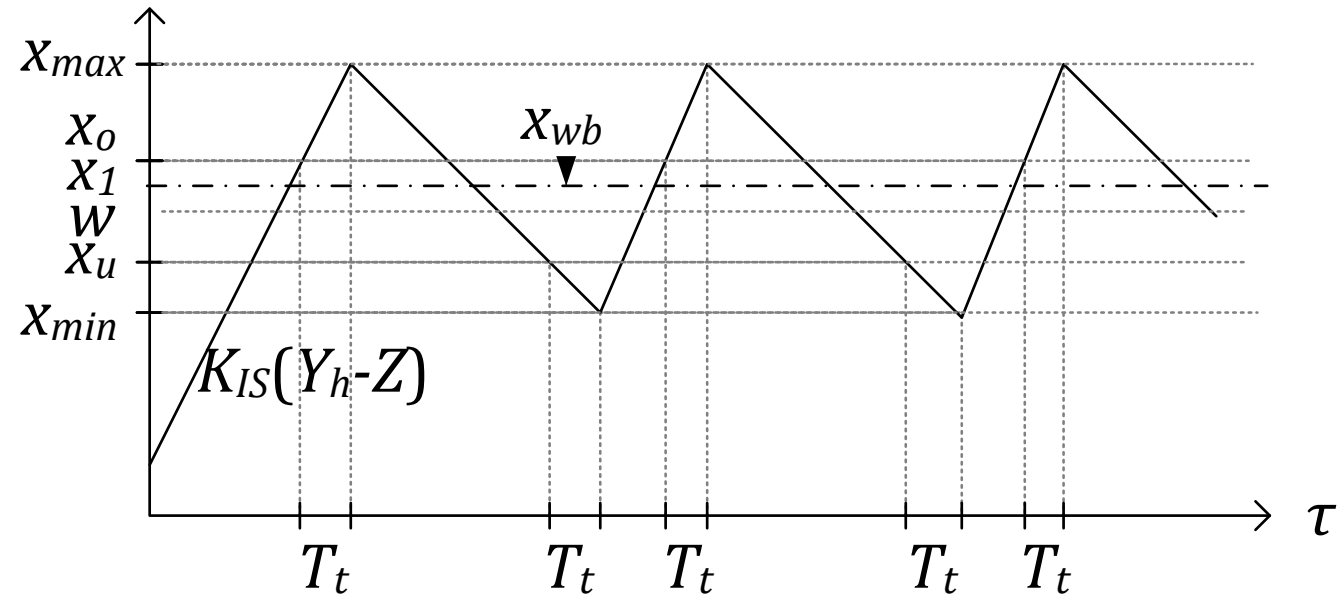
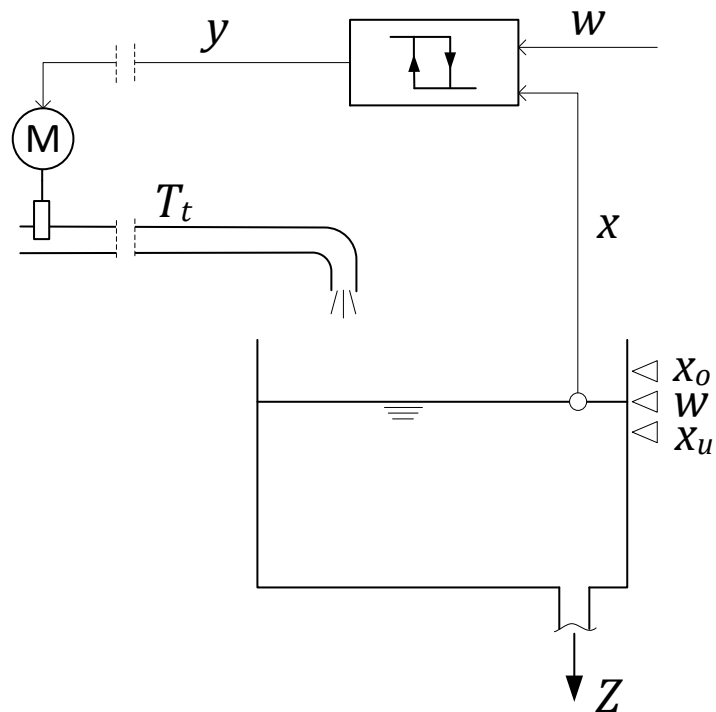
# Zweipunktregler an Füllstandstrecke (I-Strecke)



Z: fester Wert des Abflusses



# Zweipunktregler an Füllstandstrecke mit Totzeit (I-Tt-Strecke)



$T_t$ : Totzeit

$K_{IS} = 1/A$ : Integrationskoeffizient der Strecke





# Schwierigkeitsgrad $S$ der Strecke

## ALLGEMEIN

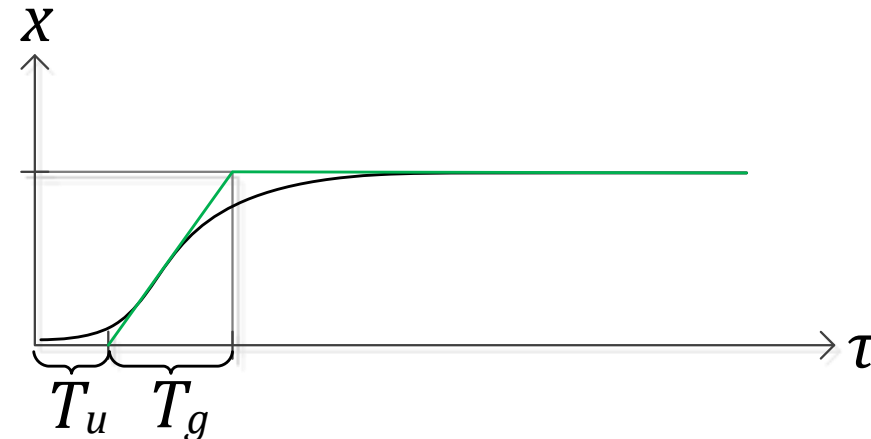
Größere Totzeit, steilere Sprungantwort  $\Rightarrow$  größere Überschwingung und bleibende Regelabweichung.

## I-Tt-STRECKE

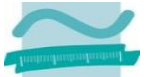
Schwierigkeitsgrad  $S = K_{IS} T_t$

## PTn-STRECKE

- Größerer Totzeiteffekt bei größerer Verzugszeit.
- Größere Steigung bei kleinerer Ausgleichszeit.
- $S = T_u / T_g$







# Auswirkungen des Schwierigkeitsgrads

$S = 0,1 \Rightarrow R = 1/9$

- leicht regelbare Strecke
- P-Regler und Zweipunktregler

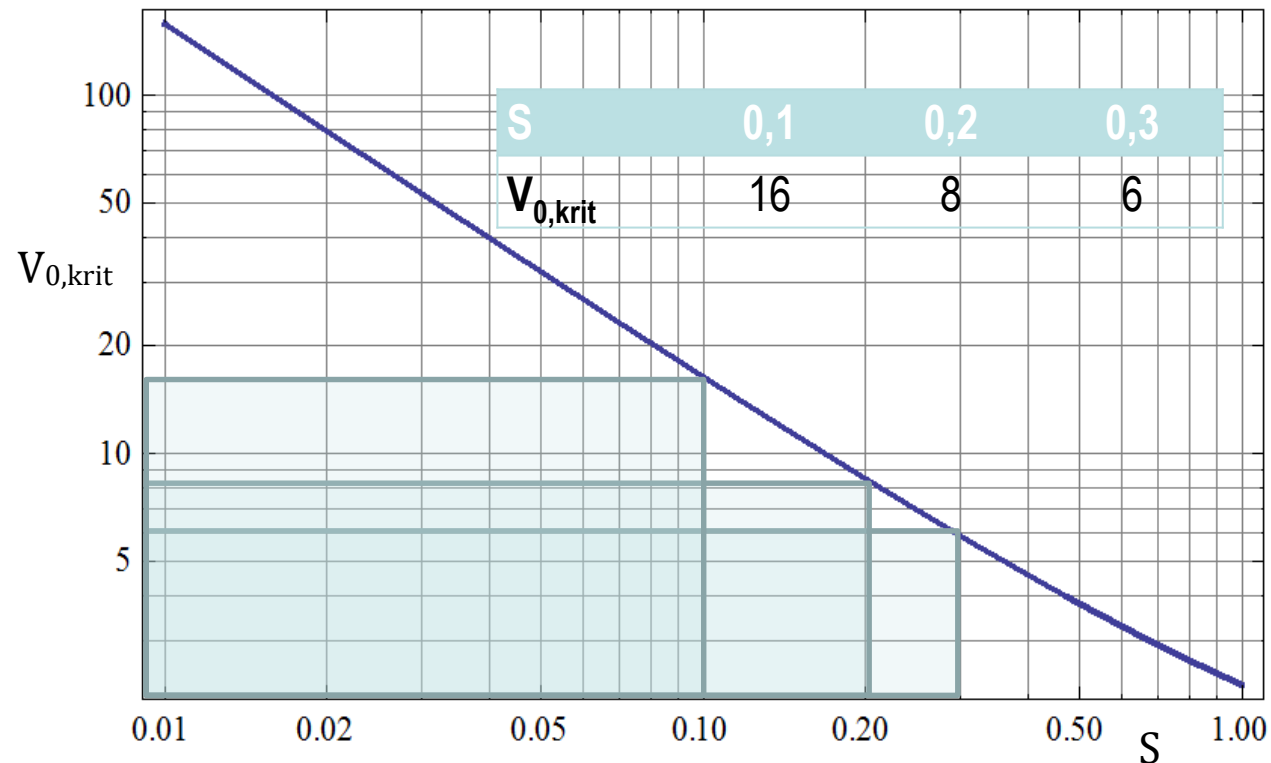
$S = 0,2 \Rightarrow R = 1/5$

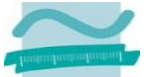
- mittelschwer regelbare Strecke
- PI-Regler

$S = 0,3 \Rightarrow R = 1/4$

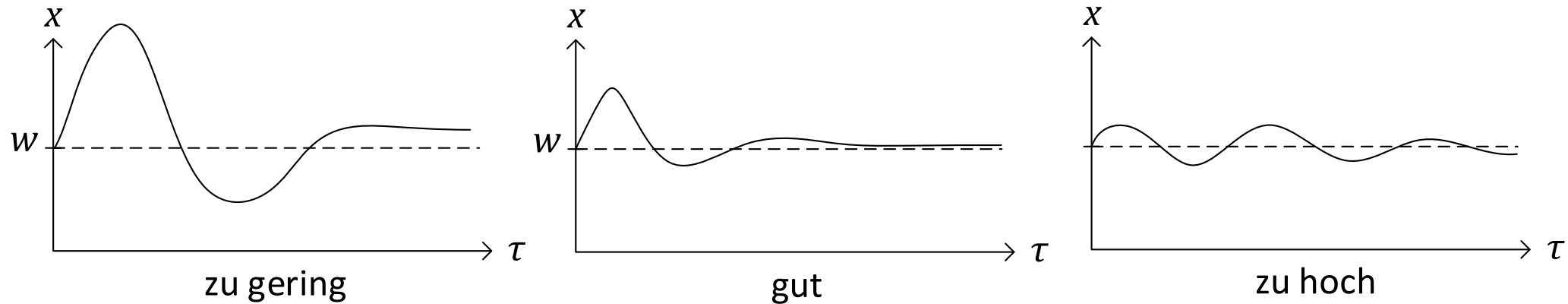
- schwer regelbare Strecke
- PID-Regler

## SCHWIERIGKEITSGRAD UND KRITISCHE KREISVERSTÄRKUNG





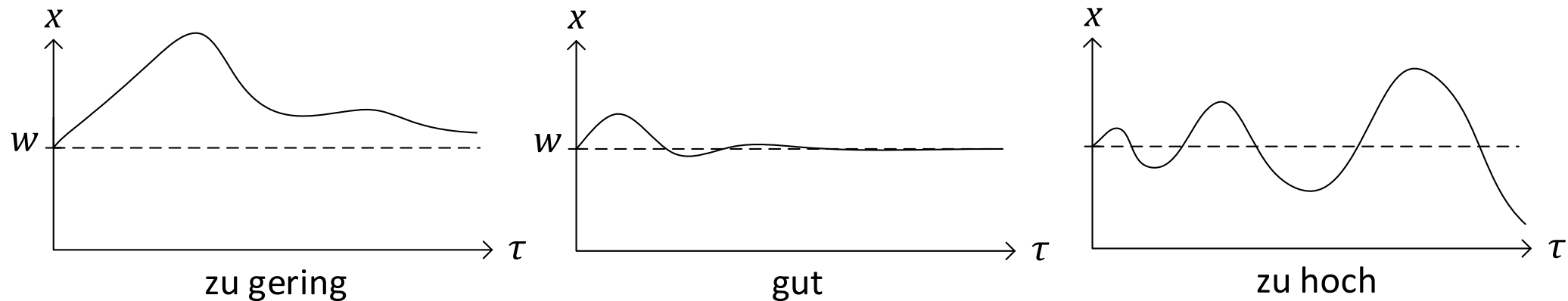
## Einfluss der Regelparameter – P-Anteil



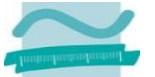
- zu gering: höhere bleibende Regelabweichung
- gut: leichtes Überschwingen, geringe bleibende Regelabweichung
- zu hoch: mehr Schwingungen, beginnende Astabilität



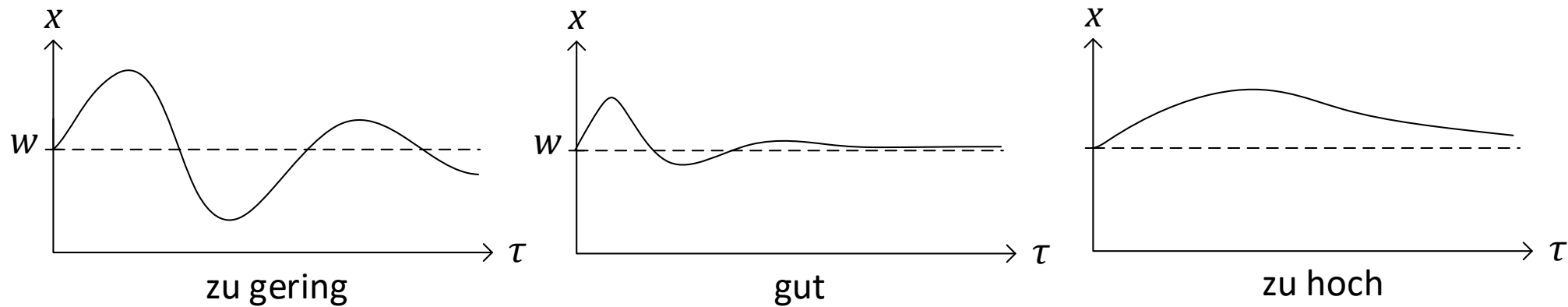
## Einfluss der Regelparameter – I-Anteil



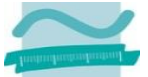
- zu gering: „Schwingen ins Leere“, Sollwert wird zu langsam erreicht
- gut: leichtes Überschwingen, keine bleibende Regelabweichung ( $\dot{y} = 0$ )
- zu hoch: mehr Schwingungen, beginnende Astabilität



## Einfluss der Regelparameter – D-Anteil



- zu gering: zu geringe Dämpfung
- gut: stärkere Dämpfung gegenüber P-Anteil
- zu hoch: zu starke Dämpfung, „Einschlafen“



# Einstellregeln

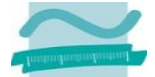
## NACH ZIEGLER NICHOLS

- ggf. I-Anteil und D-Anteil herausnehmen
- mit  $X_P$  gleichmäßige Schwingung herstellen
- $X_{P,krit}$  ist eingestellter  $X_P$
- $T_{krit}$  ist Periode der Schwingung
- Folgende Werte einstellen:

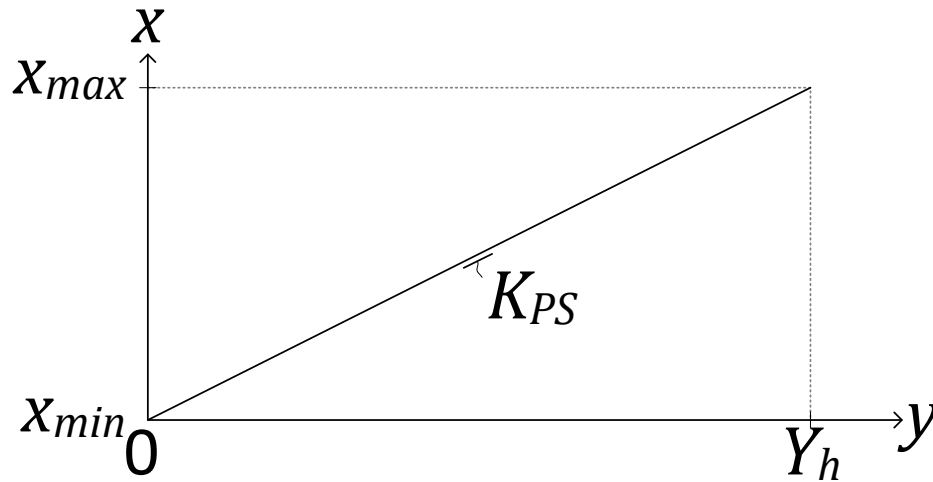
	$X_P/X_{P,krit}$	$T_n/T_{krit}$	$T_v/T_{krit}$
<b>P</b>	2		
<b>PI</b>	2,2	0,85	
<b>PID</b>	1,7	0,5	0,125

## OHNE GLEICHMÄSSIGE SCHWINGUNG

- ggf. I-Anteil und D-Anteil herausnehmen
- P-Anteil so einstellen, dass Überschwingen minimiert wird
- I-Anteil so einstellen, dass bleibende Regelabweichung verschwindet
- D-Anteil so einstellen, dass Überschwingen abnimmt
- P-Anteil und I-Anteil leicht erhöhen

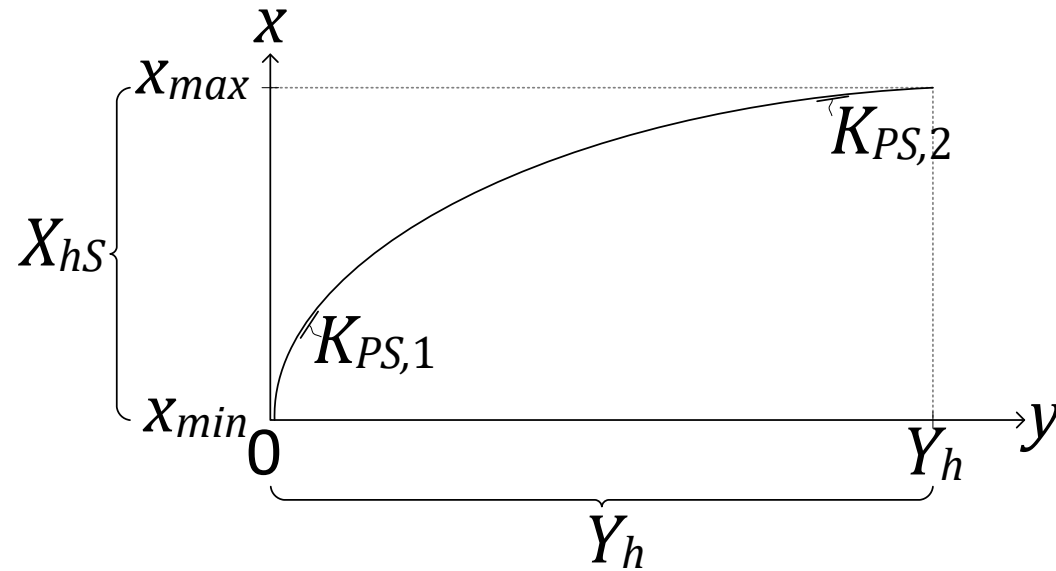


# Lineare und nichtlineare Streckenkennlinien



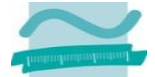
**LINEAR**

$$K_{PS} = \frac{\Delta x}{\Delta y} = \frac{X_{hS}}{Y_h}$$

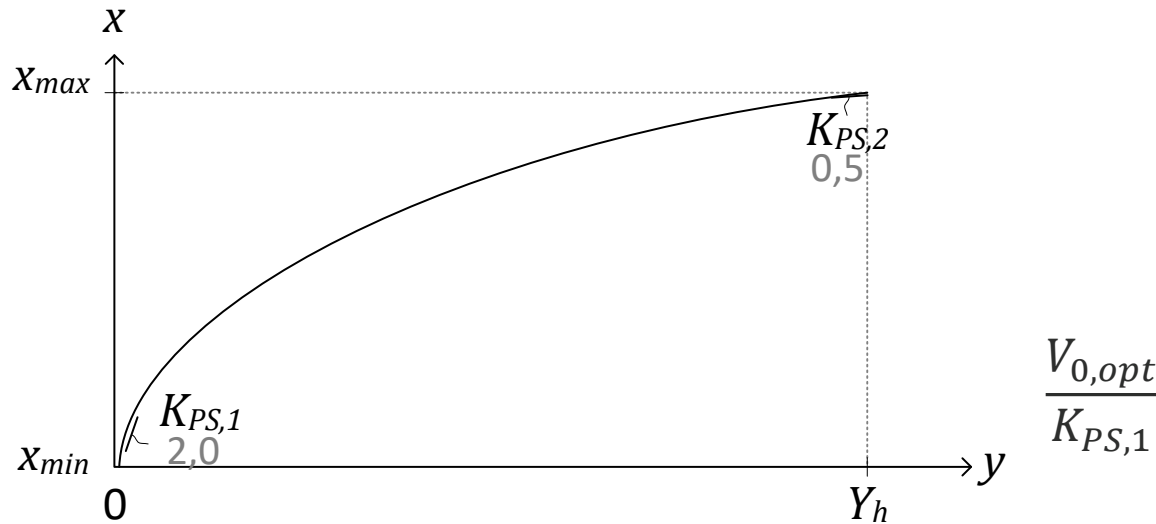


**NICHTLINEAR**

$$K_{PS} = \frac{dx}{dy}$$



# Auswirkungen der Nichtlinearität



Beispiel:  $V_{0,krit} = 8, V_{0,opt} = 4$

## EINSTELLUNG BEI $K_{PS,2}$

$$K_{PR,2} = \frac{V_{0,opt}}{K_{PS,2}} = \frac{4}{0,5} = 8$$

$$V_{0,1} = K_{PS,1} K_{PR,2} = 2 * 8 = 16$$

## EINSTELLUNG BEI $K_{PS,1}$

$$K_{PR,1} = \frac{V_{0,opt}}{K_{PS,1}} = \frac{4}{2} = 2$$

$$V_{0,2} = K_{PS,2} K_{PR,1} = 0,5 * 2 = 1$$

## NICHTLINEARITÄTSMASS

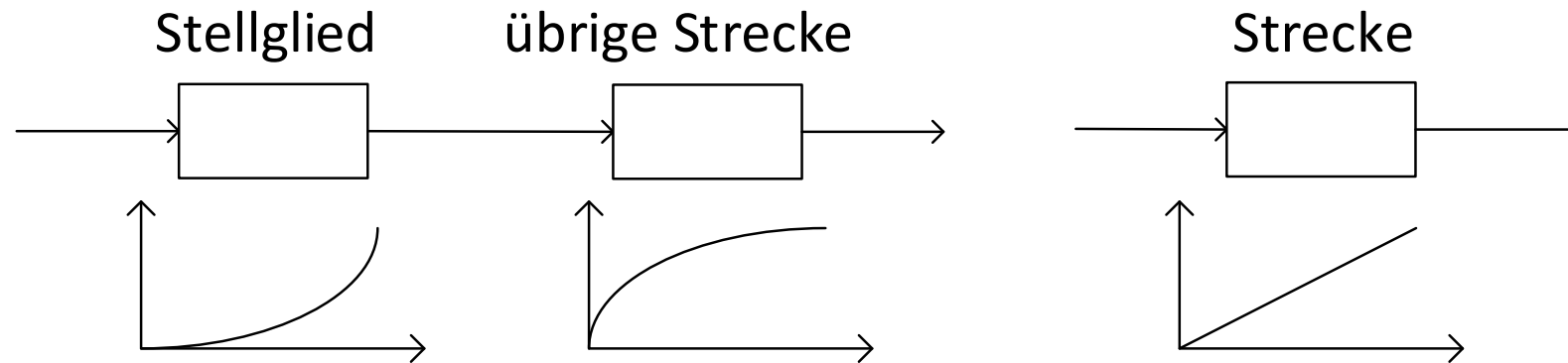
$$\frac{K_{PS,max}}{K_{PS,min}} = 1: \text{ideal}$$

$$= 2: \text{geht}$$

$$= 3: \text{geht gerade noch}$$

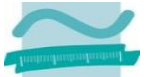


# Stellgliedauslegung als Maßnahme bei Nichtlinearität



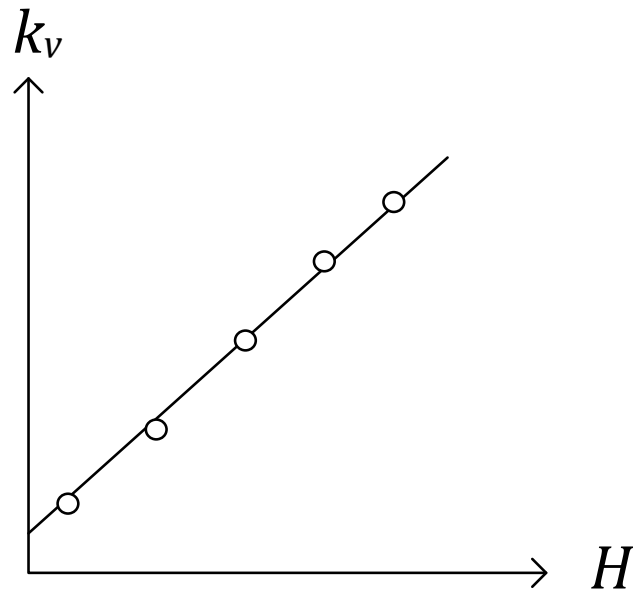
- Stellglied wird mit nichtlinearer Kennlinie ausgelegt
- Kennlinien von Stellglied und Strecke ergeben zusammen eine linearisierte Kennlinie.



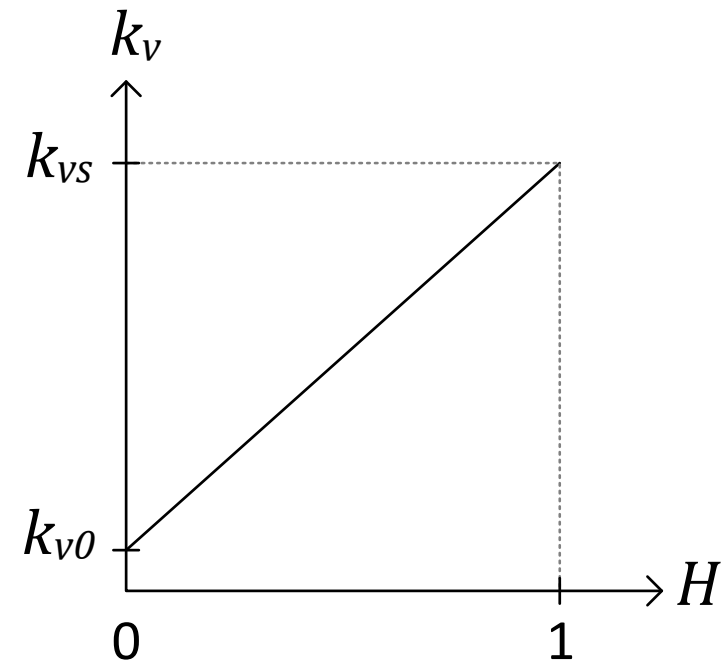


# Theoretische Ventilkennlinie

EMPIRISCHE KENNLINIE



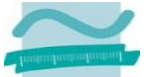
THEORETISCHE KENNLINIE



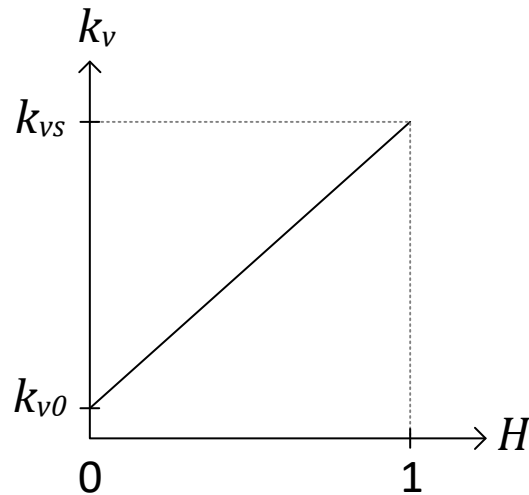
$k_{vS}$ : max.  $k_v$ -Wert der Serie

$k_{v0}$ : theoretischer  $k_v$ -Wert bei  $H = 0$





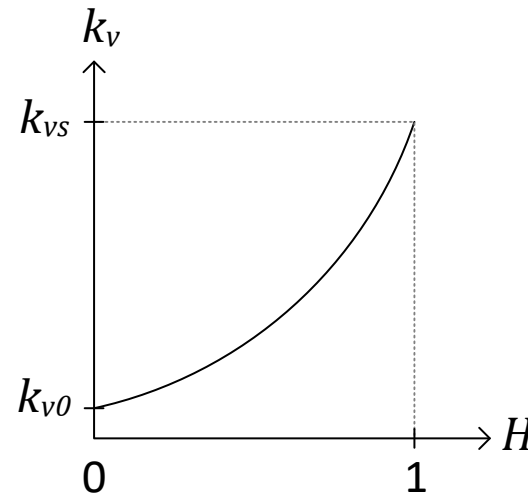
# Kennlinienformen



**LINEAR**

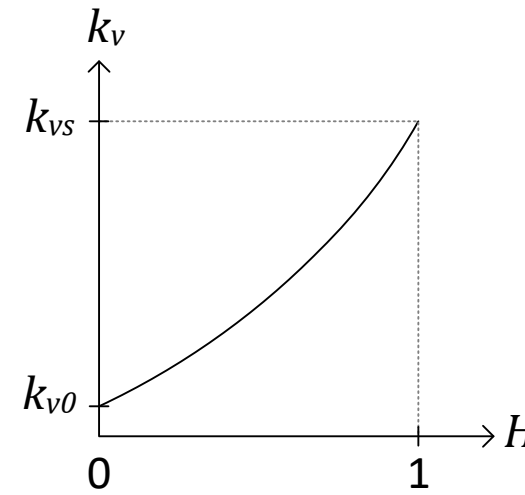
$$\frac{k_v}{k_{vs}}(H) = \frac{1}{S_{v0}} \left(1 - \frac{1}{S_{v0}}\right) H$$

$$S_{v0} = \frac{k_{vs}}{k_{v0}}: \text{Theoretisches Stellverhältnis}$$



**GLEICHPROZENTIG**

$$\frac{k_v}{k_{vs}}(H) = \frac{1}{S_{v0}} e^{(\ln S_{v0}) H}$$



**„OPTIMAL“**

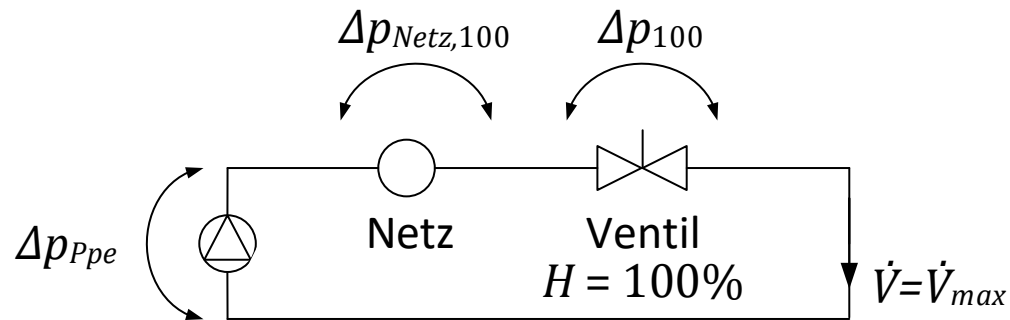
$$\frac{k_v}{k_{vs}}(H) = \frac{1}{S_{v0}} + \left(0,61 - \frac{1}{S_{v0}}\right) + 0,2 H^2 - 0,29 H^3 + 0,1 H^4 + 0,38 H^5$$



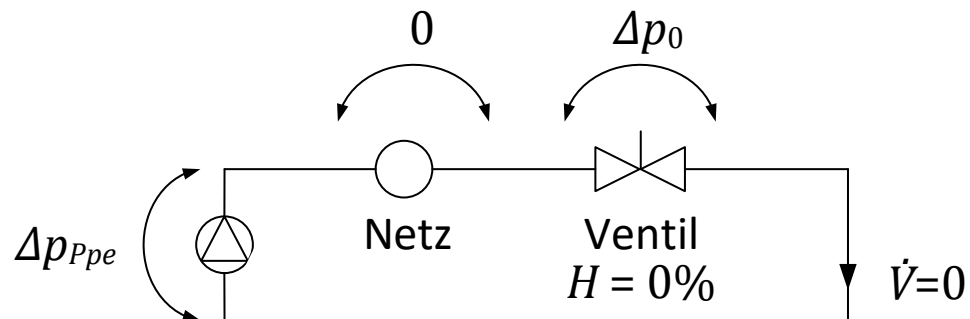


# Betriebskennlinie

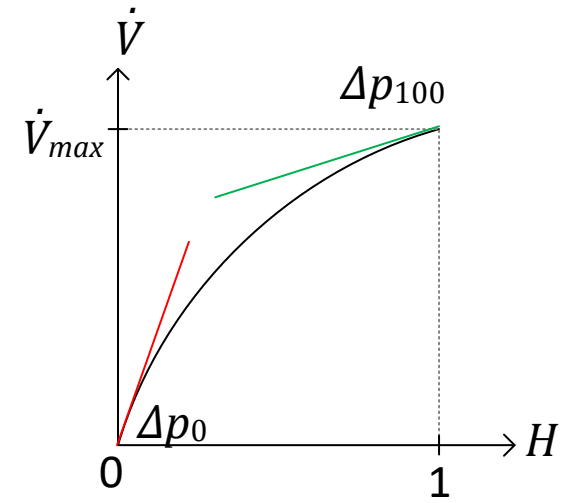
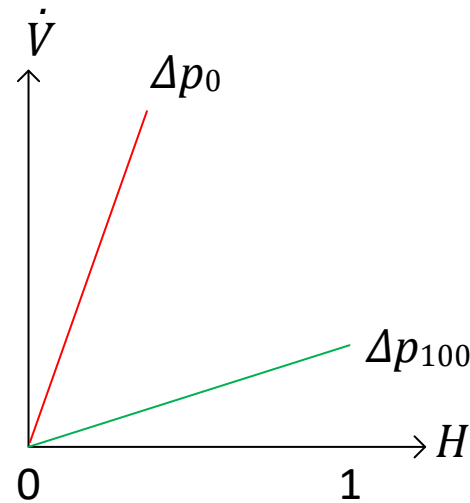
## VENTIL OFFEN



## VENTIL GESCHLOSSEN



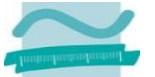
## BETRIEB



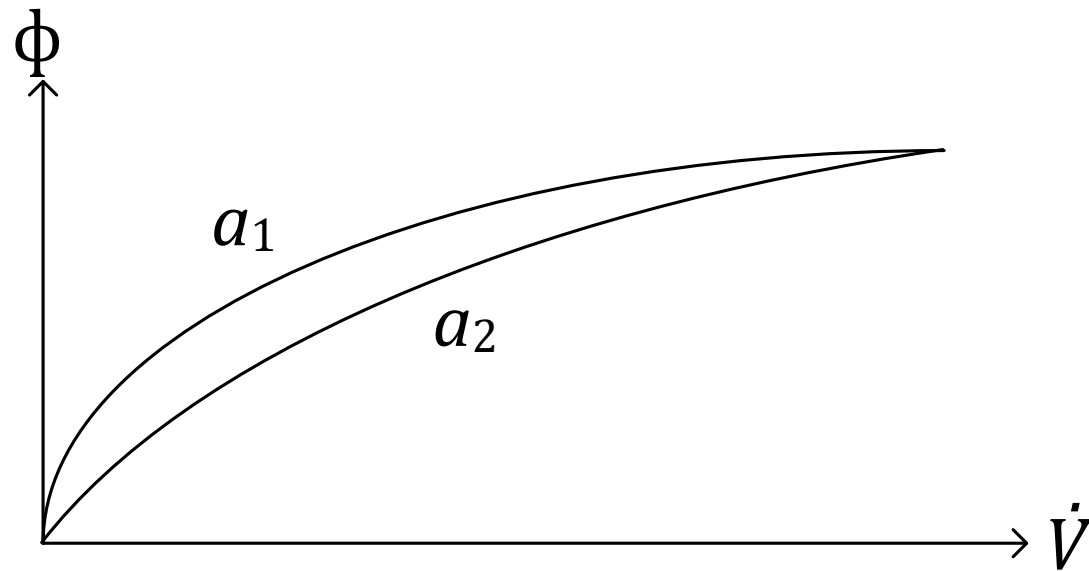
## VENTIL AUTORITÄT

allgemein: 
$$a_V = \frac{\Delta p_{100}}{\Delta p_0}$$

speziell: 
$$a_V = \frac{\Delta p_{100}}{\Delta p_{Netz,100} + \Delta p_{100}}$$



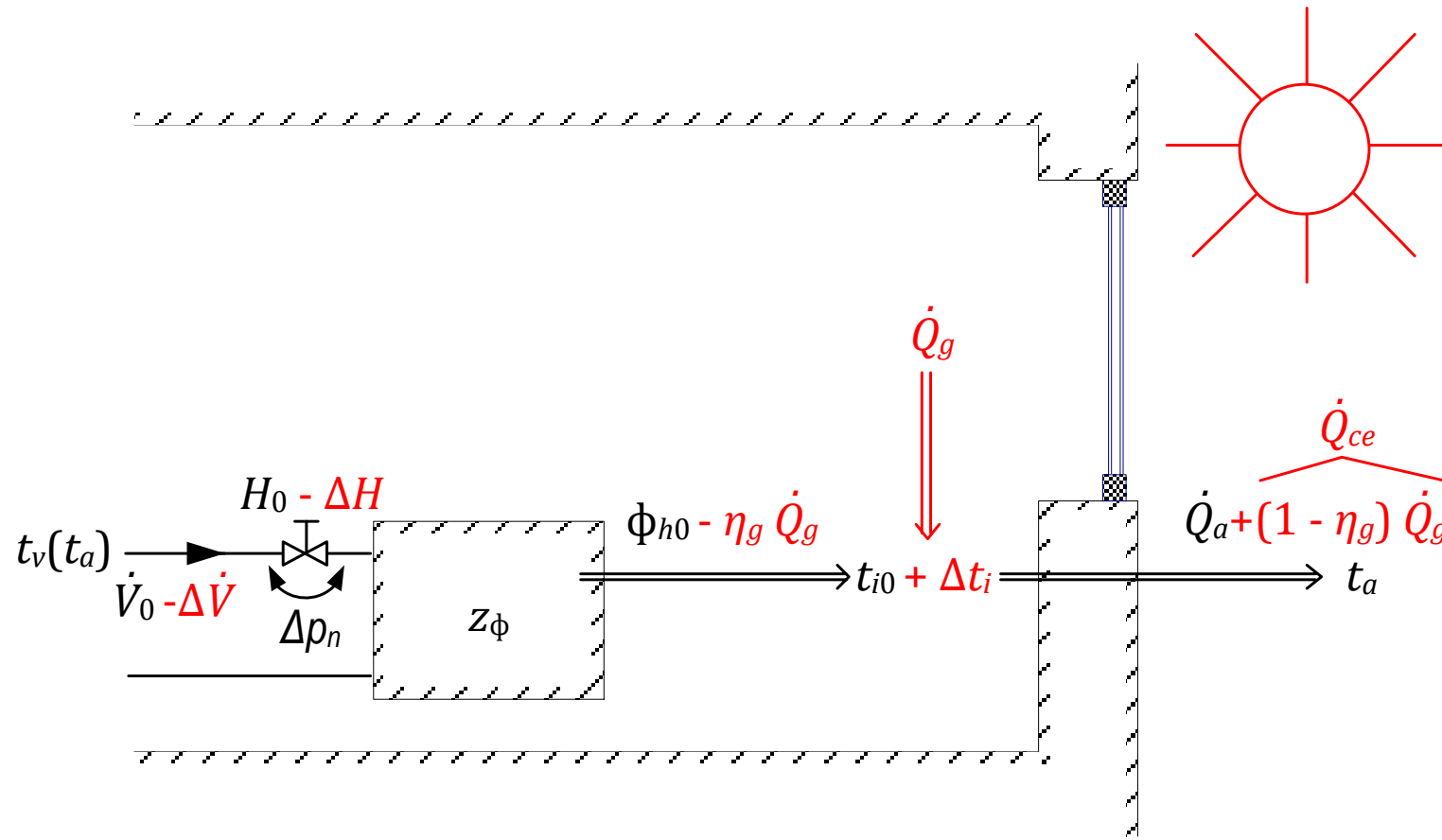
# Wärmeübertragerkennwert



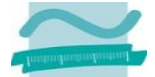
$$a = \frac{t_v - t_r}{t_v - t_u}$$

$$\frac{\Phi}{\Phi_{100}}(\dot{V}) = \frac{1}{1 + a \frac{1 - \dot{V}}{\dot{V}}}$$

# Raumbeheizung mit Pumpenwarmwasserheizung



- $t_v$ : Vorlauftemp.
- $t_i$ : Raumtemperatur
- $t_a$ : Außentemperatur
- $\Delta p_n$ : Differenzdruck
- $\phi_h$ : Heizleistung
- $z_\phi$ : Leistungszuschlag
- $\dot{Q}_a$ : Wärmeverlust
- $\dot{Q}_g$ : Wärmegewinn
- $\eta_g$ : Nutzungsgrad



# Raumbeheizung mit Pumpenwarmwasserheizung - Regelstrecke

