



# Turbo-Regler

## PID-Standardregler beschleunigen

„Mit einem Mikroprozessor, einem PC oder einer SPS als Regler ist man nicht mehr an die klassischen PID-Algorithmen gebunden und kann die komplizierteren Regelalgorithmen entwickeln...“

**S. Zacher, M. Reuter:** **Regelungstechnik für Ingenieure,**  
Seite 357, Springer Vieweg Verlag,  
14. Auflage, 2014

## Abstract und Urheberrechtshinweis

Die Regelung eines Regelkreises mit dem Standard-Regler (Bild 1) wird durch Einsatz eines neuen Bausteins, genannt *Turbo*, mehrfach beschleunigt (Bild 2). Der Aufbau des Turbo-Bausteins ist überraschend einfach und gleichzeitig effektiv. Somit kann die Ausregelzeit halbiert werden.

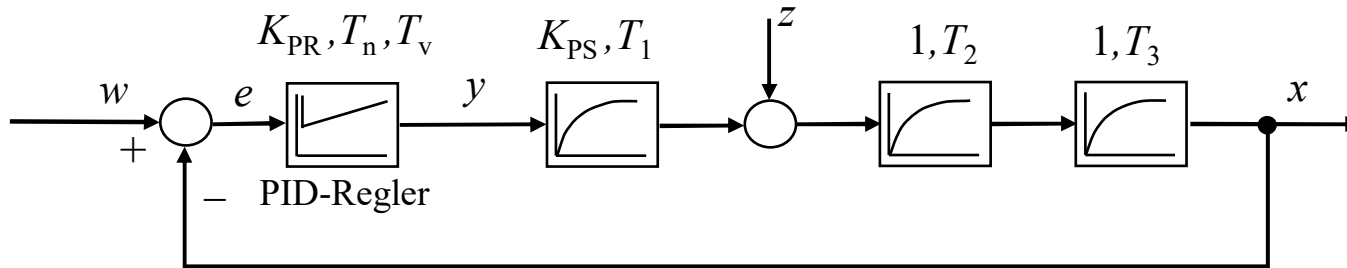


Bild 1. Beispiel eines Regelkreises mit dem Standard-Regler

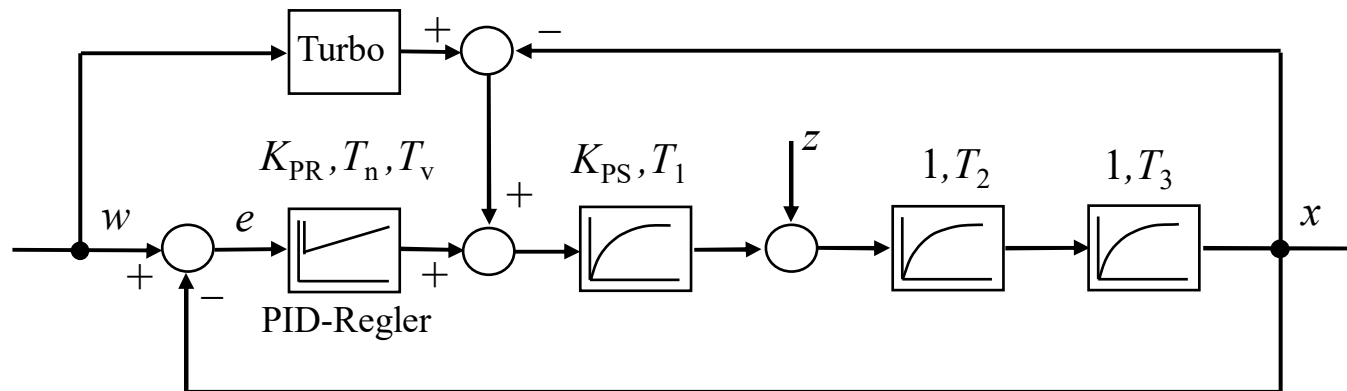


Bild 2. Regelkreis des Bildes 1 mit dem Turbo-Baustein

Die vorliegende Publikation ist die erste Veröffentlichung über Turbo-Regler und unterliegt dem Urheberrecht. Alle Rechte sind bei S. Zacher vorbehalten.

Die Weiterentwicklung oder Nutzung des *Turbo*-Bausteins ohne Referenz auf Urheber ist nicht zugelassen..

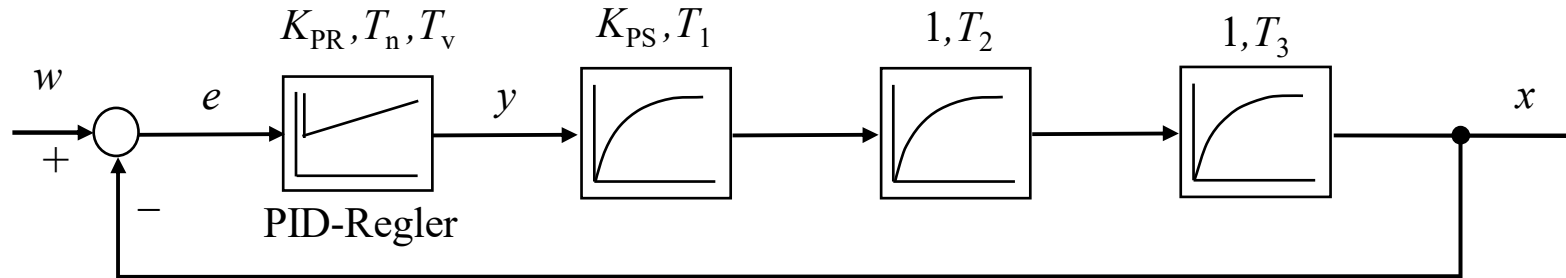
Für die Anwendung der vorliegenden Publikation in der Industrie, im Laborbetrieb und in anderen praktischen Fällen sowie für eventuelle Schäden, die aus unvollständigen oder fehlerhaften Angaben über das dynamische Systeme ergeben können, übernimmt der Autor keine Haftung.

# INHALT

1. Regelkreis mit einem Standardregler .....	Seite 4
2. Turbo-Baustein.....	Seite 8
3. Störverhalten mit dem Turbo-Regler.....	Seite 10
4. Theoretische Hintergründe.....	Seite 12
5. Zusammenfassung.....	Seite 16

# 1. Standardregler

Zuerst betrachten wir einen Regelkreis mit dem Standard-PID-Regler (Bild 3).



Die Übertragungsfunktion des aufgeschnittenen Regelkreises:

$$G_0(s) = \frac{K_{PR} (1 + sT_n)(1 + sT_v)}{sT_n} \cdot \frac{K_{PS}}{(1 + sT_1)(1 + sT_2)(1 + sT_3)} \quad \text{mit } T_1 > T_2 > T_3$$

Die beste Reglereinstellung ist als Betragsoptimum bekannt. Dafür kompensieren wir die Zeitkonstanten der Strecke wie folgt:

$$T_n = T_{\text{größte}} = T_1 \quad T_v = T_{\text{zweitgrößt}} = T_2$$

Die Übertragungsfunktion  $G_0(s)$  entspricht dem Grundtyp „A“ (siehe S.Zacher/M.Reuter „Regelungstechnik für Ingenieure“). Dementsprechend wird  $K_{PR}$  des Reglers berechnet:

$$G_0(s) = \frac{K_{PR} K_{PS}}{sT_n (1 + sT_3)} \quad \longrightarrow \quad K_{PR} = \frac{T_n}{2K_{PS} T_3}$$

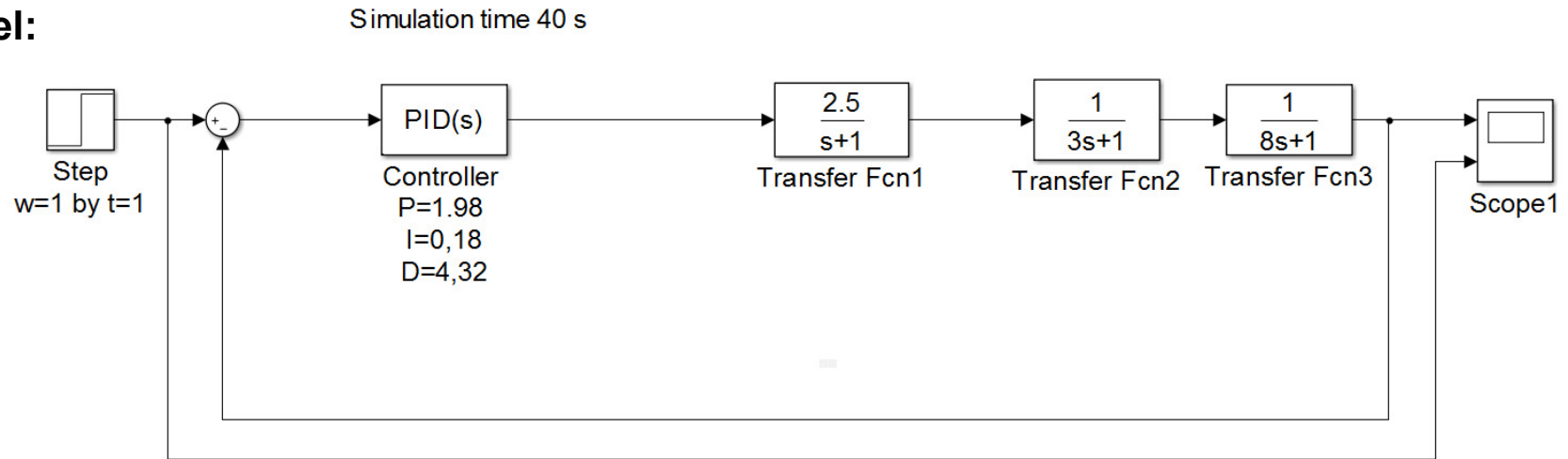


## 1. Standardregler

Die Dämpfung erreicht dabei den optimalen Wert  $\mathcal{D} = \frac{1}{\sqrt{2}}$  bzw.  $\mathcal{D} = 0,707$

Die Ausregelzeit  $T_{\text{aus}}$  beträgt beim Betragsoptimum etwa  $T_{\text{aus}} = 11 \cdot T_3$

### Beispiel:



Die Konfiguration des PID-Reglers:

$$T_n = T_{\text{größte}} = 8 \text{ s}$$

$$T_v = T_{\text{zweitgrößt}} = 3 \text{ s}$$

$$K_{\text{PR}} = \frac{T_n}{2K_{\text{PS}}T_3} = \frac{8}{2 \cdot 2,5 \cdot 1} = 1,6$$

Die Konfiguration des PID-Bausteins:

$$P = K_{\text{PR}} \left( 1 + \frac{T_v}{T_n} \right) = 1,6 \cdot (1 + 0,375) = 1,98$$

$$I = \frac{P}{T_n + T_v} = \frac{1,98}{8 + 3} = 0,18$$

$$D = P \cdot \frac{T_n T_v}{T_n + T_v} = 1,98 \cdot \frac{8 \cdot 3}{8 + 3} = 4,32$$

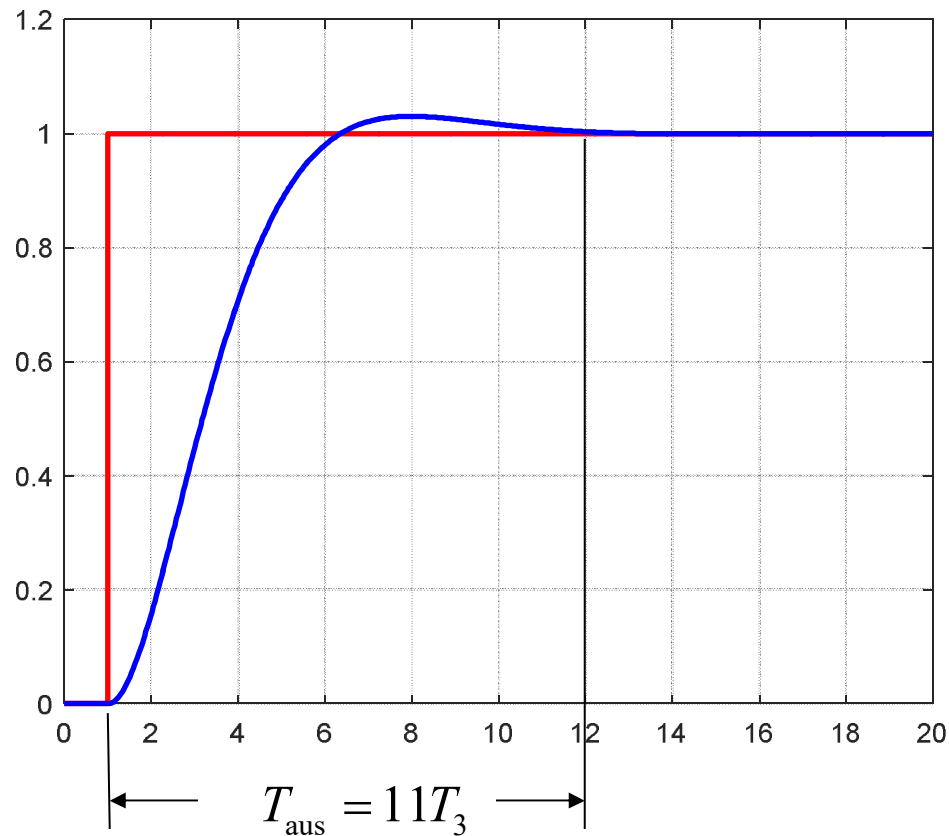
## 1. Standardregler

Die Sprungantwort zeigt, dass die optimale Dämpfung  $\mathcal{D} = 0,707$  erreicht wurde.

Die maximale Überschwingung beträgt 4,3% von Sollwert.

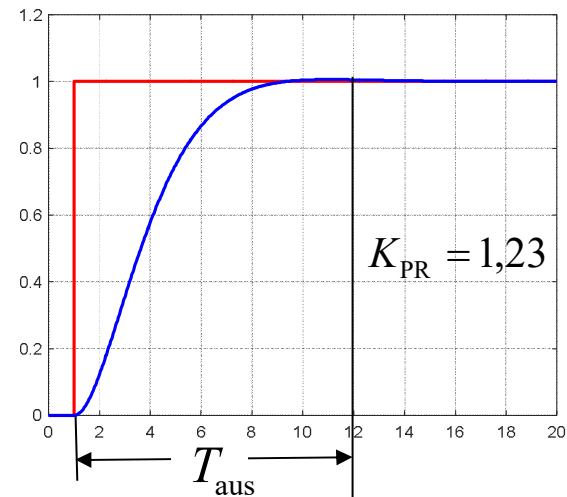
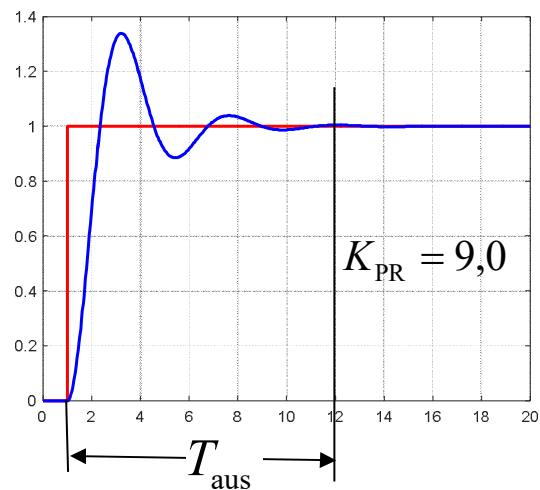
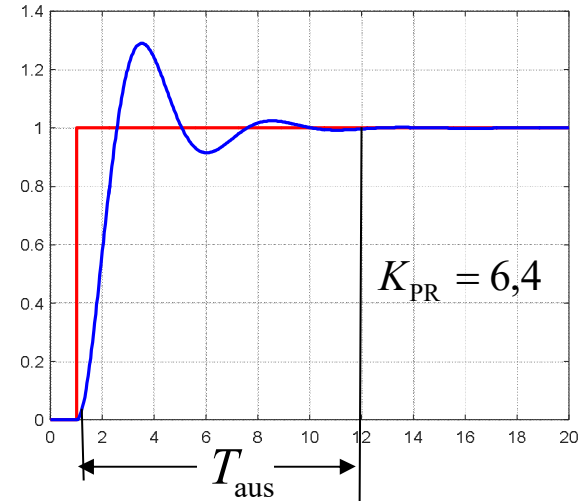
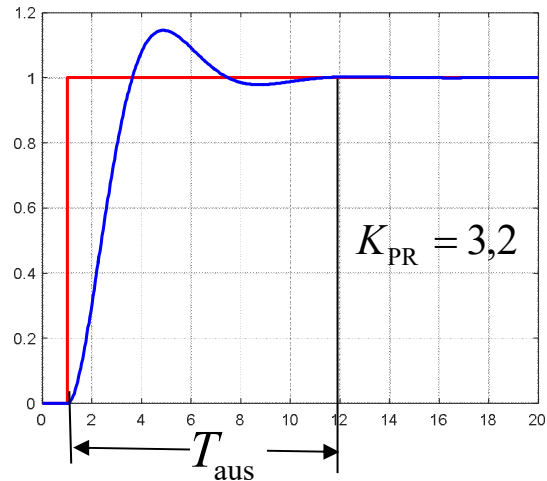
Die Ausregelzeit ist  $T_{\text{aus}} = 11 \cdot 1 = 11 \text{ s}$ , wie es beim Betragsoptimum zu erwarten ist.

Das ist die kürzeste Zeit, die mit einem Standardregler nach dem Betragsoptimum erreicht werden kann.



## 1. Standardregler

Unten sind einige Optionen der Regler-Einstellung gezeigt. Es ist ersichtlich, dass entweder die maximale Überschwingung der Regelgröße steigt oder die Dämpfung des Regelkreises wird größer, aber die Ausregelzeit lässt sich im Vergleich zum Betragsoptimum nur wenig kürzen.

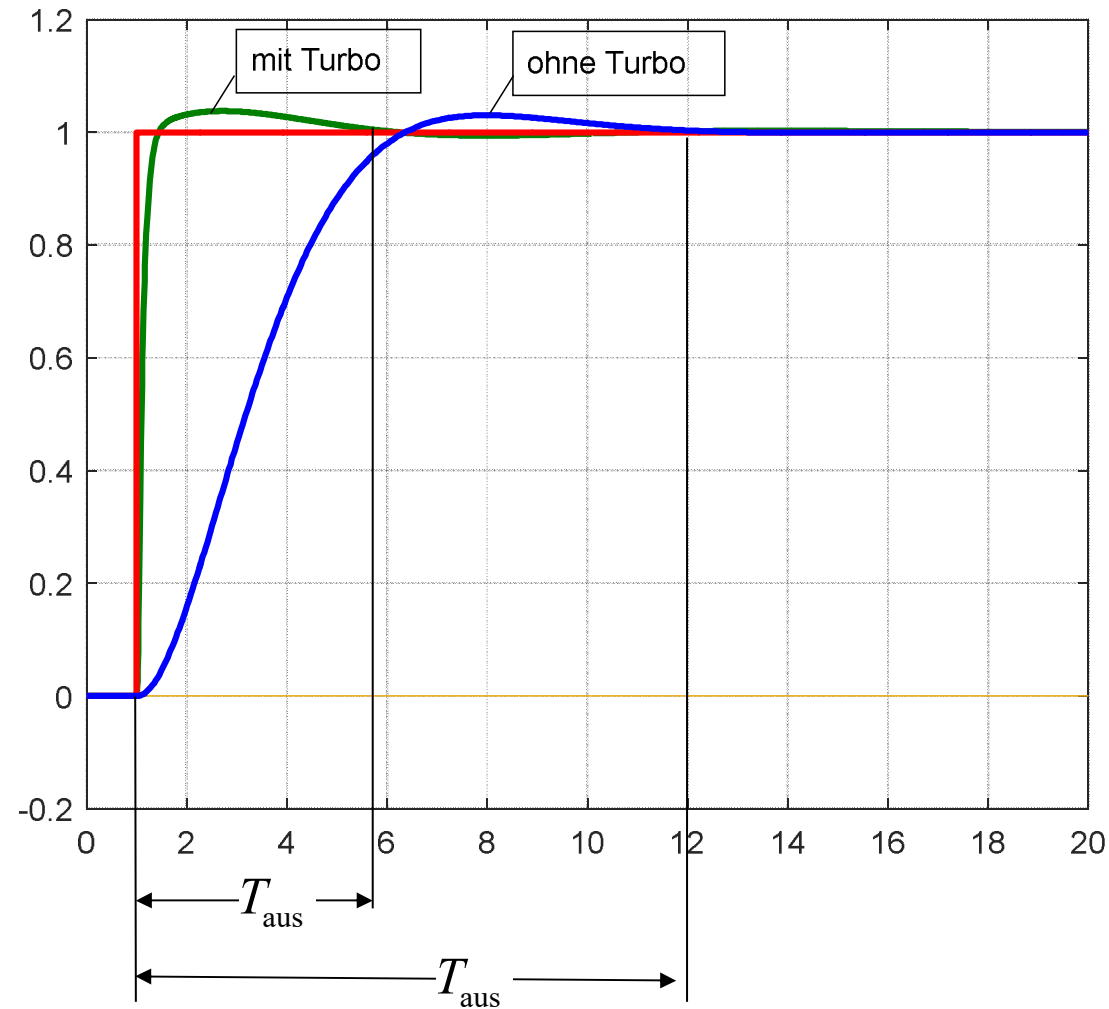






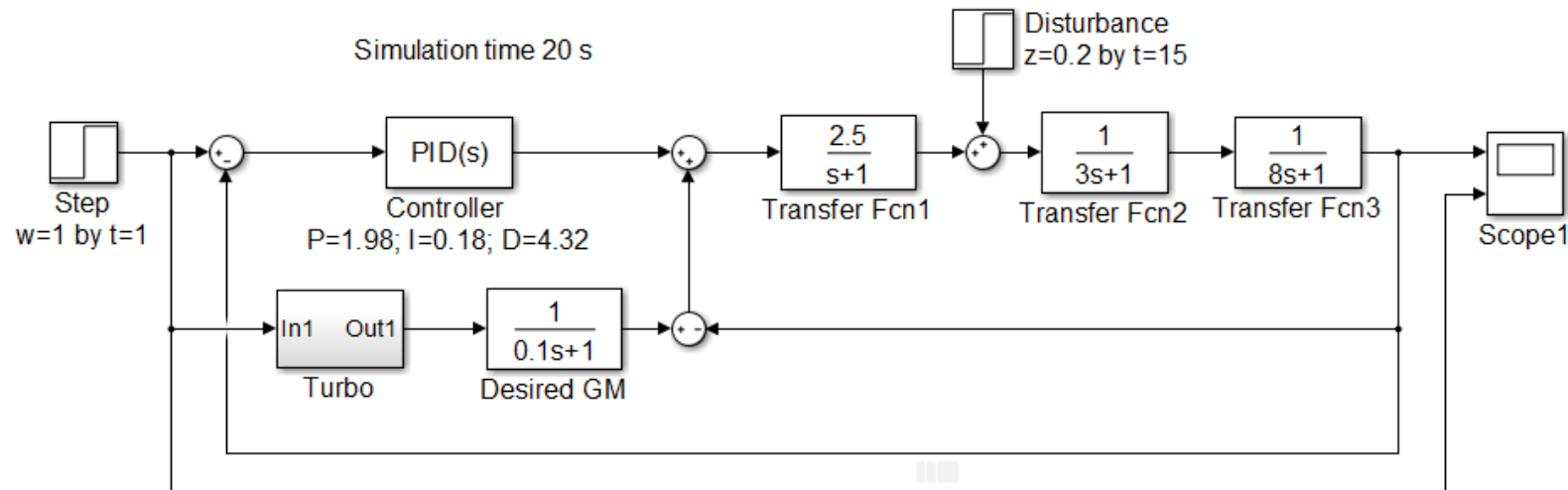
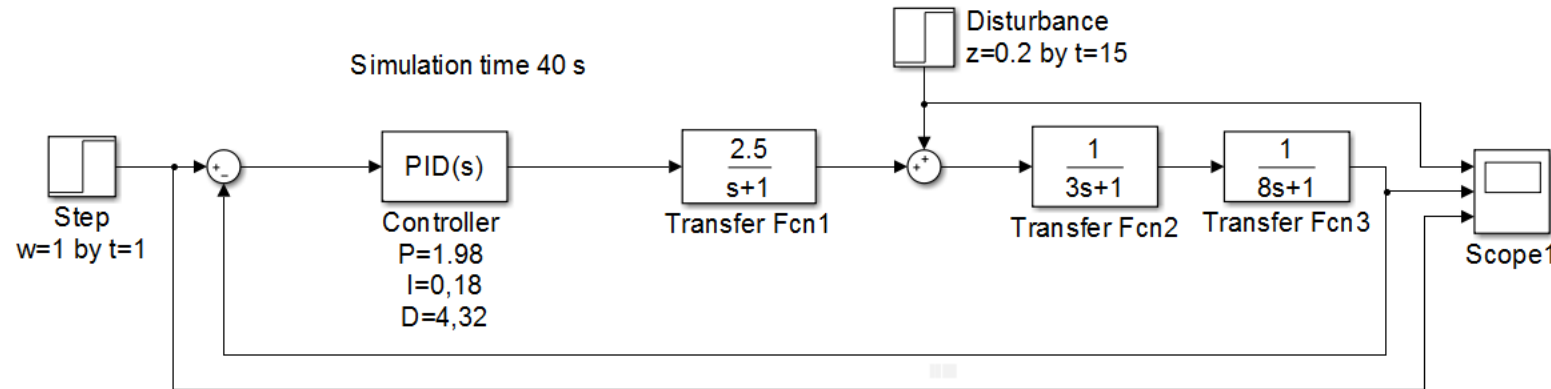
## 2. Turbo-Regler

Die Sprungantwort zeigt dieselbe optimale Dämpfung  $\mathcal{D} = 0,707$ , jedoch die Ausregelzeit ist etwa 2 mal kleiner, als im Fall des Standard-Reglers ohne Turbo, nämlich:  $T_{\text{aus}} = 4,9 \text{ s}$



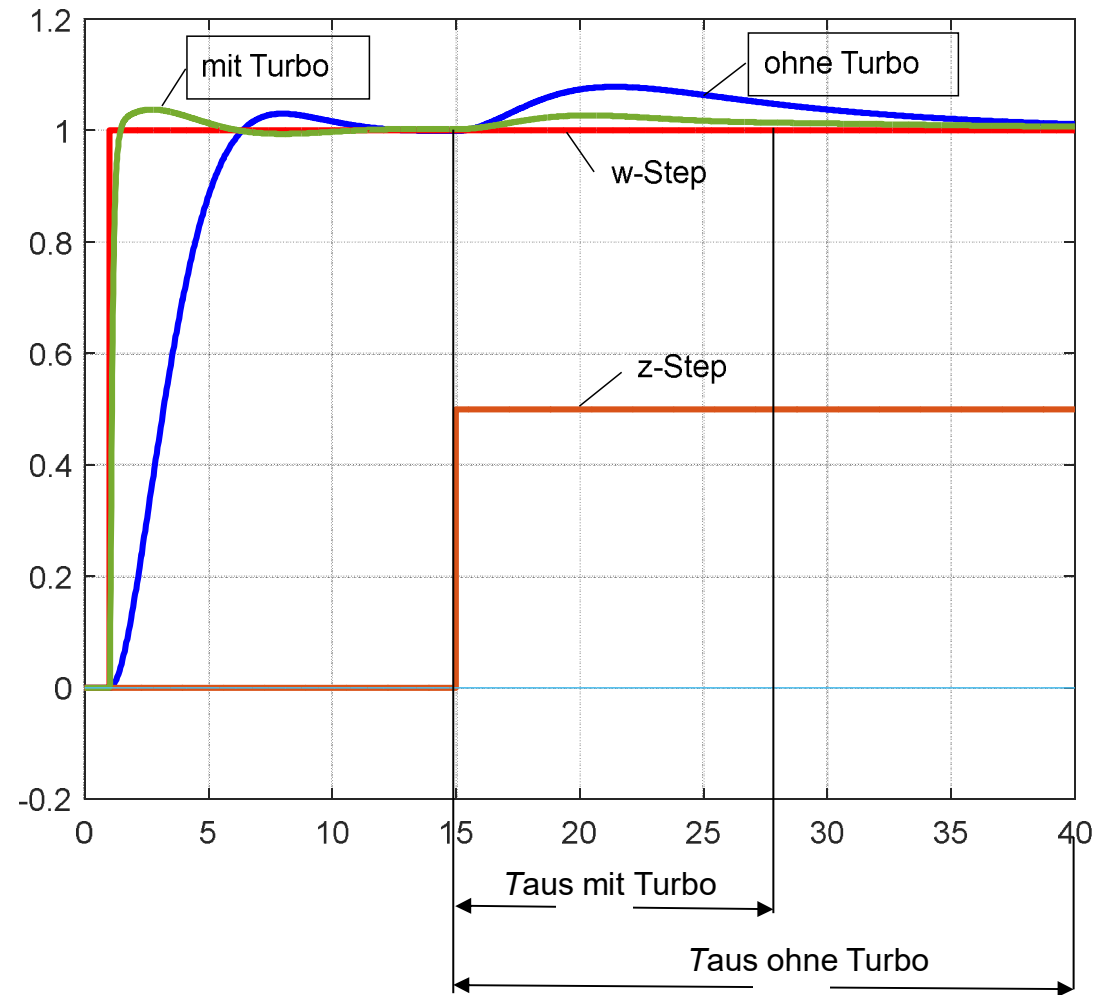
### 3. Störverhalten mit und ohne Turbo-Regler

Die Wirkungspläne von Regelkreisen ohne und mit Turbo-Baustein mit gleicher Störgröße z sind unten gezeigt. Die Störung von  $z = 0,2$  wirkt bei  $t = 15$  sec nach der Beginn der Simulation.



## 2. Turbo-Regler

Die Sprungantworten beim Störverhalten zeigen dieselbe optimale Dämpfung  $\mathcal{D} = 0,707$ . Auch beim Störverhalten reagiert der Regelkreis mit dem Turbo-Baustein (Bild 3) schneller als der Regelkreis ohne Turbo.



## 4. Theoretische Hintergründe

Der Turbo-Baustein ist nichts anderes als die Regelstrecke  $G_S(s) = \frac{K_{PS}}{(1+sT_1)(1+sT_2)(1+sT_3)}$

selbst, jedoch zweimal aufgeschaltet. Zuerst wird die Parallelschaltung gebildet:

$$G_{\text{parallel}}(s) = -G_S(s) - 1 = -\frac{K_{PS}}{(1+sT_1)(1+sT_2)(1+sT_3)} - 1$$

Diese Parallelschaltung wird dann mit einer Rückführung versehen. Der Turbo-Baustein ist:

$$G_{\text{Turbo}}(s) = \frac{G_{\text{parallel}}(s)}{1 + G_{\text{parallel}}(s)} = \frac{-G_S(s) - 1}{-G_S(s)} = \frac{G_S(s) + 1}{G_S(s)}$$

Der Turbo-Baustein  $G_{\text{Turbo}}(s)$  ist also die Reziproke-Übertragungsfunktion  $G_w(s)$  eines geschlossenen Regelkreises, bestehend aus einer Strecke, ohne Regler:

$$G_{wS}(s) = \frac{G_S(s)}{1 + G_S(s)} \quad \text{bzw.} \quad G_{\text{Turbo}}(s) = \frac{1}{G_{wS}(s)}$$

Im betrachteten Beispiel der Regelstrecke  $G_S(s) = \frac{K_{PS}}{(1+sT_1)(1+sT_2)(1+sT_3)}$  gilt:

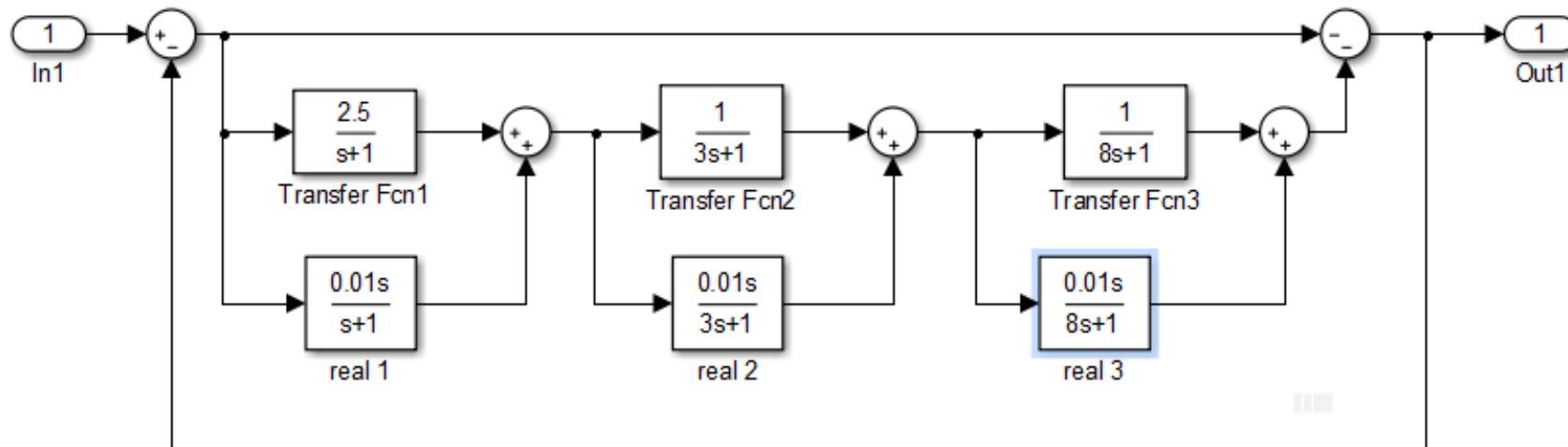
$$G_{\text{Turbo}}(s) = \frac{(1+sT_1)(1+sT_2)(1+sT_3)}{K_{PS}} = \frac{(1+s)(1+3s)(1+8s)}{2,5}$$

#### 4. Theoretische Hintergründe

Da solche Übertragungsfunktionen, mit der Ordnung des Zähler-Polynoms größer als die Ordnung des Nenner-Polynoms, nicht realisierbar sind, sollen zusätzliche, möglichst kleine Zeitverzögerungen eingeführt werden, z.B.:

$$G_{\text{Turbo}}(s) = \frac{(1+s)(1+3s)(1+8s)}{2,5(1+0.01s)^3}$$

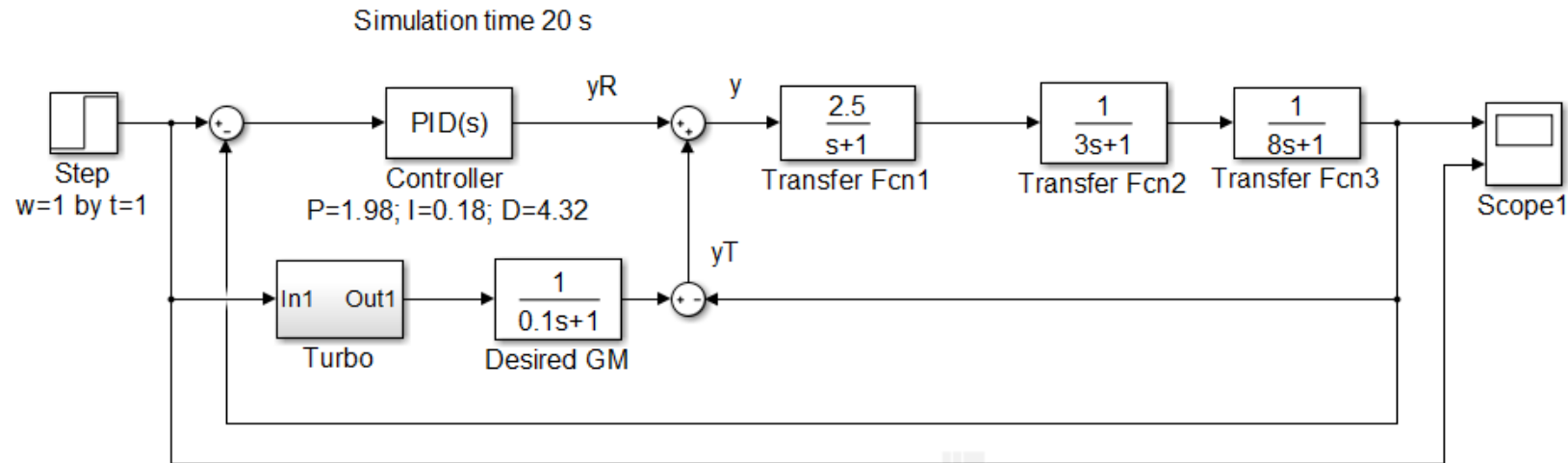
Der auf dieser Weise entworfene Turbo-Baustein ist unten gezeigt.



Der Turbo-Baustein hat also im betrachteten Beispiel das Verhalten eines P-D3-Gliedes. Merken wir, dass zum Erstellen dieses P-D3-Gliedes keine Übertragungsfunktion der reziproken Strecke  $1/G_s(s)$ , sondern die Übertragungsfunktion  $G_s(s)$  der Strecke selbst benötigt wird, was in vielen Hinsichten für die Programmierung und Simulation vorteilhaft ist.

## 4. Theoretische Hintergründe

Betrachten wir nun den gesamten Regelkreis mit dem Turbo-Baustein (Bild unten).



Es gilt für die Regelgröße:  $x(s) = G_S(s)y(s)$

Die Stellgröße  $y(s)$  besteht aus zwei Teilen:  $y_R$  von PID-Regler und  $y_T$  von Turbo-Baustein:

$$y_R(s) = G_R(s)\hat{e} = G_R(s)(\hat{w} - x(s))$$

$$y(s) = y_R(s) + y_T(s)$$

$$y_T(s) = \frac{1 + G_S(s)}{G_S(s)} G_M(s)\hat{w} - x(s)$$

#### 4. Theoretische Hintergründe

Aus dem letzten Ausdruck der vorherigen Seite folgen:

$$y(s) = G_R \hat{w} - G_R x(s) + \frac{1 + G_S}{G_S} G_M \hat{w} - x(s)$$
$$x(s) = G_S y(s) = G_R G_S \hat{w} - G_R G_S x(s) + (1 + G_S) G_M \hat{w} - G_S x(s)$$
$$x(s) + G_S x(s) + G_R G_S x(s) = G_R G_S \hat{w} + G_M \hat{w} + G_M G_S \hat{w}$$
$$(1 + G_S + G_R G_S) x(s) = G_R G_S \hat{w} + G_M \hat{w} + G_M G_S \hat{w}$$

Die Übertragungsfunktion des geschlossenen Regelkreises mit dem Turbo-Baustein und der gewünschten Übertragungsfunktion  $G_M(s)$  ist:

$$G_w = \frac{G_M + G_M G_S + G_R G_S}{1 + G_S + G_R G_S}$$

Unter Annahme, dass  $G_M = 1$  ist, wird  $G_w = 1$  und  $x(s) = \hat{w}$  mit der Dämpfung  $\mathcal{D} = 1$ .

Durch die Wahl der Übertragungsfunktion  $G_M(s)$  kann man die gewünschte Dämpfung erreichen.

## 5. Zusammenfassung

In der vorliegenden Publikation wurde zum ersten Mal ein neues Verfahren zur Beschleunigung der Regelung eines Regelkreises mit dem konventionellen Standard-Regler (P, I, PI, PD, PID) vorgestellt und simuliert. Dies erfolgt mit einem *Turbo*-Baustein, der sich eine spezielle Aufschaltung der Regelstrecke darstellt. Somit ist der Aufbau des Turbo-Bausteins überraschend einfach und gleichzeitig effektiv. Die Ausregelzeit kann bei gleicher optimalen Dämpfung halbiert werden.

In einer Reihe von Projektarbeiten wurde der Turbo-Regler erfolgreich getestet, und die neue Wege zum dessen Einsatz wurden diskutiert.

Die vorliegende Publikation ist die erste Veröffentlichung über Turbo-Regler und unterliegt dem Urheberrecht. Alle Rechte sind bei S. Zacher vorbehalten.

Die Weiterentwicklung oder Nutzung des *Turbo*-Bausteins ohne Referenz auf Urheber ist nicht zugelassen..

Für die Anwendung der vorliegenden Publikation in der Industrie, im Laborbetrieb und in anderen praktischen Fällen sowie für eventuelle Schäden, die aus unvollständigen oder fehlerhaften Angaben über das dynamische Systeme ergeben können, übernimmt der Autor keine Haftung.



*Automation-Letter Nr. 2, 2015*

Prof. Dr. S. Zacher

**Ende der Präsentation  
Turbo-Regler**