



Prof. Dr. S. Zacher

Tuning mit ZBV

Stabilitätsprüfung und Regler-Einstellung nach dem Zwei-Bode-Plots-Verfahren

„Die Konstruktion der negativ inversen Ortskurve ist recht unhandlich. Dagegen bietet das von Zacher in [144] veröffentlichte Verfahren mit dem negativ inversen Bode-Diagramm des Reglers

$$G_{\text{Rrez}}(j\omega) = \frac{-1}{G_{\text{R}}(j\omega)}$$

und dem Bode-Diagramm der Strecke $G_{\text{S}}(j\omega)$ mehrere Vorteile. Da die Schnittstelle von Amplitudengängen $|G_{\text{Rrez}}(\omega)|_{\text{dB}}$ und $|G_{\text{S}}(j\omega)|_{\text{dB}}$ dieselbe Frequenz hat, wie die Durchtrittsfrequenz ω_{d} von $G_{\text{O}}(j\omega)$, gilt laut Gl. (6.69) folgende Stabilitätsbedingung: Ein System ist stabil, wenn an der Schnittstelle von Amplitudengängen

$$|G_{\text{S}}(j\omega_{\text{d}})| = \left| \frac{-1}{G_{\text{R}}(j\omega_{\text{d}})} \right|$$

die Summe von beiden Phasengängen $\varphi_{\text{Rrez}}(\omega_{\text{d}}) + \varphi_{\text{S}}(\omega_{\text{d}}) < 360^\circ$ ist.“

S. Zacher, M. Reuter: *Regelungstechnik für Ingenieure.*

Seite 199, Springer Vieweg Verlag, 15. Auflage, 2017

Abstract, Urheberrechts- und Haftungshinweis

Das *Zwei-Bode-Plots* Verfahren wurde von *Zacher* aus dem *Zweiortskurvenverfahren* [1] hergeleitet und zu einem neuen Stabilitätskriterium [2] weiter entwickelt. Dabei bleibt der Vorteil des Z.O.V. doch beibehalten: man soll keine Übertragungsfunktion bzw. keinen Frequenzgang des gesamten offenen Regelkreises bilden, sondern die einzelnen Übertragungsfunktionen des Reglers und der Strecke.

Das Bode-Diagramm des offenen Regelkreises wird in zwei Teilen aufgeteilt, nämlich das Bode-Diagramm des Reglers $G_S(j\omega)$ und das Bode-Diagramm der negativ inversen Strecke $G_S(j\omega)$, die nachfolgend kurz als reziproke Strecke $G_{S_{\text{rez}}}(j\omega)$ genannt wird:

$$G_{S_{\text{rez}}}(j\omega) = \frac{-1}{G_S(j\omega)}$$

Die Schnittstelle von Amplitudengängen $|G_{S_{\text{rez}}}(\omega)|_{\text{dB}}$ und $|G_R(j\omega)|_{\text{dB}}$ im Bode-Diagramm hat dieselbe Frequenz, wie die Durchtrittsfrequenz ω_d von $G_0(j\omega)$.

Daraus folgt nach *Zacher* [2, 3] folgende Stabilitätsbedingung: Ein geschlossener Regelkreis wird stabil, wenn der Abstand zwischen Phasengängen des Reglers $\varphi_R(\omega)$ und der reziproken Strecke $\varphi_{S_{\text{rez}}}(\omega)$ im Bode-Diagramm bei Durchtrittsfrequenz ω_d kleiner 360° ist.

Mit dem *Zwei-Bode-Plots* Verfahren kann man sowohl die Regler-Verstärkung K_{PR} , als auch die Zeitkonstanten T_n und T_v des Reglers einstellen. Das ZBV ist einfacher als die bekannten etablierten Frequenzverfahren, die z.B. in [2], Seiten 236-237, beschrieben sind.

In der vorliegenden Publikation wird die Anwendung des *Zwei-Bode-Plots-Verfahrens* (ZBV) an einem Beispiel erläutert. Mehr darüber im Buch [4].

Die vorliegende Publikation unterliegt der Urheberrecht. Alle Rechte sind bei Dr. S. Zacher vorbehalten.

All rights are by the author, Dr. S. Zacher, reserved. Die Weiterentwicklung oder Nutzung der Publikation ohne Referenz auf Urheber ist nicht zugelassen. **No use of this publication without references on the author.**

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. **For the practical use of the results of this publication takes the author no responsibility.**

INHALT:

1. Aufgabenstellung	4
2. Bode-Diagramm des Reglers	5
3. Bode-Diagramm der reziproken Strecke	5
4. Stabilitätsprüfung nach ZBV	6
5. Reglereinstellung nach ZBV	7
6. Tuning	8
7. Zusammenfassung	9
8. Literaturverzeichnis	10

1 Aufgabenstellung

Gegeben ist eine P-T2-Regelstrecke:

$$G_S(s) = \frac{K_{PS}}{T_2^2 s^2 + 2dT_2s + 1}$$

$$K_{RS} = 4$$

$$T_2 = 2.5 \text{ s}$$

$$d = 0,5$$

Diese Strecke soll mit einem realen PID-Regler in additiver Form, auch PID-T1-Regler genannt, geregelt werden: :

$$G_R(s) = K_{PR} + \frac{K_{PR}}{sT_n} + \frac{K_{PR}(1 + sT_v)}{(1 + sT_R)}$$

Der Regler soll so eingestellt werden, damit die gewünschte Phasenreserve ca. 60° erreicht wird, d.h. $\varphi_{RD} = 60^\circ$.

Zunächst werden die Kennwerte des Reglers beliebig gewählt:

$$K_{RR} = 10$$

$$T_n = 0,1 \text{ s}$$

$$T_v = 0,25 T_n$$

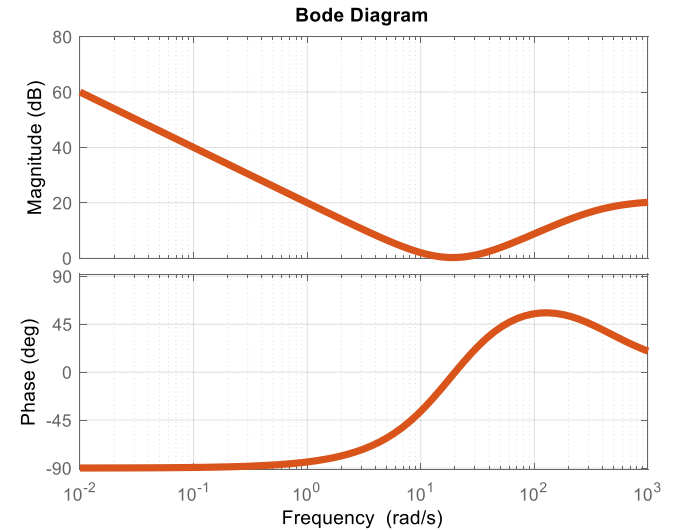
$$T_R = 0,1 T_v$$

2 Bode-Diagramm des Reglers

Das Bode-Diagramm des Reglers wird nach folgendem MATLAB-Skript erstellt:

$$G_R(s) = K_{PR} + \frac{K_{PR}}{sT_n} + \frac{K_{PR}(1+sT_v)}{(1+sT_R)}$$

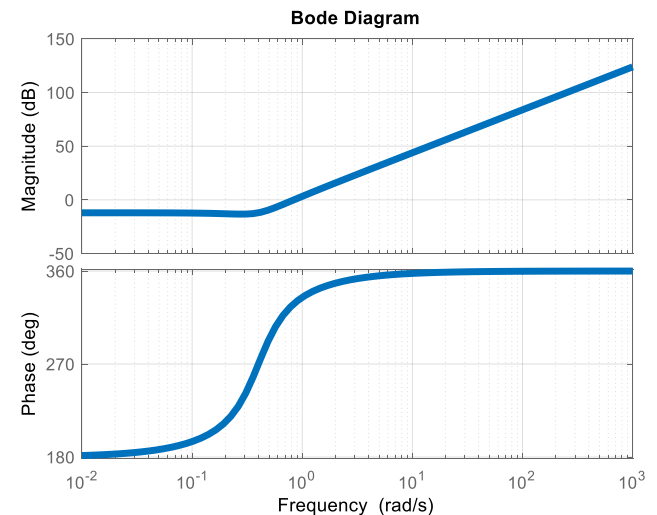
```
KpR=10; Tn=0,1; Tv=0.25*Tn; TR=0.1*Tv;  
s= tf('s');  
GR= KpR + (KpR/(s*Tn)) + (KpR*s*Tv)/(1+s*TR);  
bode(GR, {0.01,1000}); grid
```



3 Bode-Diagramm der reziproken Strecke

$$G_{Srez}(s) = -\frac{1}{G_S(s)} = -\frac{T_2^2 s^2 + 2dT_2 s + 1}{K_{PS}}$$

```
KpS=4; T2=2.5; d=0.5;  
s= tf('s');  
Gs=KpS/(s^2*T2^2+s*2*d*T2+1);  
Gs_rez=-1/Gs;  
bode(GR, {0.01,1000}); grid
```



4 Stabilitätsprüfung nach ZBV

Das Bode-Diagramm des Reglers und der negativ inversen Strecke (kurz reziproke Strecke genannt) werden beide in einem Bode-Diagramm erstellt.

Bei der Durchtrittsfrequenz

$$\omega_D = 1,98 \text{ rad/s}$$

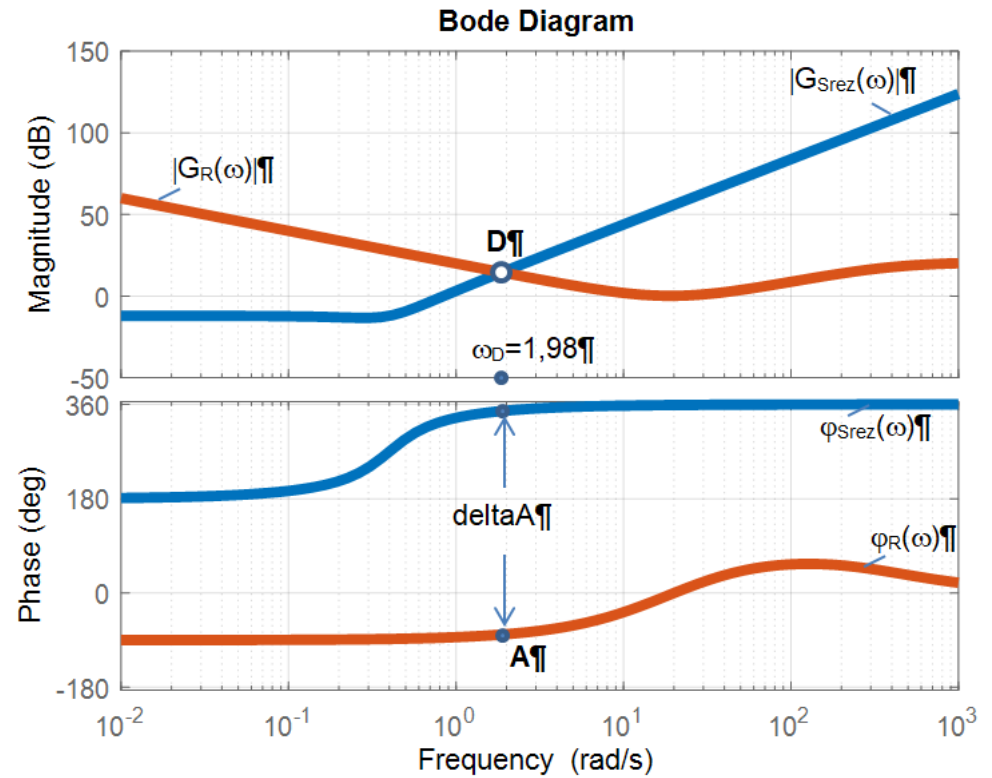
im Schnittpunkt D ist der Abstand $\Delta\varphi$ (im Bild als deltaA bezeichnet) zwischen Phasengängen

$$\Delta\varphi = 426,8^\circ$$

bzw.

$$\Delta\varphi > 360^\circ,$$

so ist der Kreis instabil.

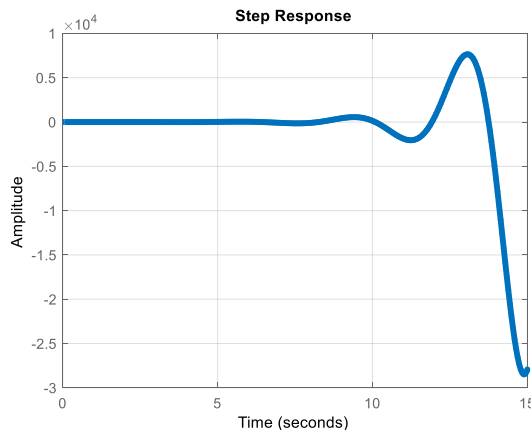


$$K_{RR} = 10$$

$$T_n = 0,1 \text{ s}$$

$$T_v = 0,25 T_n = 0,025 \text{ s}$$

$$T_R = 0,1 T_v = 0,0025 \text{ s}$$



5 Reglereinstellung nach ZBV

Um den Abstand $\Delta\varphi$ zwischen Phasengängen des Reglers und der reziproken Strecke zu reduzieren und folglich den Kreis zu stabilisieren, wird der Phasengang des PID-T1-Reglers vom Punkt A in Punkt A_{neu} mit gewünschter Phasenreserve $\varphi_{RD} = 60^\circ$ verschoben.

```
Tn=Tn*96.9/1.98;
Tv=0.25*Tn; TR=0.1*Tv;
GR=KpR+(KpR/(s*Tn))+(KpR*s*Tv)/(1+s*TR);
bode(GR,{0.01,1000});
```

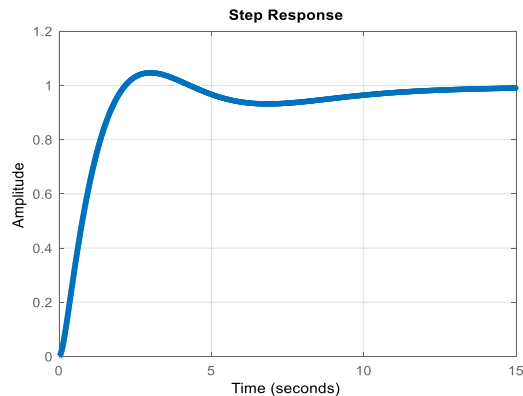
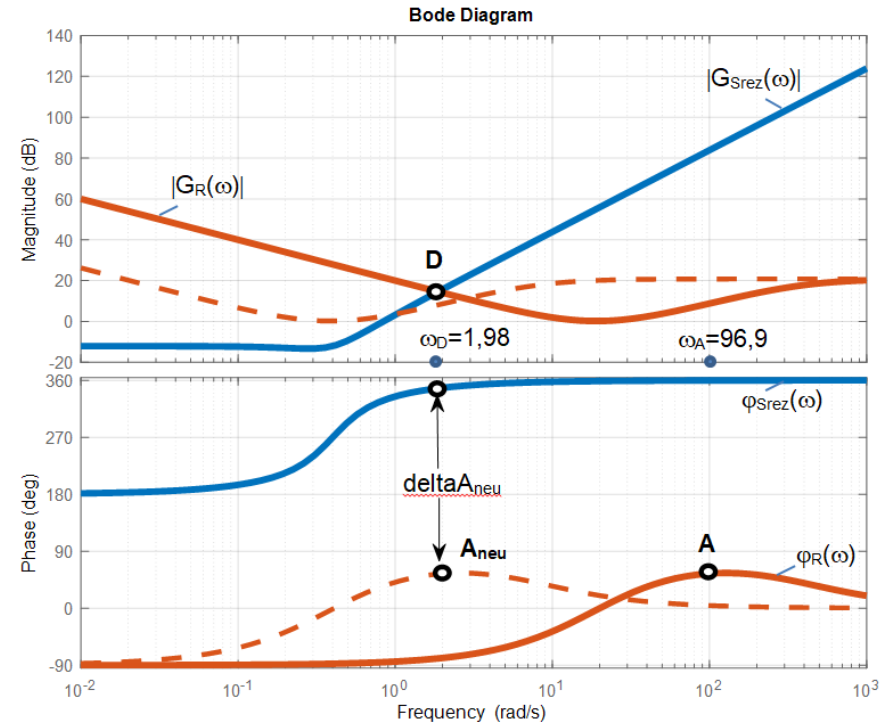
Bei der Durchtrittsfrequenz $\omega_D=1,98$ rad/s im Schnittpunkt D ist der Abstand $\Delta\varphi$ (im Bild als $\text{deltaA}_{\text{neu}}$ bezeichnet) zwischen Phasengängen

$$\Delta\varphi = 293,5^\circ$$

bzw.

$$\Delta\varphi < 360^\circ,$$

so ist der Kreis stabil. Die Phasenreserve ist $\varphi_{RD} = 360^\circ - 293,5^\circ = 66,5^\circ$.



$$K_{RR} = 10$$

$$T_n = 4.89 \text{ s}$$

$$T_v = 0,25 T_n = 1,22 \text{ s}$$

$$T_R = 0,1 T_v = 0,122 \text{ s}$$

6 Tuning

Das gesamte manuelle MATLAB-Tuning-Skript ist unten gezeigt.

Nach der Ausführung der Sektion 2 des Skripts soll die Frequenz des Schnittpunktes D (hier: $w=1.98$) aus dem Bode-Diagramm ausgelesen und in die Sektion 3 eingegeben werden. Nach der Ausführung der Sektion 3 wird die Frequenz des gewünschten Punktes Aneu (hier: $w= 96,9$) ausgelesen und in die Sektion 4 eingegeben.

%% 1. Gegeben: Regelstrecke

```
KpS=4; T2=2.5; d=0.5;
s= tf('s');
Gs=KpS/(s^2*T2^2+s*d*T2+1);
Gs_rez=-1/Gs;
bode(Gs_rez,{0.01,1000}); hold on; grid
```

%% 2. idealer PID-Regler, additive Form

```
Kar=1; Tn=0.1; Tv=0.25*Tn; TR=0.1*Tv;
GR=KpR+(KpR/(s*Tn))+(KpR*s*Tv)/(1+s*TR);
bode(GR,{0.01,1000}); hold on; grid
```

%% 3. Schnittpunkt D bei $w=1.98$

```
[magS, phaseS]=bode(Gs_rez,1.98)
[magR, phaseR]=bode(GR,1.98)
deltaA = phaseS - phaseR;
if deltaA >360
    chr=('instabil')
else
    chr=('stabil')
end
```

%% 4. Hut von $w=96.9$ in $w=1.98$ verschieben

```
Tn=Tn*96.9/1.98; Tv=0.25*Tn; TR=0.1*Tv;
GR=KpR+(KpR/(s*Tn))+(KpR*s*Tv)/(1+s*TR);
bode(GR,{0.01,1000});
```

%% 5. Im Punkt Aneu bei $w=1.98$

```
[magS, phaseS]= bode(Gs_rez,1.98)
[magR, phaseR]= bode(GR,1.98)
deltaAneu = phaseS - phaseR;
if deltaAneu >360
    chr=('instabil')
else
    chr=('stabil')
end
```

%% 6. Phasenreserve im Punkt Aneu

```
phi_Rd=360 - deltaAneu
```

%% 7. Sprungantwort im Aneu

```
G0 =Gs*GR;
Gw =G0/(1+G0);
hold off
step(Gw,15)
```


7. Zusammenfassung

Es ist gezeigt, wie die Stabilität eines geschlossenen Regelkreises nach zwei getrennten Übertragungsfunktionen, des Reglers und der negativ inversen Strecke $G_S(j\omega)$, kurz als reziproke Strecke $G_{S_{\text{rez}}}(j\omega)$ genannt, im Bode-Diagramm bestimmt wird.

Der Vorteil dieses Verfahrens ist offensichtlich, nämlich: man braucht keine Übertragungsfunktion bzw. keinen Frequenzgang des gesamten offenen $G_0(j\omega)$ oder geschlossenen $G_w(j\omega)$ Regelkreises bilden.

Noch ein Vorteil des ZBV (Zwei-Bode-Plots-Verfahrens) besteht darin, dass man damit sowohl die Regler-Verstärkung K_{PR} , als auch die Zeitkonstanten T_n und T_v des Reglers einfach einstellen kann.

An einem Beispiel ist gezeigt, wie das manuelle Tuning mit MATLAB implementiert wird. Mehr darüber findet man in [4].

Da die theoretischen Grundlagen des ZBV in diesem *Letter* nicht behandelt wurden, kann ich mögliche Fragen per Mail beantworten oder nach Vereinbarung an einem Seminar vortragen. Dafür reicht eine formlose Anfrage an meine Mail-Adresse zu senden:

info@szacher.de

Stuttgart, den 04.03.2018 S. Zacher

8 Literaturverzeichnis

- [1] A. Leonhard: *Ein neues Verfahren zur Stabilitätsuntersuchung*. Arch. Elektrotechn., 1944
- [2] S. Zacher: *Das zweite Leben des Zweiorstkurvenverfahrens*. Automation-Letter Nr.10, Dr. S. Zacher Verlag, Stuttgart, 2018, ISBN 978-3-937638-36-2
- [3] S. Zacher; M. Reuter: *Regelungstechnik für Ingenieure*. 15. Auflage, Springer-Vieweg Verlag, 2017
- [4] S. Zacher: *Zwei-Bode-Plots Verfahren*. Dr. S. Zacher Verlag, Stuttgart, 2018, ISBN 978-3-937638-37-9