Automation-Letter Nr. 36
17.01.2018

Prof. Dr. S. Zacher

Dead-Beat-Regler

Ein Regler, der schnell schlägt

„Das Konzept der Kompensationsregelung ist auch für die digitale Regelung vorstellbar… Man kann das gewünschte Zeitverhalten $x_M(t)$ anders als vorher formulieren, dass die Regelgröße in möglichst kurzer Zeit ihren durch die Führungsgröße $w(t)$ vorgegebenen Wert annimmt. Dafür soll der Regler in der Lage sein, die Stellgröße auf einen möglichst großen Wert zu verstellen, d. h. von y_{Rmax} auf y_{Rmin} und umgekehrt, um die entsprechend schnelle Änderung der Regelgröße zu erreichen. Wegen der Anschläge des Stellgliedes beim Umschalten benutzte man dafür die Bezeichnung *bang-bang*-Regelung. Da dabei der Übergang der Regelgröße von einem zu dem anderen Sollwert ohne Überschwingen erfolgt, ist dieses Verfahren als *Dead-Beat-Regelung* … bekannt. “

S. Zacher, M. Reuter: ***Regelungstechnik für Ingenieure*.**
Seiten 367,368. Springer Vieweg Verlag, 15. Auflage, 2017

Abstract, Urheberrechts- und Haftungshinweis

Ausschalgebend für dieses *Letter* waren die Fragen von Studierenden, die per Mail und in einem Forum gestellt wurden. Früher hatte ich jede einzelne Frage persönlich per Mail geantwortet. Jedoch kamen dieselbe Fragen von anderen Studierenden wieder auf. So kam die Serie „Automation-Letters“ zustande, die sich später auch als eine Plattform für Express-Informationen zu neuen Verfahren entwickelte.

In vorliegender Ausgabe werden nun zwei nicht neue, sondern bereits im Lehrbuch [1] beschriebene Verfahren zum Entwurf eines modellbasierten Kompensationsregler auf endliche Einstellzeit, genannt *Dead-Beat-Regler*, erläutert, die eigentlich zum gleichen Ziel mit gleichen Ergebnissen führen.

Das erste Verfahren, nämlich die Reglereinstellung nach Polynom-Koeffizienten, stammt aus dem Buch [4], dass z. Z. völlig vergriffen und zu einem wertvollen Antiquariat geworden ist. Nach Vorgaben des Verlags zum Umfang des Buches war es leider nicht möglich, die Herleitungen des Buches [4] auch in nachfolgenden Auflagen zu behalten. Somit dient dieses *Letter* ein Ergänzung zum o.g. Buch [1].

Das zweite hier diskutierte Verfahren bezieht sich auf Reglerentwurf nach einem gewünschten Verhalten des geschlossen Kreises, das in meinen Lehrveranstaltungen an der Hochschule Darmstadt und an den DHBW Mannheim und Stuttgart behandelt wird. Die Beispiele hierzu sind im Buch [3] zu finden.

I N H A L T :

1 Einführung

Ausschlaggebend für dieses *Letter* waren folgende Fragen von Studierenden:

Frage 1: Verständnisproblem Dead-Beat-Regler

Hallo Forum,

ich darf eine Hausarbeit über das Thema Dead-Beat-Regler schreiben und verstehe die Literatur nicht ganz. Ich hoffe ich habe das passende Forum gewählt.
Ich habe dazu das Buch "Regelungstechnik für Ingenieure" (ISBN 978-3-8348-0018-3*) gefunden (als PDF verfügbar im Springer-Link).
Im Kapitel 12.3.1 (S. 407) wird allgemein der Kompensationsregler beschrieben, mit dem Aufbau wie im Anhang (Aufbau.png). Das gestrichelte Kästchen ist der Regler mit der Übertragungsfunktion G_R. Wenn man diesem die Übertragungsfunktion wie in Formel.png beschrieben gibt, hat der gesamte Regelkreis die vorgegebene gewünschte Übertragungsfunktion G_M.
Um einen Dead-Beat-Regler (d.h. einen mit endlicher Einstellzeit) zu erhalten, muss man scheinbar G_M auf bestimmte Weise vorgeben. In Rechnung.png ist "erklärt" wie man dann G_R berechnet.
Die gezeigten Formeln für e_r und y_R beschreiben (als Z-Transformierte) Signale die in 3 Schritten auf die gewünschten Endwerte kommen. Ich verstehe aber nicht, wie die Konstanten d_1, c_0, c_1 berechnet werden? Wo kommen die konkreten Werte her, die in der letzten Zeile stehen?

TL;DR: Wie kommen die konkreten Zahlen her, die in der letzten Zeile von Rechnung.png stehen?

Re: Verständnisproblem Dead-Beat-Regler

https://www.mikrocontroller.net/topic/352352

Frage 2: Verständnisproblem Beispiel Kompensationsregler Buch Regelungstechnik

Sehr geehrter Dr. Zacher,

beim Studium der Elektrotechnik im Fachbereich Regelungstechnik bin ich auf Ihr Buch "Regelungstechnik für Ingenieure - Analyse, Simulation und Entwurf von Regelkreisen" (15. Auflage) gestoßen und habe es begeistert gelesen. Vor allem das Kapitel 12.1 "Modellbasierte Regelung" hat mich sehr interessiert.

Jedoch musste ich feststellen, dass ich in Unterpunkt 12.1.7 Dead-Beat-Regler bei dem angegebenen Beispiel ein Verständnisproblem habe. Könnten Sie mir bitte mitteilen, wie Sie auf die Ergebnisse für die Regler-Übertragungsfunktion RG(z) bzw. die Koeffizienten kommen. Mir fehlen nämlich zu deren Berechnung Angaben zur Übertragungsfunktion GM(z) oder der gewünschten Sprungantwort xM(z), die das gewünschte Verhalten des Regelkreises beschreiben?

Ich habe genau diese ungelöste Frage bereits in einem Forum gefunden. Aber auch dort konnte sie nicht gelöst werden. Deshalb schreibe ich Sie jetzt direkt an.

Über eine Antwort würde ich mich sehr freuen!

Mit freundlichen Grüßen

Einführung

Bevor ich zum Antworten übergehe und die Lösungen zeige, möchte ich zwei allgemeine Anmerkungen machen:

1. Beim Begriff Dead-Beat-Regler sind zwei Deutungen möglich: nach einer heißt es „Ein Regler, mit dem die Regelgröße in *möglichst kurze Zeit* ihren durch die Führungsgröße $w(t)$ vorgegeben Wert annimmt.“ Die möglichst kurze Zeit bei Systemen der n-ten Ordnung, die dabei auch als *endliche* Zeit verstanden wird, ist gleich nT_A, wobei T_A die Abtastzeit ist. Beispielsweise soll damit der Regelvorgang eines Systems der 2. Ordnung mit der Abtastzeit T_A = 1 sec nach T_{aus}= 2 sec abgeschlossen sein. Unter Beachtung, dass T_{aus} = 3,9T_M ist, sollte die gewünschte Übertragungsfunktion in diesem Beispiel wie folgt gewählt und dann in z-Funktion transformiert werden:

$$G_M(s) = \frac{1}{1+sT_M} \quad \text{mit} \quad T_M = \frac{T_{aus}}{3,9} = 0,256 \text{ sec}$$

2. Aber auch Regler, bei denen die Regelgröße *„innerhalb der vorgeschriebenen Zeit*“ aus einem Anfangszustand x(0) in ein Endzustand x(∞) umgestellt wird, heißen Dead-Beat-Regler. Für das obigen Beispiel kann also die Ausregelzeit T_{aus} beliebig gewählt werden, obwohl praktisch realisierbar nicht weniger als T_{aus}= 2 sec wird. Diese Option des Dead-Beat Reglers ist in [1] auf Seiten 369-370, auch in [3] auf Seiten 5, 57,132-134, beschrieben und wird nachfolgend nicht behandelt. Merken wir nur, dass die Einstellung eines solchen Reglers nicht im z-Bereich, sondern im Zeitbereich erfolgt.

3. Nun zur Berechnung der z-Übertragungsfunktion eines digitalen Dead-Beat-Regler $G_R(z)$ des Punktes 1 bzw. mit der Regelung in *möglichst kurze Zeit* gibt es auch zwei Verfahren:

   - Nach Polynom-Koeffizienten von z-Transformierten des Reglers, wie in [1] auf Seite 368 gezeigt ist
   - Nach gegebene z-Übertragungsfunktion der Strecke $G_S(z)$, wie in [3] auf Seite 5 gegeben ist

Die beiden letzten Verfahren werden nachfolgend beschrieben. Hoffentlich wird daraus auch ersichtlich, das wegen großen Umfangs die ausführliche Beschreibung von diesen Verfahren die Rahmen des Buches [1] sprengen sollten.

2 Reglersynthese nach Polynom-Koeffizienten (Quelle [4], Seiten 357-362)

Die gegebene Regelstrecke mit K_{PS}=0,5; T_1 = 1s; T_i = 4s und Abtastzeit T = 1s soll z-transformiert werden (hier: ohne Berücksichtigung der Rechentotzeit):

$$G_S(s) = \frac{K_{PS}}{sT_i(1+sT_1)} \quad \Longrightarrow \quad G_S(z) = \frac{z-1}{z} Z\left[\frac{G_S(s)}{s}\right] = \frac{K_{PS}}{T_i} \cdot \frac{zb_1 + b_0}{(z-1)(z-z_1)}$$

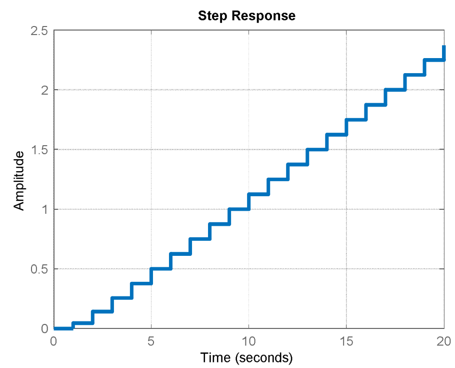
Hier sind:

$$b_0 = T_1 - z_1(T + T_1) \qquad z_1 = e^{-\frac{T}{T_1}}$$
$$b_1 = T - T_1 + T_1 z_1$$

MATLAB-Skript für die Berechnung der Streckenparameter:

```
Kps=0.5;  T1=1;  Ti=4; T=1;
z1=exp(-T/T1);
b0=T1-z1*(T+T1);
b1=T-T1+T1*z1;
z = tf('z');
Gs=(Kps/Ti)*(z*b1+b0)/((z-1)*(z-z1))
step(Gs,20)
```

$$\Longrightarrow \quad G_S(z) = \frac{0,04598z + 0,03303}{z^2 - 1,3679z + 0,3679}$$



Die Sprungantwort der Strecke
nach dem Einheitssprung der Stellgröße

Der Zählerpolynom und der Nennerpolynom des Reglers sind im Allgemeinen:

$$G_{\mathrm{R}}(z)=\frac{y_R(z)}{e(z)}=\frac{(z-1)(c_0 z^{n-1}+c_1 z^{n-2}+\ldots+c_{n-1})+c_n}{(z-1)(w_0 z^{n-1}+d_1 z^{n-2}+\ldots+d_{n-1})}$$

bzw. bei n = 2:

$$G_{\mathrm{R}}(z)=\frac{c_0+c_1 z^{-1}}{w_0+d_1 z^{-1}}=\frac{c_0}{w_0}\cdot\frac{z+\frac{c_1}{c_0}}{z+\frac{d_1}{w_0}}$$

Die Übertragungsfunktion des offenen Kreises ist:

$$G_0(z)=G_{\mathrm{R}}(z)G_{\mathrm{S}}(z)=\frac{c_0}{w_0}\cdot\frac{z+\frac{c_1}{c_0}}{z+\frac{d_1}{w_0}}\cdot\frac{K_{PS}}{T_i}\cdot\frac{zb_1+b_0}{(z-1)(z-z_1)}$$

Die Reglereinstellung erfolgt in zwei Schritten:

1. Die Koeffizienten c_0 und c_1 werden so gewählt, damit die Polstelle z=z1 kompensiert wird. Die Polstelle z=1 darf nicht kompensiert werden, weil |z |=1 ist (Stabilitätsgrenze).
2. Der Koeffizient d_1 wird so gewählt, damit die Regelung in endlicher Zeit erfolgt.

2 Reglersynthese auf endliche Einstellzeit nach [4], Seiten 357-362

Im ersten Schritt wird die Polstelle $z = z_1$ kompensiert bzw.

$$z + \frac{c_1}{c_0} = z - z_1 \quad \Longrightarrow \quad \frac{c_1}{c_0} = -z_1 = -0{,}3679$$

Somit wird:

$$G_0(z) = \frac{c_0}{w_0} \cdot \frac{1}{z + \frac{d_1}{w_0}} \cdot \frac{K_{PS}}{T_i} \cdot \frac{zb_1 + b_0}{(z-1)}$$

Im zweiten Schritt wird zuerst die Übertragungsfunktion des geschlossenen Kreises erstellt:

$$G_w(z) = \frac{G_\mathrm{R}(z)G_\mathrm{S}(z)}{1 + G_\mathrm{R}(z)G_\mathrm{S}(z)}$$

Die charakteristische Gleichung des geschlossenen Kreises:

$$1 + G_\mathrm{R}(z)G_\mathrm{S}(z) = 0 \quad \Longrightarrow \quad 1 + G_\mathrm{R}(z)G_\mathrm{S}(z) = 1 + \frac{c_0}{w_0} \cdot \frac{K_{PS}}{T_i} \cdot \frac{zb_1 + b_0}{(z + \frac{d_1}{w_0})(z-1)} = 0$$

$$1 + G_\mathrm{R}(z)G_\mathrm{S}(z) = \frac{(z + \frac{d_1}{w_0})(z-1) + \frac{c_0}{w_0} \cdot \frac{K_{PS}}{T_i} \cdot zb_1 + b_0}{(z + \frac{d_1}{w_0})(z-1)} = 0$$

2 Reglersynthese auf endliche Einstellzeit nach [4], Seiten 357-362

$$1+G_{\mathrm{R}}(z)G_{\mathrm{S}}(z)=\frac{z^{2}+\left(\frac{d_{1}}{w_{0}}-1+\frac{c_{0}}{w_{0}}\cdot\frac{K_{PS}}{T_{i}}\cdot b_{1}\right)z+\frac{c_{0}}{w_{0}}\cdot\frac{K_{PS}}{T_{i}}\cdot\frac{d_{1}}{w_{0}}}{(z+\frac{d_{1}}{w_{0}})(z-1)}=0$$

Die Pole des geschlossenen Kreises sind die Wurzeln der charakteristischen Gleichung des geschlossenen Kreises. Im betrachteten Fall sind das die Wurzeln der quadratischen Gleichung:

$$z^{2}+\left(\frac{d_{1}}{w_{0}}-1+\frac{c_{0}}{w_{0}}\cdot\frac{K_{PS}}{T_{i}}\cdot b_{1}\right)z+\frac{c_{0}}{w_{0}}\cdot\frac{K_{PS}}{T_{i}}\cdot\frac{d_{1}}{w_{0}}=0$$

<u>Die Aussagen der digitalen Regelungstechnik:</u>

Ein System ist stabil, wenn alle Pole in der z-Ebene innerhalb des Einheitskreises liegen bzw. $|z_i|<1$.

Ein System wird in endlicher Zeit geregelt, wenn alle Pole in den Ursprung der z-Ebene fallen bzw. $z_i = 0$.

Um die letzte Aussage im betrachteten Fall zu realisieren, soll die obige Gleichung wie folgt aussehen:

$$z^{2}=0$$

Dafür sollen beide Koeffizienten der charakteristischen Gleichung auf Null gesetzt werden:

$$\frac{d_{1}}{w_{0}}-1+\frac{c_{0}}{w_{0}}\cdot\frac{K_{PS}}{T_{i}}\cdot b_{1}$$

$$\frac{c_{0}}{w_{0}}\cdot\frac{K_{PS}}{T_{i}}b_{0}-\frac{d_{1}}{w_{0}}=0$$

Daraus ergibt sich:

$$\frac{c_0}{w_0} = \frac{1}{K_{PS}} \cdot \frac{T_i}{b_0 + b_1} = \frac{1}{K_{PS}} \cdot \frac{T_i}{T(1-z_1)b_0 + b_1} = 12,656$$

$$\frac{d_1}{w_0} = \frac{c_0}{w_0} \cdot \frac{K_{PS}}{T_i} b_0 = \frac{b_0}{b_0 + b_1} = \frac{T_1}{T} - \frac{z_1}{1-z_1} = 0,418$$

Und letztendlich:

$$G_R(z) = 12,656 \frac{z - 0,368}{z + 0,418} = \frac{y_R(z)}{e(z)}$$

$$12,656 \frac{1 - 0,368 z^{-1}}{1 + 0,418 z^{-1}} = \frac{y_R(z)}{e(z)}$$

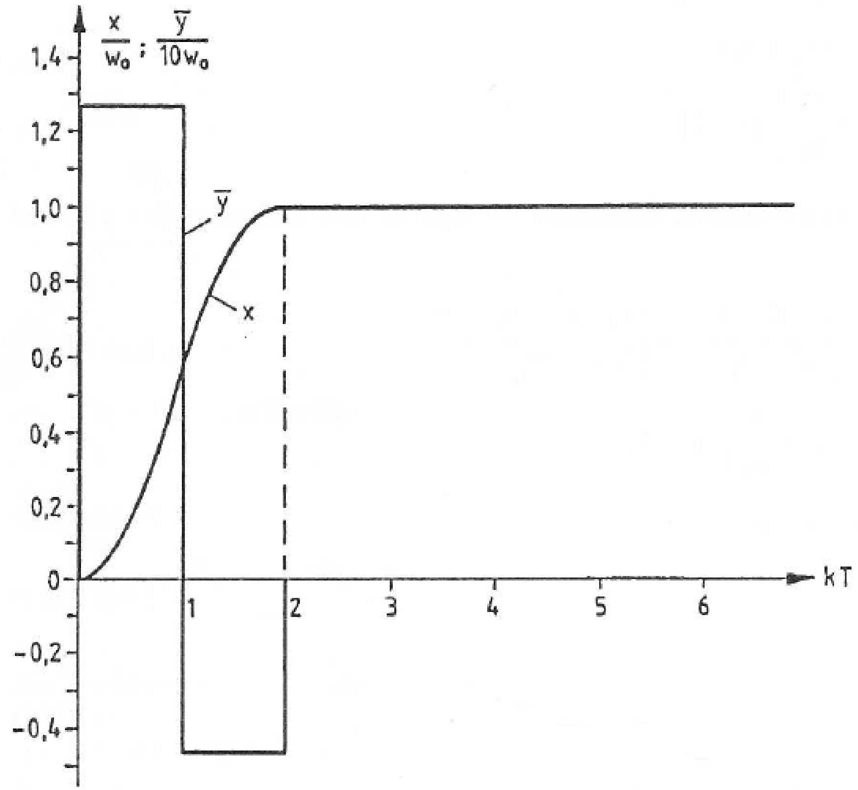
Daraus werden die Differenzengleichung mittels z-Rücktransformation und die Rekursion der Stellegröße nach [4], Seite 362, berechnet:

$$(1 + 0,418 z^{-1}) y_R(z) = 12,656(1 - 0,368 z^{-1}) e(z)$$

$$y_{Rk} = 0,418 y_{Rk-1} + 12,656 e_k - 4,656 e_{k-1}$$

$k = 0$	$y_{R0} = 12,656 w_0$	$x_0 = w_0 - e_0 = 0$
$k = 1$	$y_{R1} = 4,656 w_0$	$x_1 = 0,582 w_0$
$k = 2$	0	$x_2 = w_0$

Die berechneten Stellgröße und Sprungantwort sind im Bild rechts gezeigt.



Quelle: [4], Seite 362

3 Reglerentwurf nach gewünschtem Verhalten ([3], Seiten 5, 58, 135-136)

Die Regelstrecke wird üblicherweise mit der z-Übertragungsfunktion $G_S(z)$ gegeben werden oder soll von gegebener $G_S(s)$ in z-Bereich transformiert werden, z.B. bei der gegebenen Abtastzeit T_A=0,1 s und unter Beachtung der Rechentotzeit ergibt sich laut [3], Seite 135 (siehe auch Hilfe in [2])

$$G_S(s) = \frac{0,8}{1+1,5s} \quad \Longrightarrow \quad G_{HS}(z) = \frac{z-1}{z} \cdot \frac{1}{z} Z\left[\frac{G_S(s)}{s}\right] = \frac{0,0516}{z(z-0,9352)}$$

Der Index H deutet darauf hin, dass die z-Transformation zusammen mit dem Abtast-Halteglied erfolgt.

Ein Kompensationsregler hat nach [1] folgende Struktur:

$$G_R(z) = \frac{G_M(z)}{1-G_M(z)} \cdot \frac{1}{G_{HS}(z)}$$

Das gewünschte Verhalten $G_M(z)$ eines Dead-Beat-Reglers wird so gewählt, dass alle Pole der charakteristischen Gleichung des geschlossenen Kreises in den Ursprung der z-Ebene fallen bzw. z_i = 0 und auch keine bleibende Regeldifferenz im geregelten Zustand bzw. bei $t \to \infty$ und $z \to 1$ entsteht. Einfachheitshalber nehmen wir an, dass die Strecke einen I-Antei hat und das System der n =1 Ordnung ist. Unter diesen Annahmen erfüllt die folgende Übertragungsfunktion beide o.g. Bedingungen (minimale Regelzeit und kein statischer Fehler):

$$G_M(z) = \frac{r_0}{z-(1-r_0)}$$

Diese Übertragungsfunktion hat eine Polstelle bei

$$z_1 = (1-r_0)$$

wobei es gilt: $\quad 0 < r_0 < 1$

3 Reglerentwurf nach gewünschtem Verhalten ([3], Seiten 5, 58, 135-136)

Für diese gewünschte Übertragungsfunktion $G_M(z)$ ergibt sich folgende Übertragungsfunktion des Reglers:

$$G_R(z) = \frac{G_M(z)}{1-G_M(z)} \cdot \frac{1}{G_{HS}(z)} = \frac{r_0}{z-1} \cdot \frac{1}{G_{HS}(z)}$$

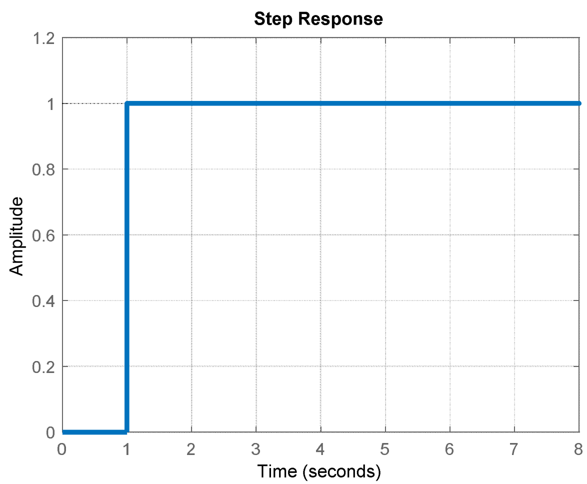
Um die Polstelle z1 auf Null zu setzten, wie es von Dead-Beat-Regler zu erwarten ist, soll r_0 wie folgt gewählt werden:

$$r_0 = 1 \quad \Longrightarrow \quad z_1 = (1-r_0) = 0$$

Das gewünschte Verhalten ist somit:

$$G_M(z) = \frac{1}{z-(1-1)} = \frac{1}{z}$$

Das ist reine Totzeit!



Sprungantwort des Kreises bei r_0 = 1

Sieht attraktiv aus, jedoch wird der Regler nicht realisierbar (Zählergrad > Nennergrad):

$$G_{\mathrm{R}}(z) = \frac{\frac{1}{z}}{1-\frac{1}{z}} \cdot \frac{1}{G_{\mathrm{HS}}(z)} = \frac{1}{z-1} \cdot \frac{1}{G_{\mathrm{HS}}(z)} = \frac{z(z-0{,}9352)}{0{,}0516(z-1)}$$

Um den Regler praktisch realisierbar zu machen, soll die Polstelle von 0 etwas verschoben und auf Strecke bezogen werden. Auf der Seite 5 des Buches [3] ist die Formel für Dead-Beat Regler ohne Herleitung gegeben, nämlich:

Für die Strecke $G_{\mathrm{HS}}(z) = \dfrac{Z_z(z)}{z^l N_z(z)}$

gilt der Regler $G_{\mathrm{R}}(z) = \dfrac{z^l N_z(z)}{Z_z(1)\cdot z^{l+m} - Z_z(z)}$

Die Bezeichnungen sind:

$Z_z(z)$	Zählerpolynom der Strecke	$Z_z(1)$	Zählerpolynom der Strecke bei *z* = 1
$N_z(z)$	Nennerpolynom der Strecke	*m*	Ordnung des Nennerpolynoms

Im obigen Beispiel sind:

$Z_z(z) = 0{,}0516$ $\quad Z_z(1) = 0{,}0516$ $\quad N_z(z) = z - 0{,}9352$ $\quad m = 1$ $\quad l = 1$

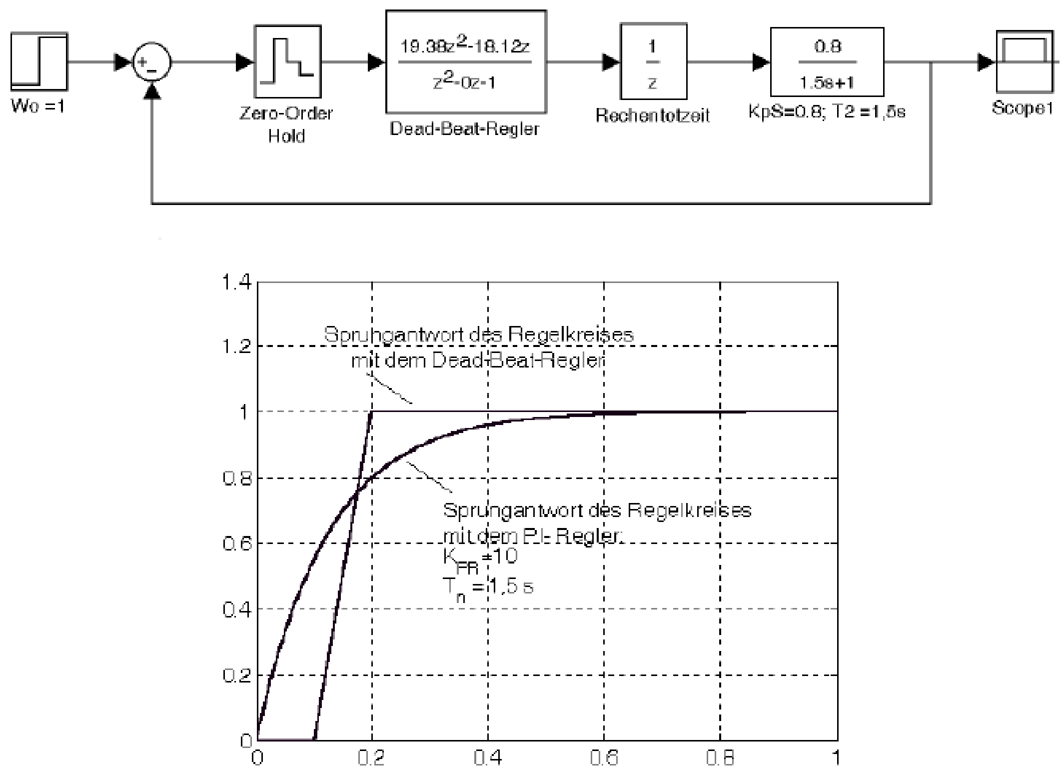
Daraus ergibt sich:

$$G_{\mathrm{R}}(z) = \frac{z(z-0{,}9352)}{0{,}0516z^2 - 0{,}0516} = \frac{z^2 - 0{,}9352z}{0{,}0516(z^2-1)} = \frac{19{,}38z^2 - 18{,}12z}{z^2-1}$$

Der Regelvorgang wird nach (*l*+*m*)-Abtastschritten abgeschlossen, d.h. die Ausregelzeit im betrachteten Beispiel ist:

$$T_{\text{aus}} = (l+m)T_{\text{A}} = (1+1)\cdot 0{,}1 = 0{,}2 \text{ sec}$$

Das Simulationsprogramm mit dem Dead-Beat-Regler und die Sprungantwort sind unten im Bild gegeben. Zum Vergleich ist in Bild auch die Sprungantwort mit einem optimal eingestellten Standard-PI-Regler eingetragen.



Quelle: [3], Seite 136

Abschließend merken wir, dass die folgenden Randbedingungen für den Entwurf des Dead-Beat-Reglers erfüllt werden sollen, was im betrachteten Beispiel auch der Fall ist:

Die Strecke hat die Form: $G_{\mathrm{HS}}(z) = \dfrac{b_1 z^{m-1} + b_2 z^{m-2} + \ldots + b_m}{z^m + a_1 z^{m-1} + \ldots + a_m} \cdot z^{-l} = \dfrac{Z_z(z)}{N_z(z)} \cdot z^{-l}$

Der Zählergrad $Z_z(z)$ der Strecke $G_{HS}(z)$ muss kleiner sein als der Nennergrad $N_z(z)$

Alle Pol- und Nullstellen entsprechen einem stabilen System, d.h. $|z| < 1$

Fassen wir den Entwurf des Dead-Beat-Reglers zusammen.

Die Entwurfsschritte:

a) Die Totzeit l der Strecke bestimmen bzw. aus der Übertragungsfunktion der Strecke $G_{HS}(z)$ ablesen

b) Die Ordnung m des Nennerpolynoms aus der Übertragungsfunktion der Strecke ablesen

c) Den Wert $Z_z(1)$ des Zählerpolynoms der Übertragungsfunktion der Strecke für $z = 1$ berechnen

d) Alle in vorherigen Punkten bestimmten Werte in die obige Formel für $G_R(z)$ eintragen.

Nun wiederholen wir die Bestimmung des Dead-Beat-Reglers für die Strecke des Abschnitts 2 nach der obigen Formel.

Die Strecke:

$$G_S(z) = \frac{z-1}{z} Z\left[\frac{G_S(s)}{s}\right] = \frac{0,04598z + 0,03303}{z^2 - 1,3679z + 0,3679} = \frac{Z_z(z)}{N_z(z)} \cdot z^{-l}$$

Hier sind: $m = 2$

$$l = 0$$

$$Z_z(z) = 0,04598z + 0,03303$$

$$Z_z(1) = 0,04598 + 0,03303 = 0,07901$$

$$N_z(z) = z^2 - 1,3679z + 0,3679$$

Somit gilt für den Dead-Beat-Regler:

$$G_R(z) = \frac{z^l N_z(z)}{Z_z(1) \cdot z^{l+m} - Z_z(z)} = \frac{z^0 (z^2 - 1,3679z + 0,3679)}{0,079z^2 - 0,046z + 0,033}$$

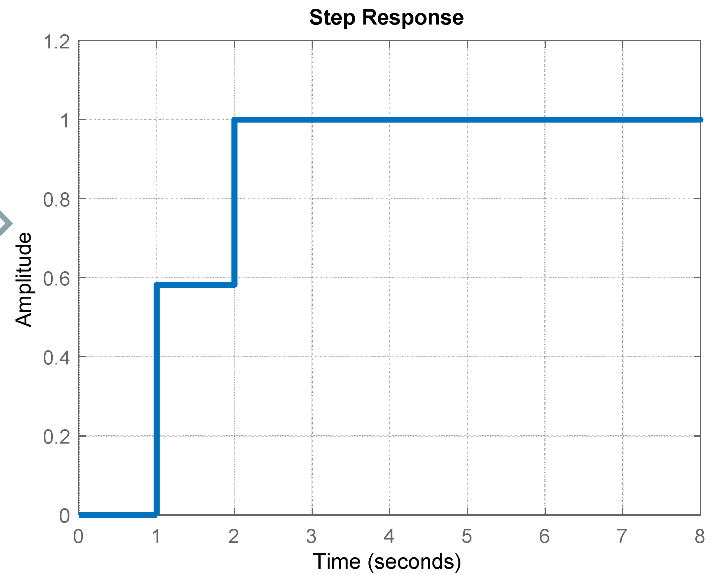
$$G_R(z) = \frac{z^2 - 1,3679z + 0,3679}{0,079z^2 - 0,046z + 0,033}$$

3 Entwurf des Dead-Beat-Reglers nach [3], Seiten 5, 58, 135-136

MATLAB-Skript für Dead-Beat-Regler dieses Abschnittes:

$$G_R(z) = \frac{z^2 - 1{,}3679z + 0{,}3679}{0{,}079z^2 - 0{,}046z + 0{,}033}$$

```
Kps=0.5;  T1=1;  Ti=4; T=1;
z1=exp(-T/T1); b0=T1-z1*(T+T1); b1=T-T1+T1*z1;
z = tf('z');
Gs=(Kps/Ti)*(z*b1+b0)/((z-1)*(z-z1));
Zz=0.04598*z+0.03303;
Z_1=0.07901;
Nz=z^2-1.3679*z+0.3679;
L=0; m=2;
%% Dead-Beat-Regler nach Abschnitt 3
GR= (z^L*Nz)/(Z_1*z^(L+m)-Zz)
G0=GR*Gs;
Gw=G0/(1+G0)
step(Gw, 8)
```



Zum Vergleich bestimmen wir Sprungantwort des Kreises mit dem Dead-Beat-Regler des vorherigen Abschnittes:

```
%%Dead-Beat-Regler nach Abschnitt 2
GR2=12.656*(z-0.368)/(z+0.418);
G02=GR2*Gs;
Gw2=G02/(1+G02)
step(Gw2, 8)
```

$$G_R(z) = 12{,}656\frac{z - 0{,}368}{z + 0{,}418}$$

Die Sprungantwort ist absolut identisch mit dem obigen!

Warum? Die Antwort auf nächster Seite.

Dead-Beat-Regler des Abschnitts 3:

$$G_R(z) = \frac{z^2 - 1,3679z + 0,3679}{0,079z^2 - 0,046z + 0,033}$$

Dead-Beat-Regler des Abschnitts 2:

$$G_R(z) = 12,656\frac{z - 0,368}{z + 0,418}$$

$$G_R(z) = 12,656\frac{z^2 - 1,3679z + 0,3679}{z^2 - 0,582z + 0,418}$$

$$Z_z(z) = z^2 - 1,3679z + 0,3679 = 0$$

$$z_1 = 1 \qquad z_2 = 0,3679$$

$$Z_z(z) = (z-1)(z-0,3679)$$

$$N_z(z) = z^2 - 0,582z + 0,418$$

$$z_1 = 1 \qquad z_2 = 0,418$$

$$N_z(z) = (z-1)(z-0,418)$$

$$G_R(z) = 12,656\frac{(z-1)(z-0,3679)}{(z-1)(z-0,418)}$$

6. Zusammenfassung

Es gibt zwei Optionen der Regelung auf endliche Einstellzeit: die optimale Steuerung mit zwei nacheinander folgenden Steuer-Schritten, die hier nicht behandelt wurde, und die Regelung im geschlossenen Kreis.

Der Dead-Beat-Regler ist modellbasierter Kompensationsregler, bei dem die Regelung in einem geschlossenen Kreis in endlicher Zeit ohne statischen Fehler erfolgt. Solche Regler werden ausschließlich wie digitale Regler realisiert. Um das gewünschte Regelung zu erreichen, sollen alle Polstellen in den Ursprung der z-Ebene fallen.

Die Einstellung des digitalen Dead-Beat-Reglers kann im Zeitbereich mittels Rekursionen oder im z-Bereich mittels z-Übertragungsfunktionen erfolgen. Im letzten Fall gibt es zwei weitere Optionen, nämlich die Berechnung mittels Polynom-Koeffizienten des Reglers c0, c1, c2,… und d1, d2, … oder mittels gewünschter Übertragungsfunktion $G_M(z)$ des geschlossenen Kreises.

Für den letzten Fall gibt es in [3] eine kompakte Formel, mit der die Berechnung viel einfacher ist als im Fall der Polynom-Koeffizienten ausfällt. Natürlich alle Verfahren führen zu gleichen Ergebnissen, wie in der vorliegende Publikation gezeigt wurde.

Da die theoretischen Grundlagen der digitalen Regelung in diesem *Letter* nicht behandelt wurden, kann ich gern mögliche Fragen beantworten.

Dafür reicht es eine formlose Anfrage an meine Mail-Adresse zu senden:

info@szacher.de

Stuttgart, den 17.01.2018 Dr. S. Zacher

5 Literaturverzeichnis

[1] S. Zacher, M. Reuter: *Regelungstechnik für Ingenieure*, 15. Auflage, 2017, Springer Vieweg Verlag

[2] S. Zacher: *Übungsbuch Regelungstechnik*, 6. Auflage, Verlag Springer-Vieweg, 2017

[3] S. Zacher: *Regelungstechnik Aufgaben*, 6. Auflage, 2016, Verlag Dr. Zacher, ISBN 978-3-658-03382-27-0

[4] M. Reuter: *Regelungstechnik für Ingenieure*, 9. Auflage, 1994, Vieweg Verlag