



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg  
*Hamburg University of Applied Sciences*

# Diplomarbeit

Thi Viet Huong Phan

Untersuchung und Vergleich von Regelsystemen schrittminimaler  
endlicher Einstellzeit mit begrenzter Stellgröße

Thi Viet Huong Phan

Untersuchung und Vergleich von Regelsystemen schrittminimaler  
endlicher Einstellzeit mit begrenzter Stellgröße

Diplomarbeit eingereicht im Rahmen der Diplomprüfung  
im Studiengang Informations- und Elektrotechnik  
Studienrichtung Automatisierungstechnik  
am Department Informations- und Elektrotechnik  
der Fakultät Technik und Informatik  
der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

Betreuender Prüfer: Prof. Dr.-Ing Gottfried Klinger  
Zweitgutachter : Prof. Dr.sc.pol. Thomas Holzhüter

Abgegeben am 27. August 2007

**Thi Viet Huong Phan**

**Thema der Diplomarbeit**

Untersuchung und Vergleich von Regelsystemen schrittminimaler endlicher Einstellzeit mit begrenzter Stellgröße

**Stichworte**

Dead-Beat-Regler, Stellgrößenbegrenzung, endliche Einstellzeit, MATLAB, Simulink, Embedded MATLAB Function

**Kurzzusammenfassung**

Inhalt dieser Diplomarbeit ist die Untersuchung und der Vergleich verschiedener Regelsysteme schrittminimaler endlicher Einstellzeit hinsichtlich Führungsverhalten und Ausregelzeit.

Es werden verschiedene Regelverfahren basierend auf dem Dead-Beat-Regelalgorithmus entwickelt, welche bei begrenzter Stellgröße einen Führungssprung in endlicher Einstellzeit ausregeln können.

Die Realisierung und Simulation der Regelverfahren erfolgt in MATLAB/ Simulink.

**Thi Viet Huong Phan**

**Title of the paper**

Analysis and comparison of feedback control systems with step-minimally finite response time by limited actuating signal

**Keywords**

deadbeat controller, actuating signal limiting, finite response time, MATLAB, Simulink, embedded MATLAB function

**Abstract**

Content of this diploma thesis is the analysis and comparison of feedback control systems with step-minimally finite response time by limited actuating signal regarding reference reaction and settling time.

Different procedures of controlling based on the deadbeat control algorithm will be developed. The procedures settle a reference step with limited actuating signal on finite response time.

The procedures of controlling is realized and simulated with MATLAB/ Simulink.

## Inhaltsverzeichnis

1	Einführung.....	1
2	Grundlagen .....	2
2.1	Kontinuierliche und diskrete Signale in digitalen Regelungssystemen .....	2
2.2	Dead-Beat-Regler .....	3
2.2.1	Dead-Beat-Regler für ein System 2. Ordnung ( $PT_2$ -Verhalten).....	5
2.2.2	Dead-Beat-Regler für ein System 3. Ordnung ( $IT_2$ -Verhalten) .....	7
2.2.3	Begrenzte Stellgröße .....	11
2.2.4	System 2. Ordnung .....	12
2.2.5	System 3. Ordnung .....	13
3	Entwicklung der Regelverfahren.....	15
3.1	Strategie 1: Abtastzeitenverlängerung .....	15
3.1.1	System 2. Ordnung .....	17
3.1.2	System 3. Ordnung .....	19
3.2	Strategie 2: Sollwertkorrektur .....	22
3.2.1	System 2. Ordnung .....	23
3.2.2	System 3. Ordnung .....	26
3.3	Strategie 3: Störgrößenregelung mit Korrekturglied.....	31
3.3.1	System 2. Ordnung .....	32
3.3.2	System 3. Ordnung .....	35
4	Umsetzung und Simulation .....	37
4.1	Simulation der Deat-Beat-Regelung .....	38
4.2	Umsetzung und Simulation der Strategie 1: Abtastzeitenverlängerung.....	39
4.2.1	Regelung einer Strecke 2.Ordnung .....	43
4.2.2	Regelung einer Strecke 3.Ordnung .....	44
4.3	Umsetzung und Simulation der Strategie 2: Sollwertkorrektur .....	45
4.3.1	Regelung einer Strecke 2.Ordnung .....	45
4.3.2	Regelung einer Strecke 3.Ordnung .....	46
4.4	Umsetzung und Simulation der Strategie 3: Störgrößenregelung mit Korrekturglied .....	47
4.5	Umsetzung und Simulation eines Kombinationsregler .....	48
4.5.1	Regelung einer Strecke 2.Ordnung .....	48
4.5.2	Regelung einer Strecke 3.Ordnung .....	49

5	Vergleich .....	51
5.1	Vergleich der stellgrößenbegrenzten Regler für Strecken mit $PT_2$ -Strecken bei dynamischer Führungsgröße .....	52
5.1.1	Fall 1: Positive Sollwertänderung während der Regelung .....	52
5.1.2	Fall 2: Negative Sollwertänderung während der Regelung .....	56
5.1.3	Fall 3: Vorzeichenwechsel des Sollwertes während einer Regelung .....	59
5.2	Vergleich der Regelgüte eines System mit einer $PT_2$ -Strecke anhand des Führungsverhalten für verschiedene feste Führungsgrößen.....	63
5.3	Vergleich der stellgrößenbegrenzten Regler für Strecken mit $IT_2$ -Strecken bei dynamischer Führungsgröße .....	83
5.3.1	Fall 1: Positive Sollwertänderung während der Regelung .....	83
5.3.2	Fall 2: Negative Sollwertänderung während der Regelung .....	86
5.3.3	Fall 3: Vorzeichenwechsel des Sollwertes während einer Regelung .....	89
5.4	Vergleich der Regelgüte eines System mit einer $IT_2$ -Strecke anhand des Führungsverhalten für verschiedene feste Führungsgrößen.....	92
6	Zusammenfassung .....	107
7	Literaturverzeichnis.....	109
8	Anhang .....	110
8.1	Abbildungsverzeichnis .....	110
8.2	Tabellenverzeichnis.....	117
8.3	Symbolverzeichnis .....	118
8.4	MATLAB Quellcodes .....	120
8.4.1	Programmcode des Reglers nach Strategie 1 für eine $PT_2$ -Strecke.....	120
8.4.2	Programmcode des Reglers nach Strategie 2 für eine $PT_2$ -Strecke.....	123
8.4.3	Programmcode des Kombinationsreglers für eine $PT_2$ -Strecke .....	125
8.4.4	Programmcode des Reglers nach Strategie 1 für eine $IT_2$ -Strecke .....	128
8.4.5	Programmcode des Reglers nach Strategie 2 für eine $IT_2$ -Strecke .....	131
8.4.6	Programmcode des Kombinationsreglers für eine $IT_2$ -Strecke.....	133
8.5	CD-ROM.....	136
9	Selbstständigkeitserklärung.....	137

# 1 Einführung

Inhalt dieser Arbeit ist die Untersuchung und der Vergleich verschiedener Strategien zur Realisierung eines stellgrößenbegrenzten Reglers mit schrittminimaler endlicher Einstellzeit hinsichtlich des Führungsverhaltens. Grundlage bildet der Regelalgorithmus des Dead-Beat-Reglers, da die Dead-Beat-Regelung ein schrittminimaler Regelvorgang ist.

Bei der Dead-Beat-Regelung wird die Zeit für den Regelvorgang über die Abtastzeit  $t$  vorgegeben, da der Dead-Beat-Regler in einer festen Schrittzahl ausregelt, so dass die Ausregelzeit  $n \cdot t$  beträgt, wobei  $n$  der Grad der Strecke ist. Die Stellgrößenamplitude passt sich der Abtastzeit an. Die Stellamplitude wird mit kleiner werdender Abtastzeit größer.

Da eine Dead-Beat-Regelung nur für Strecken bis dritter Ordnung sinnvoll ist, werden in dieser Diplomarbeit nur die Sachverhältnisse anhand von Strecken zweiter Ordnung und Strecken dritter Ordnung untersucht, explizit am Beispiel einer  $IT_2$ -Strecke und einer  $PT_2$ -Strecke.

## 2 Grundlagen

In der industriellen Praxis werden Regler heute überwiegend digital realisiert. Das geforderte Reglerverhalten wird mit Regleralgorithmen, die von Rechnern ausgeführt werden, realisiert. Die Signale werden nicht, wie bei Analogreglern zeitkontinuierlich verarbeitet, sondern zeitdiskret, d. h. nur zu bestimmten zyklisch auftretenden Zeitpunkten. Durch digitale Regler können Regelungsverfahren implementiert werden, die durch analoge Regler nicht zu realisieren sind.

(vgl. Lutz u. Wendt, 1998, S. 415)

### 2.1 Kontinuierliche und diskrete Signale in digitalen Regelungssystemen

Analoge Regelgrößen können in einem betrachteten Zeitintervall zu jedem Zeitpunkt beliebige Werte annehmen. Analoge Regelgrößen sind wert- und zeitkontinuierliche Signale. Werden diese Signale nur zu bestimmten zyklisch auftretenden Zeitpunkten gemessen, entsteht ein zeitdiskretes und wertkontinuierliches Signal. Dieser Vorgang wird als Abtastvorgang bezeichnet, wobei die Zeit zwischen zwei Abtastungen als Abtastzeit bezeichnet wird.

(vgl. Lutz u. Wendt, 1998, S. 415 ff)

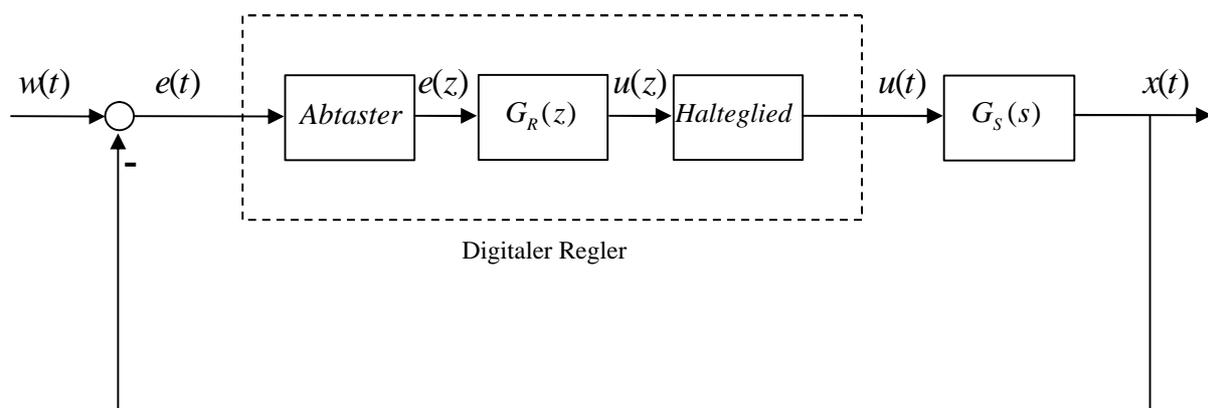


Abbildung 2-1: Regelkreis mit digitalem Regler

## 2.2 Dead-Beat-Regler

Ein Dead-Beat-Regler ist ein Kompensationsregler, wobei alle Pole der Strecke kompensiert werden und alle Pole der Führungsübertragungsfunktion in den Ursprung gelegt werden. Das ermöglicht, einen Zustand in einen anderen Zustand in endlicher Dauer zu überführen, während bei der kontinuierlichen Regelung dieser Vorgang theoretisch unendlich lang dauert und somit der stationäre Endzustand nie erreicht wird. Der Reglerentwurf kann hinsichtlich Führungsverhalten, Störverhalten oder auch kombiniert für Führungs- und Störverhalten erfolgen.

Die hier zunächst berechneten Dead-Beat-Regler werden hinsichtlich Führungsverhalten entworfen. Ein Führungssprung mit festem Wert kann in einem System  $n$ -ter Ordnung in  $n$  Abtastschritten durch Festlegung des Stellgrößenwertverlaufs schwingungsfrei und endgültig ausgeregelt werden. Bei einer dynamischen Führungsgröße gilt das Superpositionsprinzip (Überlagerungsprinzip). Das bedeutet, dass eine Führungssprungänderung immer wieder in  $n$  Schritten ausgeregelt wird, obwohl sich das System nicht in der Ruhelage befand, d. h. das System noch nicht ausgeregelt war. Es wird ein neuer fester Stellgrößenwertverlauf festgelegt. (vgl. Günther 1988, S. 175 u. Büttner 1991, S. 139)

Durch die vollständige Kompensation der Streckenübertragungsfunktion, kann der Dead-Beat-Regler nicht bei instabilen Strecken, deren Pole außerhalb des Einheitskreises liegen, verwendet werden, da eine Kompensation von instabilen Polen nicht exakt ausführbar ist. (vgl. Lutz u. Wendt, 1998 S. 515)

Da es sich bei einem Dead-Beat-Regler um einen strukturoptimierten Regler handelt, d. h. Struktur und Parameter des Reglers sind durch die Streckeneigenschaften entscheidend vorbestimmt, liegt für den Reglerentwurf die  $z$ -Transformierte Streckenübertragungsfunktion zugrunde.

Berechnung des Dead-Beat-Reglers

- Vorgabe:     1. Kompensation der Streckenpole  
              2. n Pole bei  $z = 0$

$$G_S = \frac{Z_S(z)}{N_S(z)} \qquad G_R = \frac{Z_R(z)}{N_R(z)}$$

## Kompensation der Streckenpole

$$Z_R(z) = N_S(z)$$

n Pole bei  $z = 0$

$$G_W = \frac{G_S G_R}{1 + G_S G_R} = \frac{N_S Z_S}{N_S Z_S + N_R Z_R} \stackrel{!}{=} \frac{Z_S(z)}{z^n \cdot K}$$

$$N_R(z) = z^n \cdot Z_S(z=1) - Z_S(z)$$

(s. Klinger, S 48)

## 2.2.1 Dead-Beat-Regler für ein System 2. Ordnung (PT<sub>2</sub>-Verhalten)

Zeitkontinuierliche Streckenübertragungsfunktion

$$G_S(s) = \frac{K_P}{(sT_1 + 1)(sT_2 + 1)}$$

Berechnung der korrespondierenden Streckenübertragungsfunktion im z-Bereich durch Partialbruchzerlegung

$$G_S(s) = \frac{K_P}{(sT_1 + 1)(sT_2 + 1)} = \frac{A}{(sT_1 + 1)} + \frac{B}{(sT_2 + 1)} = \frac{AT_2s + A + BT_1s + B}{(sT_1 + 1)(sT_2 + 1)}$$

⇒

$$s^0: A + B = K_P \quad \Rightarrow A = K_P - B$$

$$s^1: AT_2 + BT_2 = 0 \quad \Rightarrow B = \frac{K_P T_2}{T_2 - T_1}$$

$$\Rightarrow A = \frac{K_P T_1}{T_1 - T_2}$$

Anschließend wird jeder einzelne Summand einzeln transformiert mit der Abtastzeit t

$$G_S(z) = \frac{A(1 - e^{-\frac{t}{T_1}})}{(z - e^{-\frac{t}{T_1}})} + \frac{B(1 - e^{-\frac{t}{T_2}})}{(z - e^{-\frac{t}{T_2}})} = \frac{A(1 - e^{-\frac{t}{T_1}})(z - e^{-\frac{t}{T_2}}) + B(1 - e^{-\frac{t}{T_2}})(z - e^{-\frac{t}{T_1}})}{(z - e^{-\frac{t}{T_1}})(z - e^{-\frac{t}{T_2}})}$$

$$Z_S = \left( A(1 - e^{-\frac{t}{T_1}}) + B(1 - e^{-\frac{t}{T_2}}) \right) \cdot z - A \cdot e^{-\frac{t}{T_2}} \cdot (1 - e^{-\frac{t}{T_1}}) - B \cdot e^{-\frac{t}{T_1}} \cdot (1 - e^{-\frac{t}{T_2}})$$

$$N_S = z^2 - (e^{-\frac{t}{T_1}} + e^{-\frac{t}{T_2}}) \cdot z + e^{-\frac{t}{T_1}} \cdot e^{-\frac{t}{T_2}}$$

$$G_S(z) = \frac{Z_S}{N_S} = \frac{b_1 z + b_2}{z^2 + a_1 z + a_2}$$

mit

$$b_1 = A(1 - e^{-\frac{t}{T_1}}) + B(1 - e^{-\frac{t}{T_2}})$$

$$b_2 = A \cdot e^{-\frac{t}{T_2}} \cdot (1 - e^{-\frac{t}{T_1}}) - B \cdot e^{-\frac{t}{T_1}} \cdot (1 - e^{-\frac{t}{T_2}})$$

$$a_0 = 1$$

$$a_1 = -(e^{-\frac{t}{T_1}} + e^{-\frac{t}{T_2}})$$

$$a_2 = e^{-\frac{t}{T_1}} \cdot e^{-\frac{t}{T_2}}$$

Der dazugehörige Dead-Beat-Regler

$$Z_R(z) = N_S(z) = z^2 + a_1z + a_2$$

$$N_R(z) = z^2 \cdot Z_S(z=1) - Z_S(z) = (b_1 + b_2)z^2 - b_1z - b_2$$

$$\Rightarrow G_R(z) = \frac{z^2 + a_1z + a_2}{(b_1 + b_2)z^2 - b_1z - b_2}$$

### Zahlenbeispiel einer Regelstrecke mit PT<sub>2</sub>-Verhalten

Zeitkontinuierliche Streckenübertragungsfunktion

$$G_S(s) = \frac{K_P}{(sT_1 + 1)(sT_2 + 1)}$$

mit

$$K_I = 3$$

$$T_1 = 0.2 \text{ sec}$$

$$T_2 = 0.5 \text{ sec}$$

$$G_S(s) = \frac{3}{(0.2 \text{ sec} \cdot s + 1)(0.5 \text{ sec} \cdot s + 1)} = \frac{5}{0.5 \text{ sec} \cdot s + 1} - \frac{2}{0.2 \text{ sec} \cdot s + 1}$$

Wird mit  $t = 0.1 \text{ sec}$  abgetastet, ergibt sich folgende Streckenübertragungsfunktion im z-Bereich.

$$G_S(z) = \frac{5 \cdot (1 - \mathbf{b}_1)}{(z - \mathbf{b}_1)} - \frac{2 \cdot (1 - \mathbf{b}_2)}{(z - \mathbf{b}_2)}$$

mit

$$\mathbf{b}_1 = e^{\frac{-0.1}{0.2}} = e^{-0.5}$$

$$\mathbf{b}_2 = e^{\frac{-0.1}{0.5}} = e^{-0.2}$$

$$G_S(z) = \frac{0.11941z + 0.09456}{z^2 - 1.42526z + 0.49659}$$

Der dazugehörige Dead-Beat-Regler

$$Z_R = N_s = z^2 - 1.42526z + 0.49659$$

$$N_R = Z_S(z=1) \cdot z^3 - Z_S = 0.21397z^2 - 0.11941z - 0.09456$$

⇒

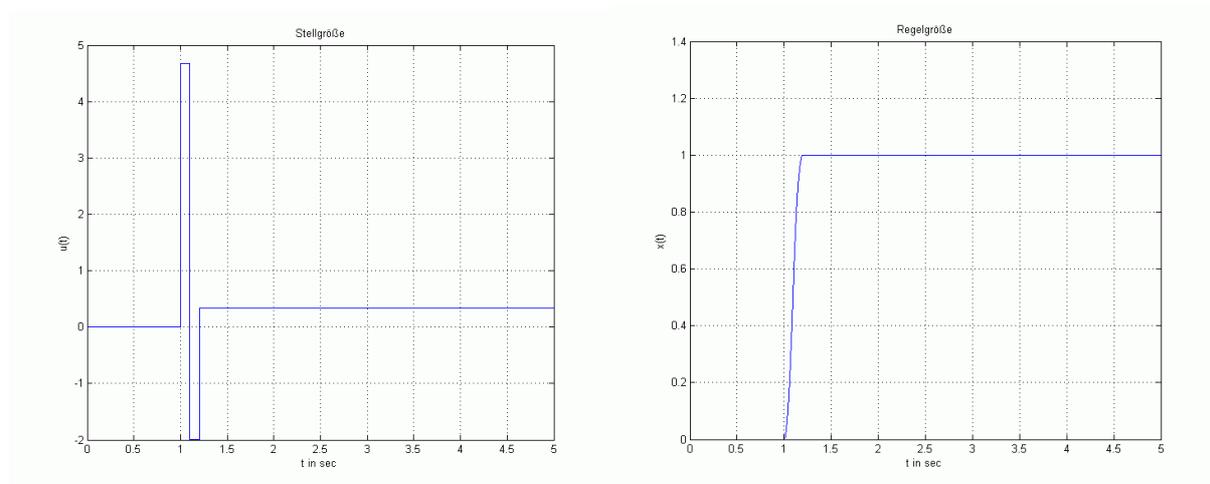
$$G_R(z) = \frac{z^2 - 1.42526z + 0.49659}{0.21397z^2 - 0.11941z - 0.09456}$$

Die Tabelle zeigt die Regelgröße, Regeldifferenz und Stellgröße zu den Abtastzeitpunkten

t [sec]	k	x[k]	e[k]	u[k]
1	1	0	1	4.674
1.1	2	0.558	0.442	-1.987
1.2	3	1	0	0.333
1.3	4	1	0	0.333

**Tabelle 2-1: Regelgröße, Regeldifferenz und Stellgröße zu den Abtastzeitpunkten bei unbegrenzter Stellgröße eines System mit einer PT<sub>2</sub>-Strecke**

Folgend sieht der Stell- und Regelgrößenverlauf aus.



**Abbildung 2-2: Stell- und Regelgrößenverlauf bei unbegrenzter Stellgröße einer PT<sub>2</sub>-Strecke**

### 2.2.2 Dead-Beat-Regler für ein System 3. Ordnung (IT<sub>2</sub>-Verhalten)

Zeitkontinuierliche Streckenübertragungsfunktion

$$G_S(s) = \frac{K_I}{s(sT_1 + 1)(sT_2 + 1)}$$

Berechnung der korrespondierenden Streckenübertragungsfunktion im z-Bereich durch Partialbruchzerlegung

$$G_s(s) = \frac{K_I}{s(sT_1+1)(sT_2+1)} = \frac{A}{s} + \frac{B}{(sT_1+1)} + \frac{C}{(sT_2+1)}$$

$$= \frac{A + AT_1s + AT_2s + AT_1T_2s^2 + Bs + BT_2s + Cs + CT_1s}{s(sT_1+1)(sT_2+1)}$$

⇒

$$s^0: A = K_I$$

$$s^1: AT_1 + AT_2 + B + C = 0 \quad \Rightarrow B = -C - AT_1 - AT_2 = -C - A(T_1 + T_2)$$

$$s^2: AT_1T_2 + BT_2 + CT_1 = 0 \quad \Rightarrow C = AT_1T_2 - CT_2 - AT_2(T_1 + T_2) + CT_1 \Rightarrow C = \frac{AT_2^2}{(T_1 - T_2)}$$

$$\Rightarrow B = \frac{AT_2^2}{(T_2 - T_1)} - A(T_1 + T_2)$$

Anschließend wird jeder einzelne Summand einzeln transformiert mit der Abtastzeit  $t$

$$G_S(z) = \frac{At}{(z-1)} + \frac{B(1-e^{-\frac{t}{T_1}})}{(z-e^{-\frac{t}{T_1}})} + \frac{C(1-e^{-\frac{t}{T_2}})}{(z-e^{-\frac{t}{T_2}})} = \frac{At}{(z-1)} + \frac{B(1-\mathbf{b}_1)}{(z-\mathbf{b}_1)} + \frac{C(1-\mathbf{b}_2)}{(z-\mathbf{b}_2)}$$

$$\begin{aligned} Z_S &= At(z-\mathbf{b}_1)(z-\mathbf{b}_2) + B(1-\mathbf{b}_1)(z-1)(z-\mathbf{b}_2) + C(1-\mathbf{b}_2)(z-\mathbf{b}_1)(z-1) \\ &= (At + B(1-\mathbf{b}_1) + C(1-\mathbf{b}_2))z^2 - (A(\mathbf{b}_1+\mathbf{b}_2) + B(1-\mathbf{b}_1)(1+\mathbf{b}_2) + C(1-\mathbf{b}_2)(1+\mathbf{b}_1))z \\ &\quad + A\mathbf{t}\mathbf{b}_1\mathbf{b}_2 + B(1-\mathbf{b}_1)\mathbf{b}_2 + C(1-\mathbf{b}_2)\mathbf{b}_1 \end{aligned}$$

$$Z_S = b_1 z^2 + b_2 z + b_3$$

mit

$$b_1 = At + B(1-\mathbf{b}_1) + C(1-\mathbf{b}_2)$$

$$b_2 = -(A(\mathbf{b}_1+\mathbf{b}_2) + B(1-\mathbf{b}_1)(1+\mathbf{b}_2) + C(1-\mathbf{b}_2)(1+\mathbf{b}_1))$$

$$b_3 = A\mathbf{t}\mathbf{b}_1\mathbf{b}_2 + B(1-\mathbf{b}_1)\mathbf{b}_2 + C(1-\mathbf{b}_2)\mathbf{b}_1$$

$$N_S = (z-1)(z-\mathbf{b}_1)(z-\mathbf{b}_2) = z^3 + (-\mathbf{b}_1 - \mathbf{b}_2 - 1)z^2 + (\mathbf{b}_1(\mathbf{b}_2 + 1) + \mathbf{b}_2)z - \mathbf{b}_1\mathbf{b}_2$$

$$N_S = z^3 + a_1 z^2 + a_2 z + a_3$$

mit

$$a_0 = 1$$

$$a_1 = -\mathbf{b}_1 - \mathbf{b}_2 - 1$$

$$a_2 = \mathbf{b}_1(\mathbf{b}_2 + 1) + \mathbf{b}_2$$

$$a_3 = -\mathbf{b}_1\mathbf{b}_2$$

$$\Rightarrow G_S(z) = \frac{Z_S}{N_S} = \frac{b_1 z^2 + b_2 z + b_3}{z^3 + a_1 z^2 + a_2 z + a_3}$$

Der dazugehörige Dead-Beat-Regler

$$Z_R(z) = N_S(z) = z^3 + a_1 z^2 + a_2 z + a_3$$

$$N_R(z) = z^3 \cdot Z_S(z=1) - Z_S(z) = (b_1 + b_2 + b_3)z^3 - b_1 z^2 - b_2 z - b_3$$

$$\Rightarrow G_R(z) = \frac{z^3 + a_1 z^2 + a_2 z + a_3}{(b_1 + b_2 + b_3)z^3 - b_1 z^2 - b_2 z - b_3}$$

## Zahlenbeispiel einer Regelstrecke mit IT<sub>2</sub>-Verhalten

Zeitkontinuierliche Streckenübertragungsfunktion

$$G_s(s) = \frac{K_I}{s(sT_1 + 1)(sT_2 + 1)}$$

mit

$$K_I = 10 \text{sec}^{-1}$$

$$T_1 = 0.1 \text{sec}$$

$$T_2 = 0.2 \text{sec}$$

$$G_s(s) = \frac{1}{s(0.1 \text{sec} \cdot s + 1)(0.2 \text{sec} \cdot s + 1)} = \frac{10 \text{sec}^{-1}}{s} + \frac{1}{(0.1 \text{sec} \cdot s + 1)} - \frac{4}{(0.2 \text{sec} \cdot s + 1)}$$

Wird mit  $t = 0.1 \text{sec}$  abgetastet, ergibt sich folgende Streckenübertragungsfunktion im z-Bereich.

$$G_s(z) = \frac{1}{(z-1)} + \frac{1 \cdot (1-b_1)}{(z-b_1)} - \frac{4 \cdot (1-b_2)}{(z-b_2)}$$

mit

$$b_1 = e^{\frac{-0.1}{0.1}} = e^{-1}$$

$$b_2 = e^{\frac{-0.1}{0.2}} = e^{-0.05}$$

$$G_s(z) = \frac{0.05824z^2 + 0.16294z + 0.02753}{z^3 - 1.97441z^2 + 1.19754z - 0.22313}$$

Der dazugehörige Dead-Beat-Regler

$$Z_R = N_s = z^3 - 1.97441z^2 + 1.19754z - 0.22313$$

$$N_R = Z_s(z=1) \cdot z^3 - Z_s = 0.02487z^3 - 0.00582z^2 - 0.01629z - 0.00275$$

⇒

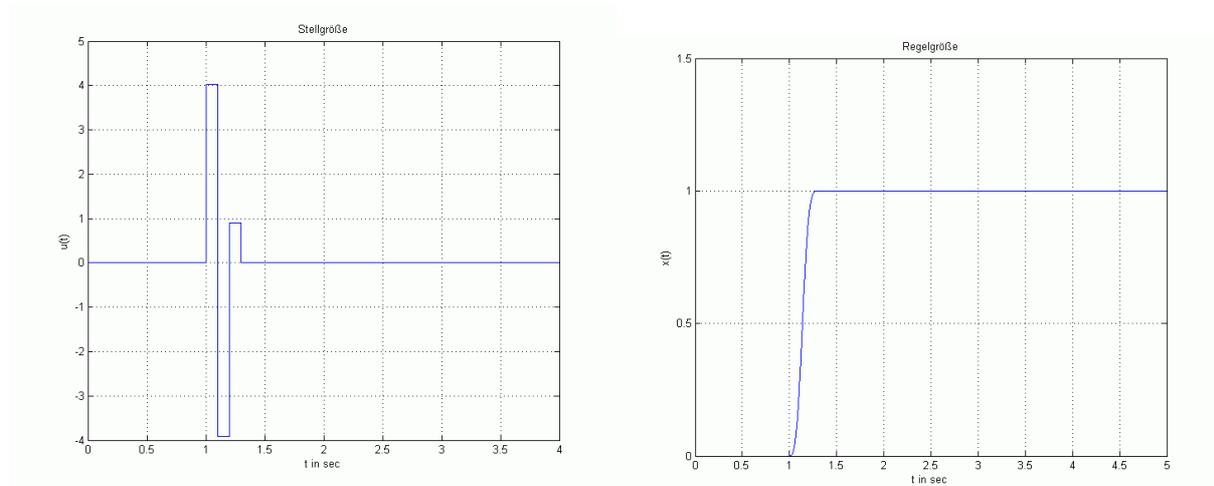
$$G_R(z) = \frac{z^3 - 1.97441z^2 + 1.19754z - 0.22313}{0.02487z^3 - 0.00582z^2 - 0.01629z - 0.00275}$$

Die Tabelle zeigt die Regelgröße, Regeldifferenz und Stellgröße zu den Abtastzeitpunkten

t [sec]	k	x[k]	e[k]	u[k]
1	1	0	1	4.021
1.1	2	0.234	0.766	-3.918
1.2	3	0.889	0.111	0.897
1.3	4	1	0	0
1.4	5	1	0	0

**Tabelle 2-2:** Regelgröße, Regeldifferenz und Stellgröße zu den Abtastzeitpunkten bei unbegrenzter Stellgröße eines System mit einer  $IT_2$ -Strecke

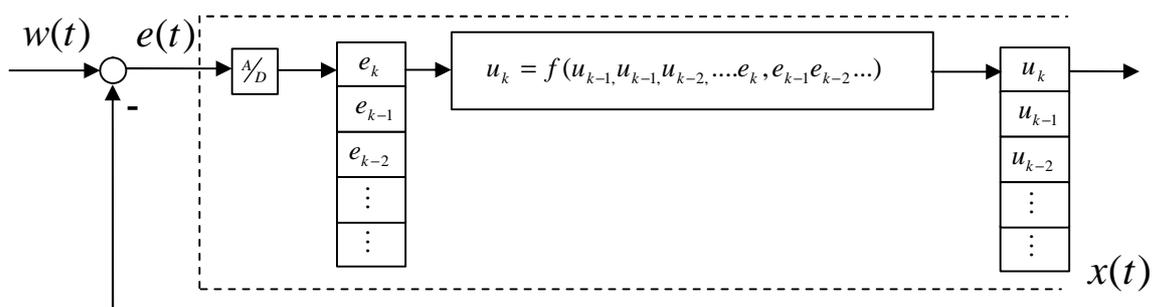
Folgend sieht der Stell- und Regelgrößenverlauf aus.



**Abbildung 2-3:** Stell- und Regelgrößenverlauf bei unbegrenzter Stellgröße einer  $IT_2$ -Strecke

### 2.2.3 Begrenzte Stellgröße

Wie bei allen digitalen Reglern, werden auch beim Dead-Beat-Regelalgorithmus zur Berechnung der Stellgröße, die Werte der voran gegangenen Regeldifferenzen und Stellgrößen benötigt.



**Abbildung 2-4:** Digitaler Regler

Zu jedem Abtastzyklus wird der Wert der Regeldifferenz erfasst. Anhand der Reglerdifferenzgleichung wird die Stellgröße berechnet und ausgegeben. Regeldifferenz und Stellgröße werden zu diesem Abtastzyklus abgespeichert und erhalten den zugehörigen Zeitparameter  $k$ . Die Gesamtdauer der vergangenen Zeit ergibt sich aus  $k \cdot t$ .

Der Dead-Beat-Regelalgorithmus ermöglicht ein Ausregeln in  $n$  Schritten, da ein bestimmter Stellgrößenverlauf, entsprechend der Abtastzeit festgelegt wird. Ist die ausgegebene Stellgröße begrenzt, führt dies im nächsten Rechenzyklus zu einer abweichenden Regeldifferenz. Diese Regeldifferenz passt nicht zur vorhergegangenen Stellgröße, so dass der weitere Stellgrößenverlauf vom eigentlich festgelegten Stellgrößenverlauf abweicht.

Die Begrenzung wirkt wie eine Störgröße, welche nicht mit  $n$  Schritten ausgeregelt wird, sondern mit der Eigendynamik der Regelstrecke.

### 2.2.4 System 2. Ordnung

Für drei verschiedene Begrenzungen ergeben sich folgende Stell- und Regelgrößenverläufe eines Systems 2. Ordnung mit  $PT_2$ -Verhalten (Parameter s. o.) mit dem zugehörigen Dead-Beat-Reglers bei übersteuerteter Stellgröße. Die Abtastzeit beträgt 0.1 sec.

#### Schwache Begrenzung $\pm 3$

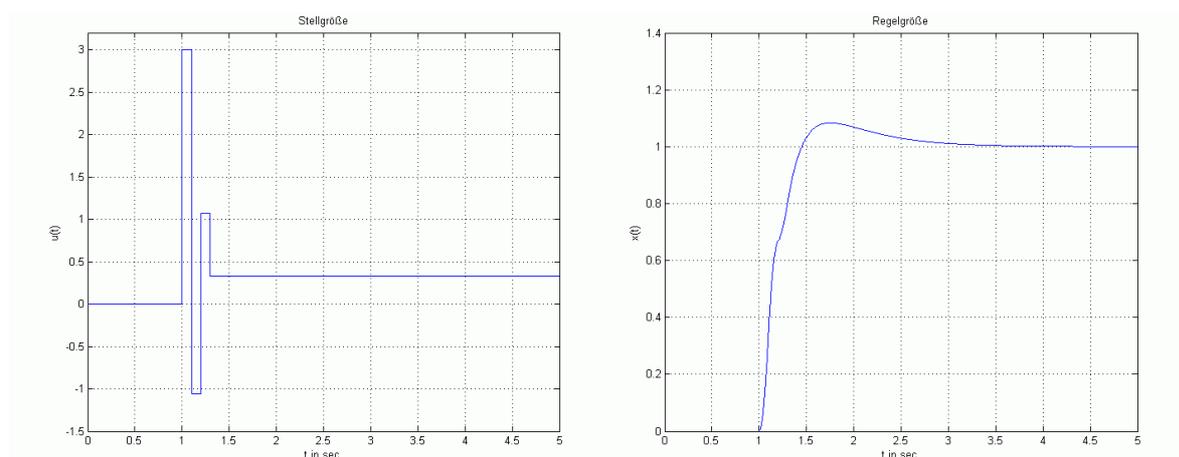


Abbildung 2-5: Stell- und Regelgrößenverlauf bei begrenzter Stellgröße  $u_{\max/\min} = \pm 3$  einer  $PT_2$ -Strecke

### Mittlere Begrenzung $\pm 2$

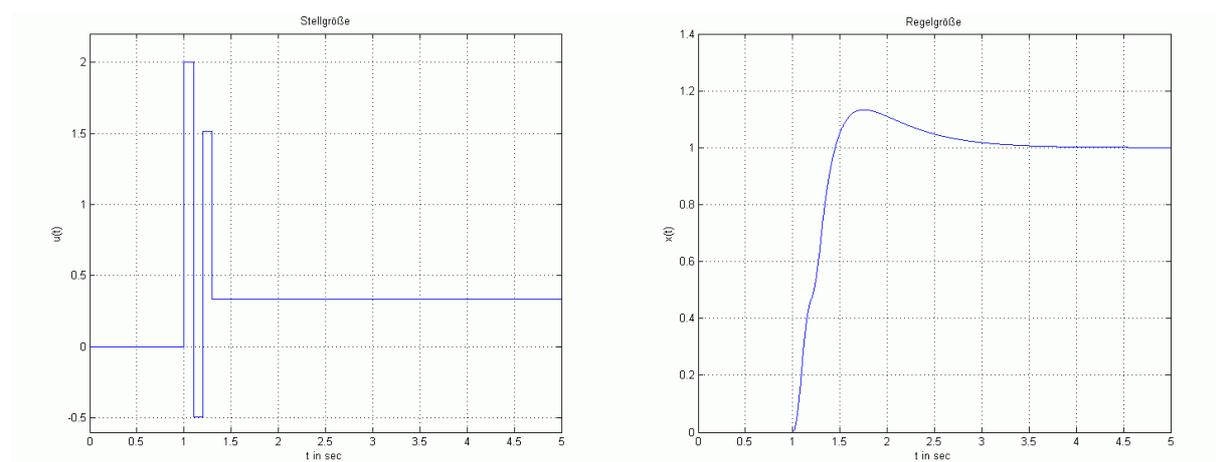


Abbildung 2-6: Stell- und Regelgrößenverlauf bei begrenzter Stellgröße  $u_{\max/\min} = \pm 2$  einer  $PT_2$ -Strecke

### Schwache Begrenzung $\pm 0.5$

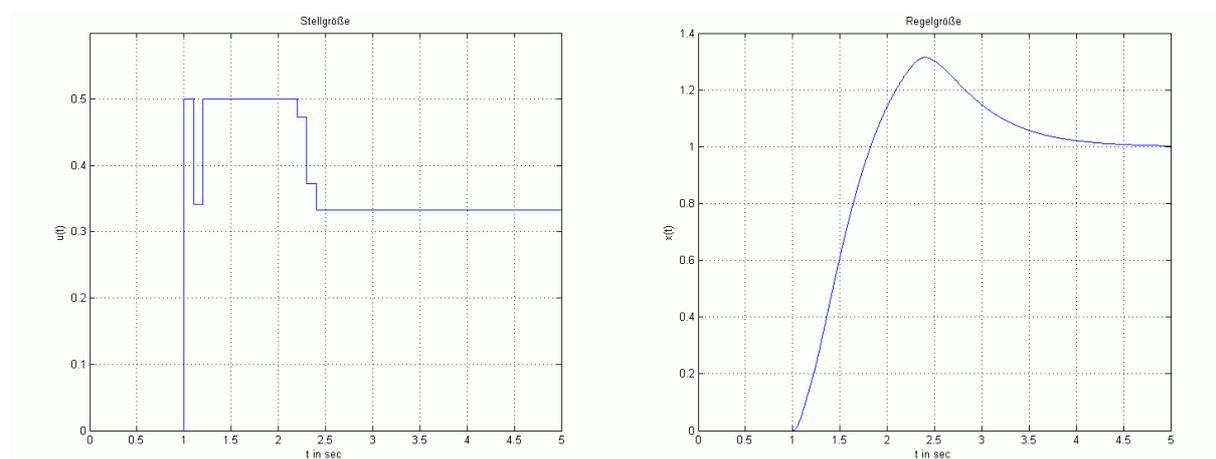


Abbildung 2-7: Stell- und Regelgrößenverlauf bei begrenzter Stellgröße  $u_{\max/\min} = \pm 0.5$  einer  $PT_2$ -Strecke

## 2.2.5 System 3. Ordnung

Für drei verschiedene Begrenzungen ergeben sich folgende Stell- und Regelgrößenverläufe eines Systems 2. Ordnung mit  $IT_2$ -Verhalten (Parameter s. o.) mit dem zugehörigen Dead-Beat-Reglers bei übersteuertet Stellgröße. Die Abtastzeit beträgt 0.1 sec.

### Schwache Begrenzung $\pm 3$

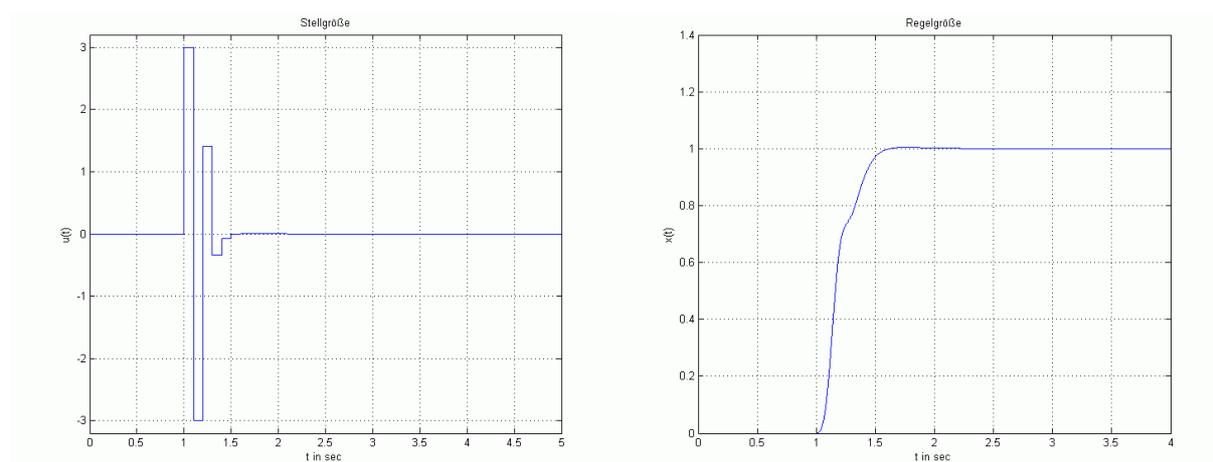


Abbildung 2-8: Stell- und Regelgrößenverlauf bei begrenzter Stellgröße  $u_{\max/\min} = \pm 3$  einer IT<sub>2</sub>-Strecke

### Mittlere Begrenzung $\pm 2$

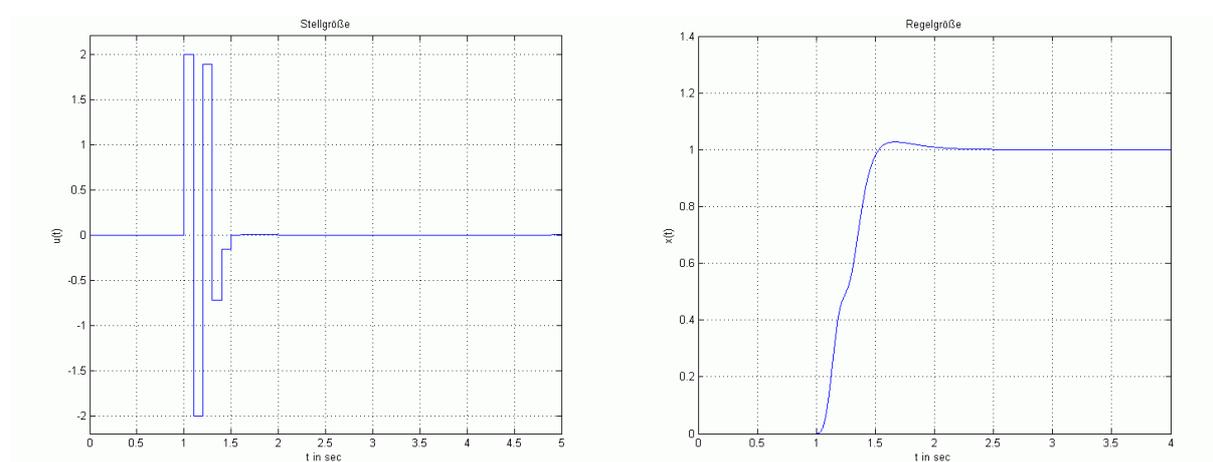


Abbildung 2-9: Stell- und Regelgrößenverlauf bei begrenzter Stellgröße  $u_{\max/\min} = \pm 2$  einer IT<sub>2</sub>-Strecke

### Starke Begrenzung $\pm 0.5$

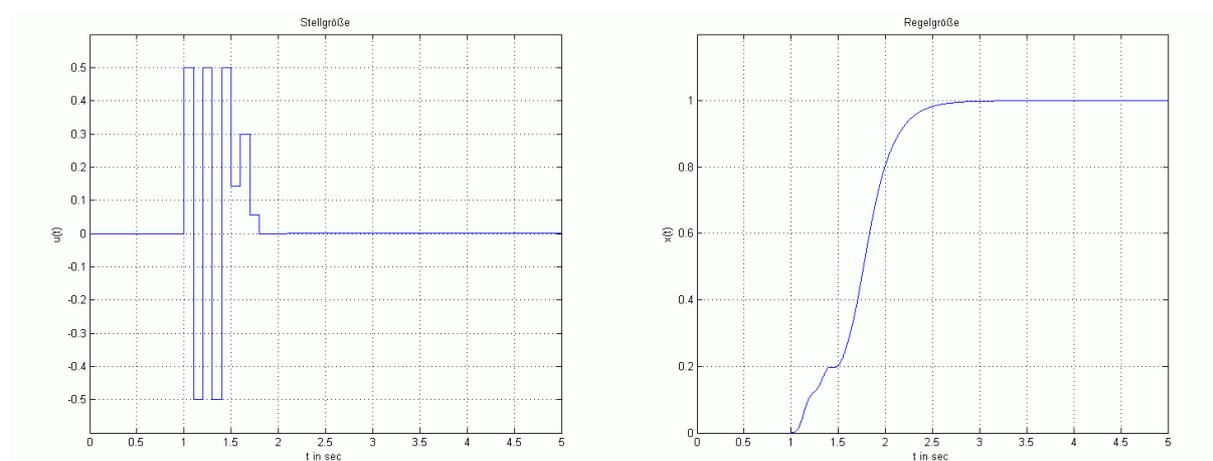


Abbildung 2-10: Stell- und Regelgrößenverlauf bei begrenzter Stellgröße  $u_{\max/\min} = \pm 0.5$  einer IT<sub>2</sub>-Strecke

### 3 Entwicklung der Regelverfahren

In diesem Kapitel werden drei Strategien zur Entwicklung eines stellgrößenbegrenzten Dead-Beat-Reglers aufgezeigt. Alle drei Regelverfahren werden detailliert anhand der Beispiel-Strecken mit  $PT_2$ -Verhalten (System 2. Ordnung) und den Parametern

$$K_p = 3$$

$$T_1 = 0.2 \text{ sec}$$

$$T_2 = 0.5 \text{ sec}$$

und  $IT_2$ -Verhalten (System 3. Ordnung) und den Parametern

$$K_I = 10 \text{ sec}^{-1}$$

$$T_1 = 0.1 \text{ sec}$$

$$T_2 = 0.2 \text{ sec}$$

erläutert. Die Anfangsabtastzeit beträgt 0.1 sec. Die Berechnung der zugehörigen z-Transformation wurde bereits in Kapitel 2.2 *Dead-Beat-Regler* durchgeführt.

In allen Beispielen dieses Kapitels wird auf das Regelsystem zum Zeitpunkt  $t = 1 \text{ sec}$  ein Führungssprung von 0 auf 1 gegeben.

#### 3.1 Strategie 1: Abtastzeitenverlängerung

Eine Möglichkeit die Stellgröße zu verringern ist, die Abtastzeit zu vergrößern. Bei einer größeren Abtastzeit, muss das System weniger Energie aufwenden, um die Regeldifferenz auszuregulieren, da mehr Zeit zur Verfügung steht. Die Abtastzeit wird der begrenzten Stellgröße angepasst. Ein Regeln mit Dead-Beat-Verhalten bleibt erhalten. Die Anzahl der Ausregelschritte bleibt erhalten, die Gesamtdauer der Regelung verlängert sich.

Funktionsweise des Reglers:

Ausgangslage ist eine feste Abtastzeit von 0.1sec. Befand sich das System in Ruhe und ein Führungssprung mit einem festen Wert wird auf das Regelsystem gegeben, ist die erste Stellamplitude betragsmäßig am größten. Überschreitet die erste Stellamplitude die Begrenzung, wird die Abtastzeit solange um 0.001sec erhöht, bis die berechnete Stellgröße nicht die mehr die Begrenzung überschreitet. Die entsprechende Stellgröße wird ausgegeben

und abgespeichert. Mit der neuen Abtastzeit wird die Regelgröße anschließend abgetastet und es wird ganz normal mit dieser neuen Abtastzeit und dem neuen Regelalgorithmus das System ausgeregelt bis sich das System in Ruhe befindet. Sobald der letzte Wert der Regeldifferenz kleiner ist als ein bestimmter Wert (0.001), wechselt der Regler wieder zur ursprünglichen Abtastzeit und der letzte Stellgrößenwert wird gehalten. Bei der Strecke mit  $PT_2$ -Verhalten entspricht dieser Wert dem stationären Endwert der Übertragungsfunktion der Regeldifferenz

$$(u_{stat}(z) = \lim_{z \rightarrow 1} G_e(z)w(z) = w \cdot \frac{1+a_1+a_2}{b_1+b_2}, w \text{ ist die Sprunghöhe}).$$

Bei einer Strecke mit  $IT_2$ -Verhalten wird die Stellgröße null.

Das Verfahren funktioniert allerdings nur, wenn das System von einer Ruhelage in eine andere Ruhelage überführt werden soll. Wird während eines Überführungsvorgangs der Sollwert geändert, kann es dazu kommen, dass nach einer Sollwertänderung der anschließend berechnete Stellgrößenimpuls die Begrenzung überschreitet. Dann wäre eine Abtastzeitenverlängerung nicht möglich. Das System wird mit der Dynamik der Strecke ausgeregelt.

Der vorausgegangene Stellgrößenimpuls, der noch nicht begrenzt war, wurde von einem Regelalgorithmus erstellt, der noch mit der alten Abtastzeit arbeitete. Die daraus resultierende Regelgröße besitzt einen bestimmten Zustand, der vom alten Regelalgorithmus vorausbestimmt wurde, um den weiteren festen Stellgrößenwertverlauf festzulegen. Aus diesem Zustand lassen sich keine vergangenen Stellgrößen und Regeldifferenzen für die neue Dynamik und den neuen Regelalgorithmus zurückberechnen. Für den Wert der Regelgröße lassen sich fiktive Vergangenheitswerte mit den entsprechenden Regeldifferenzen und vergangenen Stellgrößen konstruieren, so dass dieser Regelgrößenwert zwar mit einem Regelgrößenwert in einer Regelung mit einer anderen Abtastzeit übereinstimmt, jedoch sind die Zustände verschieden. In einem System 2. Ordnung wird der Zustand durch den Wert der Regelgröße  $x$  und durch die Steigung  $\dot{x}$  beschrieben, in einem System 3. Ordnung durch den Wert der Regelgröße  $x$ , durch die Steigung  $\dot{x}$  und durch den Drehsinn der Steigung  $\ddot{x}$  beschrieben. In Ruhelage sind alle diese Größen null unabhängig von der Abtastzeit.

### 3.1.1 System 2. Ordnung

Die Stellgröße ist auf  $\pm 3$  begrenzt.

Daraus ergibt sich als erster Eingangswert

$$e_1 = 1$$

Aus der Reglerdifferenzgleichung ergibt sich

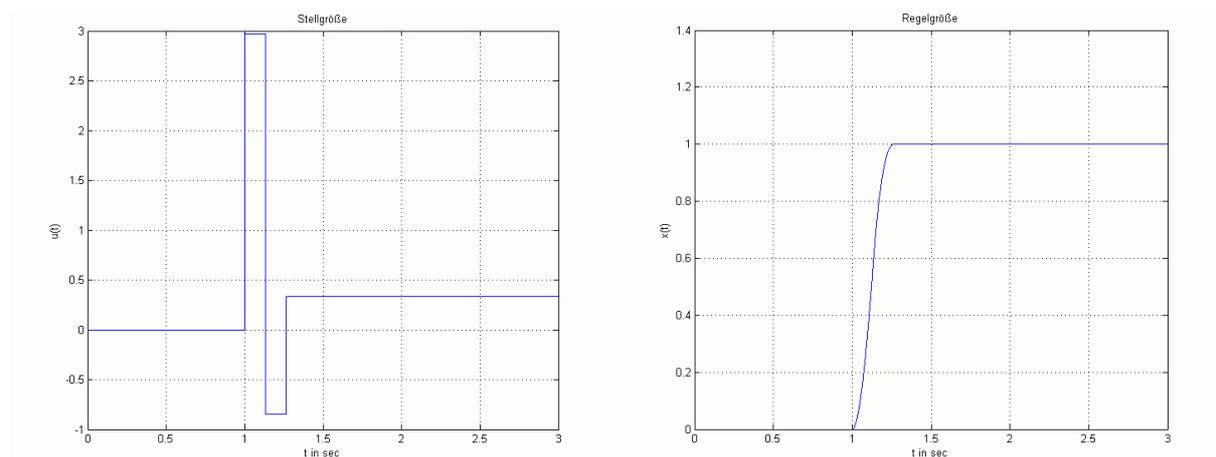
$$u_1 = \frac{1}{b_1 + b_2} \cdot e_1 = 4.674$$

Es wird solange der Wert der Abtastzeit zur Berechnung eines neuen Regelalgorithmus erhöht, bis die daraus errechnete Stellgröße 3 nicht mehr überschreitet. Somit ergibt sich eine neue Abtastzeit von  $t = 0.132 \text{ sec}$ . Das System wird anschließend mit dieser Abtastzeit und entsprechendem Dead-Beat-Regler ausgeregelt. Es werden neue Abtastzeitpunkte festgelegt.

t [sec]	k	x[k]	e[k]	u[k]
1	1	0	1	2.973
1.132	2	0.576	0.424	-0.847
1.264	3	1	0	0.333
1.396	4	1	0	0.333
1.528	5	1	0	0.333

neue Abtastzeitpunkte

**Tabelle 3-1:** Regelgröße, Regeldifferenz und Stellgröße zu den neuen Abtastzeitpunkten bei mit  $\pm 3$  begrenzter Stellgröße eines System mit einer  $PT_2$ -Strecke



**Abbildung 3-1:** Stell- und Regelgrößenverlauf bei begrenzter Stellgröße  $u_{\max/\min} = \pm 3$  eines Dead-Beat Reglers nach Strategie 1 für eine  $PT_2$ -Strecke

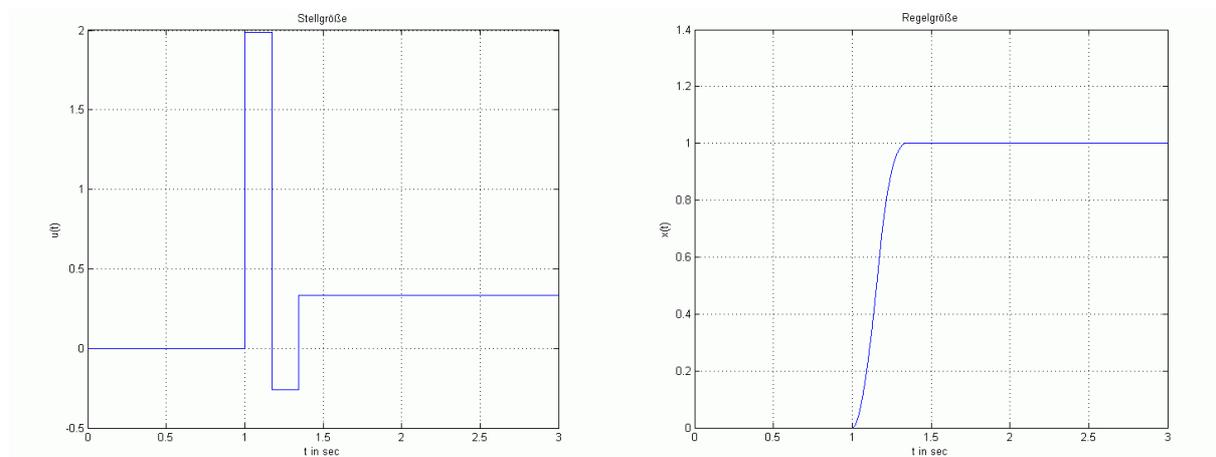
Die minimale Schrittzahl bleibt erhalten und es ergibt sich eine Gesamtregeldauer von 0.264 sec.

Ist die Stellgröße auf  $\pm 2$  begrenzt ergibt sich eine neue Abtastzeit von  $t = 0.172\text{sec}$  und neue Abtastzeitpunkte werden festgelegt. Anschließend wird das System mit dieser Abtastzeit und entsprechendem Dead-Beat-Regler ausgeregelt.

t [sec]	k	x[k]	e[k]	u[k]
1	1	0	1	1.985
1.172	2	0.599	0.401	-0.262
1.344	3	1	0	0.333
1.516	4	1	0	0.333
1.688	5	1	0	0.333

neue Abtastpunkte

**Tabelle 3-2:** Regelgröße, Regeldifferenz und Stellgröße zu den neuen Abtastzeitpunkten bei mit  $\pm 2$  begrenzter Stellgröße eines System mit einer  $PT_2$ -Strecke



**Abbildung 3-2:** Stell- und Regelgrößenverlauf bei begrenzter Stellgröße  $u_{\max/\min} = \pm 2$  eines Dead-Beat-Reglers nach Strategie 1 für eine  $PT_2$ -Strecke

Die Gesamtregelzeit beträgt 0.344 sec.

Für eine starke Begrenzung von  $\pm 0.5$  wird eine Abtastzeit von  $t = 0.604\text{sec}$  ermittelt, damit der Stellgrößenwert nicht die Begrenzung überschreitet. Es ergeben sich neue Abtastpunkte und folgender Regelverlauf.

t [sec]	k	x[k]	e[k]	u[k]
1	1	0	1	0.5
1.604	2	0.801	0.199	0.326
2.208	3	1	0	0.333
2.812	4	1	0	0.333
3.416	5	1	0	0.333

neue Abtastpunkte

**Tabelle 3-3:** Regelgröße, Regeldifferenz und Stellgröße zu den neuen Abtastzeitpunkten bei mit  $\pm 0.5$  begrenzter Stellgröße eines System mit einer  $PT_2$ -Strecke

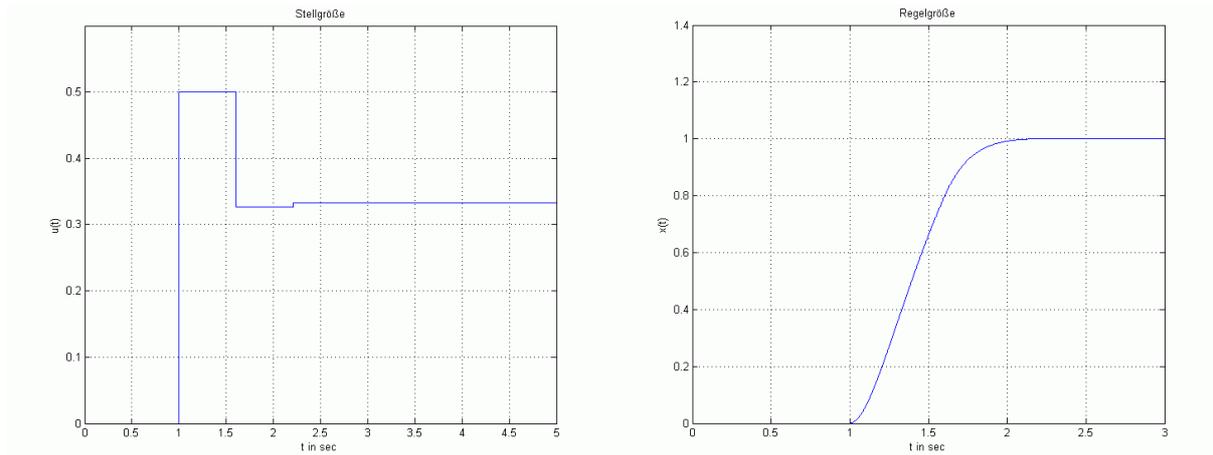


Abbildung 3-3: Stell- und Regelgrößenverlauf bei begrenzter Stellgröße  $u_{\max/\min} = \pm 0.5$  eines Dead-Beat-Reglers nach Strategie 1 für eine  $PT_2$ -Strecke

Die Gesamtregelzeit beträgt 1.208 sec.

### 3.1.2 System 3. Ordnung

Die Stellgröße ist auf  $\pm 3$  begrenzt.

Daraus ergibt sich als erster Eingangswert

$$e_1 = 1 .$$

Aus der Reglerdifferenzgleichung ergibt sich

$$u_1 = \frac{1}{b_1 + b_2 + b_3} \cdot e_1 = 4.021 .$$

Es wird solange der Wert der Abtastzeit zur Berechnung eines neuen Regelalgorithmus erhöht, bis die daraus errechnete Stellgröße 3 nicht mehr überschreitet. Somit ergibt sich eine neue Abtastzeit von  $t = 0.114 \text{ sec}$ . Das System wird anschließend mit dieser Abtastzeit und entsprechendem Dead-Beat-Regler ausgeregelt. Es werden neue Abtastzeitpunkte festgelegt.

t [sec]	k	x[k]	e[k]	u[k]
1	1	0	1	2.968
1.114	2	0.244	0.756	-2.628
1.228	3	0.896	0.104	0.537
1.342	4	1	0	0
1.456	5	1	0	0

neue Abtastpunkte

Tabelle 3-4: Regelgröße, Regeldifferenz und Stellgröße zu den neuen Abtastzeitpunkten bei mit  $\pm 3$  begrenzter Stellgröße eines System mit einer  $IT_2$ -Strecke

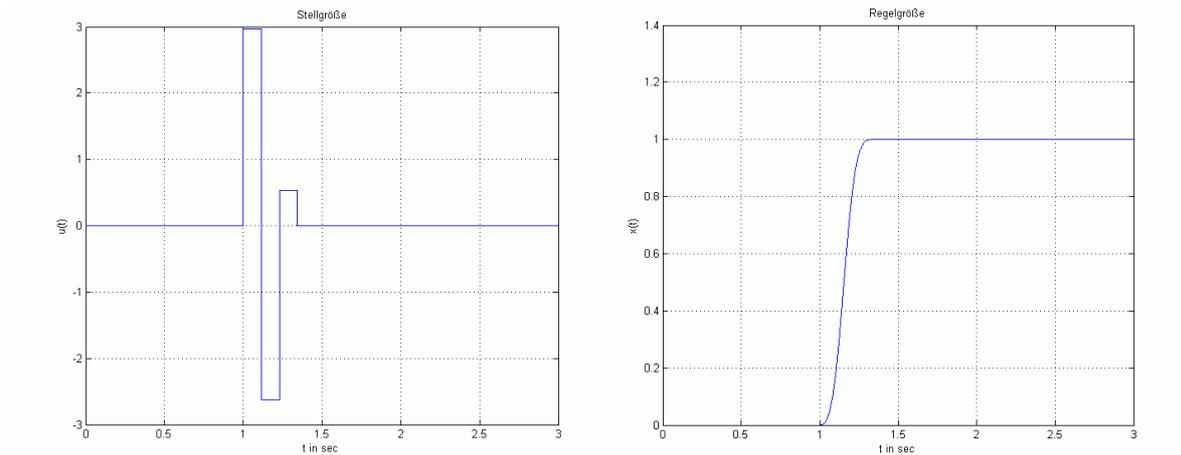


Abbildung 3-4: Stell- und Regelgrößenverlauf bei begrenzter Stellgröße  $u_{\max/\min} = \pm 3$  eines Dead-Beat-Reglers nach Strategie 1 für eine  $IT_2$ -Strecke

Die Gesamtregelzeit beträgt 0.342 sec.

Ist die Stellgröße auf  $\pm 2$  begrenzt, ergibt sich eine neue Abtastzeit von  $t = 0.137$  sec und neue Abtastzeitpunkte werden festgelegt. Anschließend wird das System mit dieser Abtastzeit und entsprechendem Dead-Beat-Regler ausgeregelt.

t [sec]	k	x[k]	e[k]	u[k]	
1	1	0	1	1.973	
1.137	2	0.261	0.739	-1.496	neue Abtastpunkte
1.274	3	0.906	0.094	0.253	
1.411	4	1	0	0	
1.548	5	1	0	0	

Tabelle 3-5: Regelgröße, Regeldifferenz und Stellgröße zu den neuen Abtastzeitpunkten bei mit  $\pm 2$  begrenzter Stellgröße eines System mit einer  $IT_2$ -Strecke

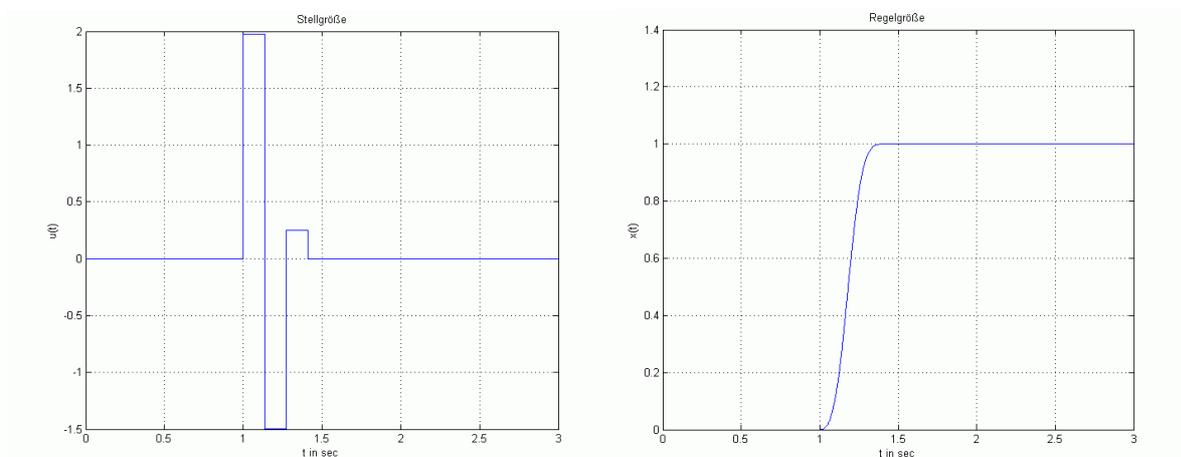


Abbildung 3-5: Stell- und Regelgrößenverlauf bei begrenzter Stellgröße  $u_{\max/\min} = \pm 2$  eines Dead-Beat-Reglers nach Strategie 1 für eine  $IT_2$ -Strecke

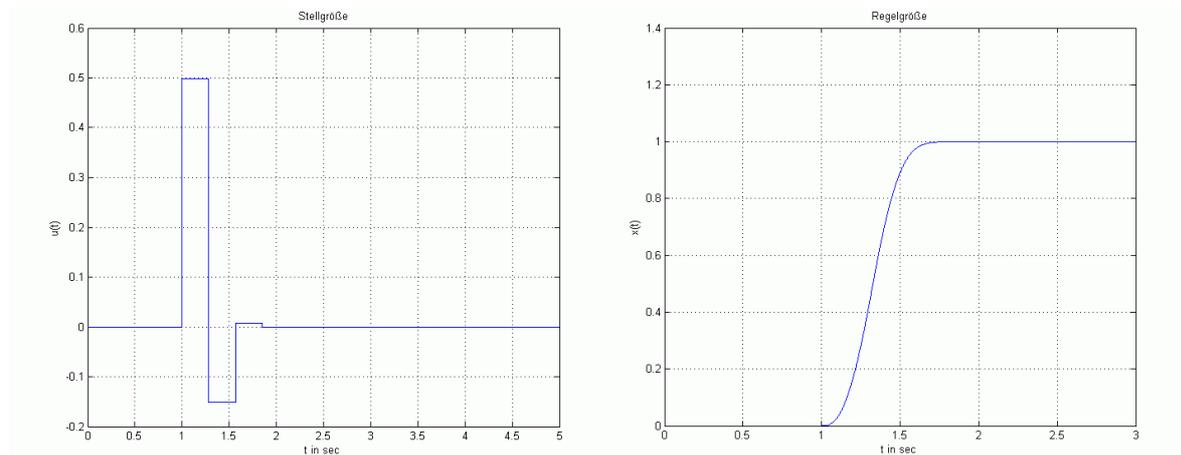
Die Gesamtregelzeit beträgt 0.411 sec.

Für eine starke Begrenzung von  $\pm 0.5$  wird eine Abtastzeit von  $t = 0.282 \text{ sec}$ , ermittelt damit der Stellgrößenwert nicht die Begrenzung überschreitet. Es ergeben sich neue Abtastpunkte und folgender Regelverlauf.

t [sec]	k	x[k]	e[k]	u[k]
1	1	0	1	0.499
1.282	2	0.368	0.632	-0.152
1.564	3	0.955	0.045	0.007
1.846	4	1	0	0
2.128	5	1	0	0

neue Abtastpunkte

**Tabelle 3-6: Regelgröße, Regeldifferenz und Stellgröße zu den neuen Abtastzeitpunkten bei mit  $\pm 0.5$  begrenzter Stellgröße eines System mit einer  $IT_2$ -Strecke**



**Abbildung 3-6: Stell- und Regelgrößenverlauf bei begrenzter Stellgröße  $u_{\max/\min} = \pm 0.5$  eines Dead-Beat-Reglers nach Strategie 1 für eine  $IT_2$ -Strecke**

Die Gesamtregelzeit beträgt 0.846 sec.

### 3.2 Strategie 2: Sollwertkorrektur

Grundlage dieses Regelverfahrens bildet das Überlagerungsprinzip, welches, wie bereits beschrieben, bei dynamischer Sollwertänderung gilt. Bei diesem Regelverfahren wird der Sollwert indirekt über die Regeldifferenz an die zulässige Stellgröße angepasst. Der Sollwert wird so schrittweise angenähert, bis der gewünschte Wert erreicht wird. Aufgrund des Überlagerungsprinzips erhöht sich die Anzahl der Regelschritte. Nach der letzten Korrektur des Sollwertes werden noch  $n$  Schritte zur Ausregelung benötigt. Die Eigenschaft des Regels mit endlicher Einstellzeit bleibt erhalten.

Funktionsweise des Reglers:

Wird ein Führungssprung auf das Regelsystem gegeben, wird der Eingangswert  $e_k$  abgespeichert und anhand der Reglerdifferenzgleichung die Stellgröße  $u_k$  berechnet. Die ermittelte Stellgröße wird mit dem maximal bzw. minimal zulässigen Stellgrößewert verglichen. Überschreitet bzw. unterschreitet die errechnete Stellgröße den Begrenzungswert, wird der Wert  $u_k$  durch  $u_{\max}$  bzw.  $u_{\min}$  ersetzt und ausgegeben. Dementsprechend wird auch das zu diesem Abtastzyklus zugehörige  $e_k$  passend zur korrigierten Stellgröße zurückberechnet und ebenfalls ersetzt. Es wirkt im Regler so, dass nicht auf den eigentlichen Sollwert geregelt werden soll, sondern auf einen kleineren Sollwert, sodass die Stellgröße innerhalb der Begrenzung bleibt.

Im nächsten Abtastzyklus wird die reale Regeldifferenz zum eigentlichen Sollwert abgetastet. Für den Regler wirkt es so, als würde ein neuer Führungssprung auf das Regelsystem gegeben werden. Aufgrund des Überlagerungsprinzips wird ein neuer Stellgrößenverlauf festgelegt. Liegt die berechnete Stellgröße wieder außerhalb der Begrenzung wird wieder so verfahren, dass die Regeldifferenz bzw. der Sollwert auf die zulässige Stellgröße angepasst und intern korrigiert wird.

### 3.2.1 System 2. Ordnung

Die Stellgröße ist auf  $\pm 3$  begrenzt.

Daraus ergibt sich als erster Eingangswert

$$e_1 = 1 .$$

Aus der Reglerdifferenzgleichung ergibt sich

$$u_1 = \frac{1}{b_1 + b_2} \cdot e_1 = 4.674 .$$

Die Stellgröße ist zu groß und wird durch den maximal zulässigen ersetzt.

$$u_1 = u_{\max} = 3$$

Die dazugehörige Regeldifferenz wird zurückberechnet und intern korrigiert.

$$e_1 = (b_1 + b_2) \cdot u_{\max} = 0.642$$

korrigierter Sollwert:

$$w_1 = 0 + 0.642 = 0.642$$

Im nächsten Abtastzyklus ergibt sich als Regeldifferenz aus dem eigentlichen Sollwert

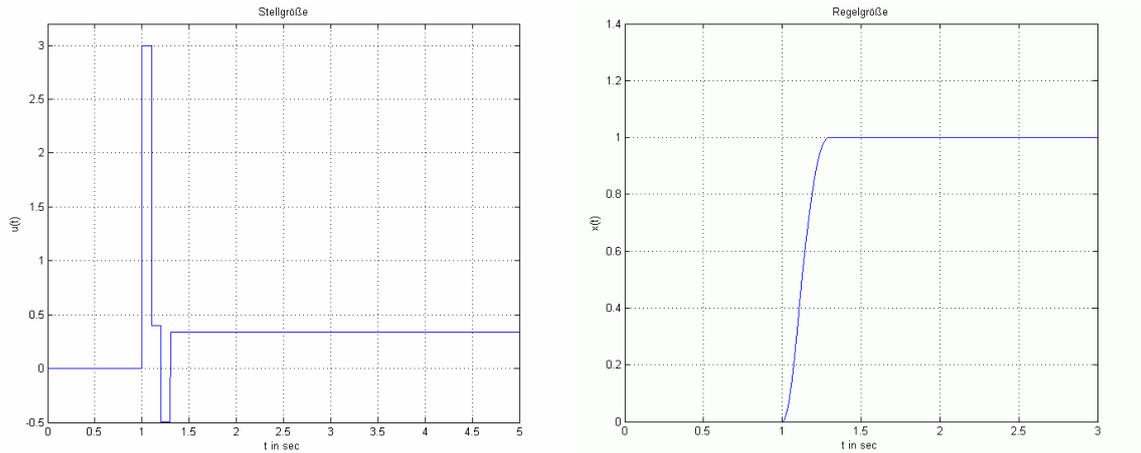
$$e_2 = 1 - x_2 = 1 - 0.358 = 0.642 .$$

Im Regler wirkt sich dies so aus, als würde ein Sprung von 0.358 auf 1 erfolgen. Der neue Stellgrößenverlauf wird für diesen Sprung errechnet.

t [sec]	k	x[k]	e[k]	u[k]	w[k]
1	1	0	0.642	3	0.642
1.1	2	0.358	0.642	0.398	1
1.2	3	0.842	0.158	-0.498	1
1.3	4	1	0	0.333	1

korrigierte Werte

**Tabelle 3-7: Regelgröße, Regeldifferenz, Stellgröße und regelinterner Sollwert zu den Abtastzeitpunkten bei mit  $\pm 3$  begrenzter Stellgröße eines System mit einer  $PT_2$ -Strecke**



**Abbildung 3-7: Stell- und Regelgrößenverlauf bei begrenzter Stellgröße  $u_{\max/\min} = \pm 3$  eines Dead-Beat-Reglers nach Strategie 2 für eine PT<sub>2</sub>-Strecke**

Der Regelverlauf verlängert sich um einen Schritt, die Gesamtregelzeit beträgt 0.3 sec.

Bei einer Begrenzung von  $\pm 2$  wird  $u_1$  durch  $u_{\max} = 2$  ersetzt und die dazugehörige Regeldifferenz zurückberechnet.

$$e_1 = (b_1 + b_2) \cdot u_{\max} = 0.428$$

Entsprechend wird der Wert intern ersetzt. Dies entspricht einem korrigierten Sollwert von  $w_1 = 0 + 0.428 = 0.428$ .

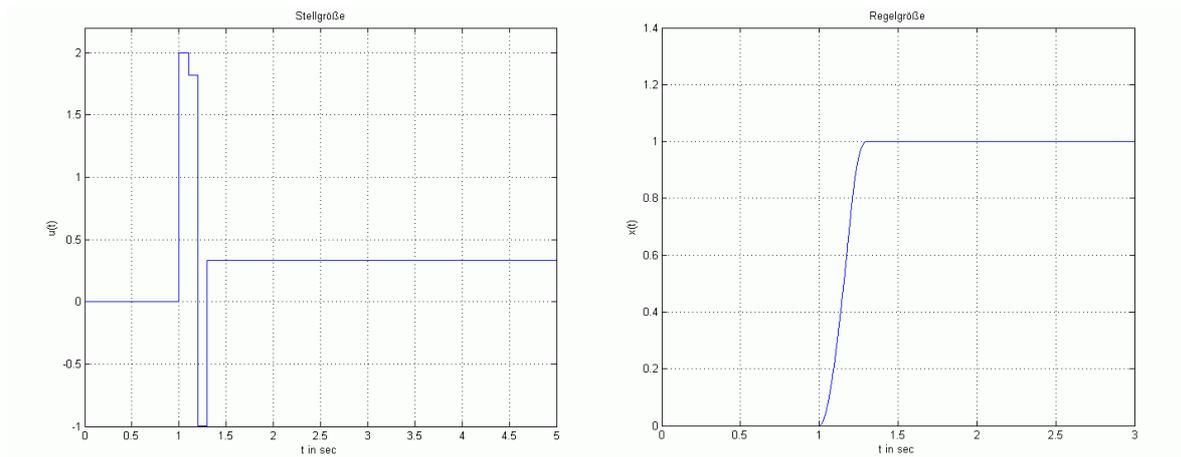
Im nächsten Abtastzyklus ergibt sich als Regeldifferenz aus dem eigentlichen Sollwert  $e_2 = 1 - x_2 = 1 - 0.239 = 0.761$ .

Im Regler wirkt sich dies so aus, als würde ein Sprung von 0.239 auf 1 erfolgen. Der neue Stellgrößenverlauf wird für diesen Sprung errechnet.

t [sec]	k	x[k]	e[k]	u[k]	w[k]
1	1	0	0.428	2	0.428
1.1	2	0.239	0.761	1.823	1
1.2	3	0.747	0.253	-0.994	1
1.3	4	1	0	0.333	1

korrigierte Werte

**Tabelle 3-8: Regelgröße, Regeldifferenz, Stellgröße und regelinterner Sollwert zu den Abtastzeitpunkten bei mit  $\pm 2$  begrenzter Stellgröße eines System mit einer PT<sub>2</sub>-Strecke**



**Abbildung 3-8: Stell- und Regelgrößenverlauf bei begrenzter Stellgröße  $u_{\max/\min} = \pm 2$  eines Dead-Beat-Reglers nach Strategie 2 für eine PT<sub>2</sub>-Strecke**

Der Regelverlauf verlängert sich um einen Schritt, die Gesamtregelzeit beträgt 0.3 sec.

Bei einer Begrenzung von  $\pm 0.5$  wird ähnlich verfahren.  $u_1$  wird gleich 0.5 gesetzt und die dazugehörige Regeldifferenz wird zurückberechnet und intern korrigiert.

$$e_1 = (b_1 + b_2) \cdot u_{\max} = 0.107$$

Dies entspricht einem neuen Sollwert

$$w_1 = 0 + 0.107 = 0.107 \text{ .}$$

Im nächsten Abtastzyklus ergibt sich als Regeldifferenz aus dem eigentlichen Sollwert

$$e_2 = 1 - x_2 = 1 - 0.239 = 0.761 \text{ .}$$

Die aus dieser Eingangsgröße errechnete Stellgröße ist wiederum größer als der zulässige Wert, so dass eine weitere Korrektur nötig ist.

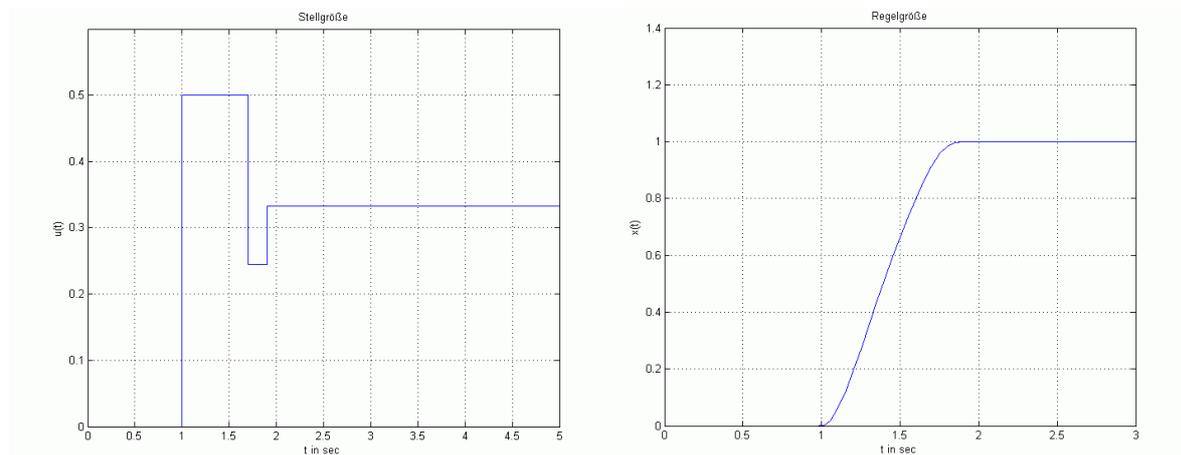
$$e_2 = (b_1 + b_2) \cdot 0.5 - b_1 \cdot 0.5 - a_1 \cdot 0.107 = 0.199$$

Das Verfahren wird fortgeführt, bis die berechnete Stellgröße innerhalb der Begrenzung ist und keine Korrektur mehr nötig ist.

t [sec]	k	x[k]	e[k]	u[k]	korrigiertes w[k]
1	1	0	0.107	0.5	0.107
1.1	2	0.060	0.199	0.5	0.259
1.2	3	0.192	0.232	0.5	0.424
1.3	4	0.351	0.231	0.5	0.582
1.4	5	0.512	0.214	0.5	0.726
1.5	6	0.662	0.19	0.5	0.853
1.6	7	0.797	0.165	0.5	0.962
1.7	8	0.914	0.086	0.245	1
1.8	9	0.983	0.017	0.245	1
1.9	10	1	0	0.333	1

korrigierte Werte

**Tabelle 3-9:** Regelgröße, Regeldifferenz, Stellgröße und regelinterner Sollwert zu den Abtastzeitpunkten bei mit  $\pm 0.5$  begrenzter Stellgröße eines System mit einer  $PT_2$ -Strecke



**Abbildung 3-9:** Stell- und Regelgrößenverlauf bei begrenzter Stellgröße  $u_{\max/\min} = \pm 0.5$  eines Dead-Beat-Reglers nach Strategie 2 für eine  $PT_2$ -Strecke

Die Gesamtregelzeit beträgt 0.9 sec.

### 3.2.2 System 3. Ordnung

Die Stellgröße ist auf  $\pm 3$  begrenzt.

Daraus ergibt sich als erster Eingangswert

$$e_1 = 1 .$$

Aus der Reglerdifferenzgleichung ergibt sich

$$u_1 = \frac{1}{b_1 + b_2 + b_3} \cdot e_1 = 4.021 .$$

Die Stellgröße ist zu groß und wird durch den maximal zulässigen Wert ersetzt.

$$u_1 = u_{\max} = 3$$

Die dazugehörige Regeldifferenz wird zurückberechnet und intern korrigiert.

$$e_1 = (b_1 + b_2 + b_3) \cdot u_{\max} = 0.746$$

korrigierter Sollwert:

$$w_1 = 0 + 0.746 = 0.746$$

Im nächsten Abtastzyklus ergibt sich als Regeldifferenz aus dem eigentlichen Sollwert

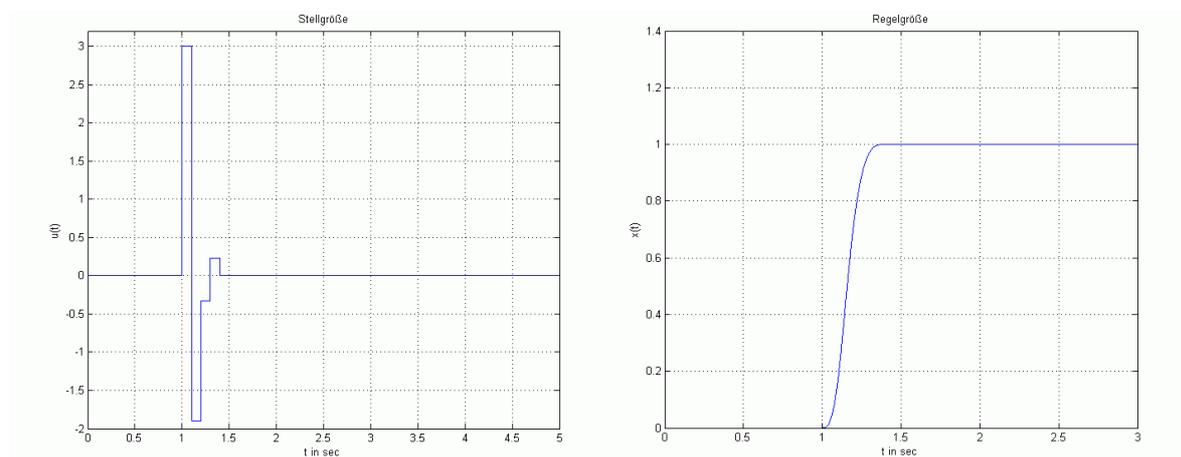
$$e_2 = 1 - x_2 = 1 - 0.175 = 0.825 .$$

Im Regler wirkt sich dies so aus, als würde ein Sprung von 0.175 auf 1 erfolgen. Der neue Stellgrößenverlauf wird für diesen Sprung errechnet.

t [sec]	k	x[k]	e[k]	u[k]	w[k]
1	1	0	0.746	3	0.746
1.1	2	0.175	0.825	-1.903	1
1.2	3	0.723	0.277	-0.325	1
1.3	4	0.972	0.028	0.228	1
1.4	5	1	0	0	1

korrigierte Werte

**Tabelle 3-10:** Regelgröße, Regeldifferenz, Stellgröße und regelinterner Sollwert zu den Abtastzeitpunkten bei mit  $\pm 3$  begrenzter Stellgröße eines System mit einer  $IT_2$ -Strecke



**Abbildung 3-10:** Stell- und Regelgrößenverlauf bei begrenzter Stellgröße  $u_{\max/\min} = \pm 3$  eines Dead-Beat-Reglers nach Strategie 2 für eine  $IT_2$ -Strecke

Der Regelverlauf verlängert sich um einen Schritt, die Gesamtregelzeit beträgt 0.4 sec.

Bei einer Begrenzung von  $\pm 2$  wird  $u_1$  durch  $u_{\max} = 2$  ersetzt und die dazugehörige Regeldifferenz zurückberechnet.

$$e_1 = (b_1 + b_2 + b_3) \cdot u_{\max} = 0.497$$

Entsprechend ist der korrigierte Sollwert:

$$w_1 = 0 + 0.497 = 0.497$$

Im nächsten Abtastzyklus ergibt sich als Regeldifferenz aus dem eigentlichen Sollwert

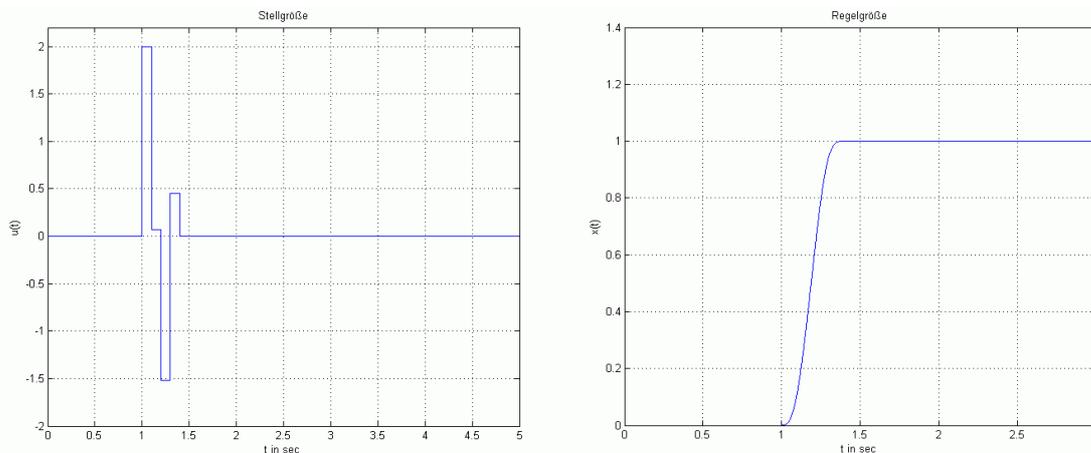
$$e_2 = 1 - x_2 = 1 - 0.116 = 0.884 .$$

Im Regler wirkt sich dies so aus, als würde ein Sprung von 0.116 auf 1 erfolgen. Der neue Stellgrößenverlauf wird für diesen Sprung errechnet.

t [sec]	k	x[k]	e[k]	u[k]	w[k]
1	1	0	0.497	2	0.497
1.1	2	0.116	0.884	0.072	1
1.2	3	0.56	0.44	-1.523	1
1.3	4	0.944	0.056	0.451	1
1.4	5	1	0	0	1

korrigierte Werte

**Tabelle 3-11:** Regelgröße, Regeldifferenz, Stellgröße und regelinterner Sollwert zu den Abtastzeitpunkten bei mit  $\pm 2$  begrenzter Stellgröße eines System mit einer  $IT_2$ -Strecke



**Abbildung 3-11:** Stell- und Regelgrößenverlauf bei begrenzter Stellgröße  $u_{\max/\min} = \pm 2$  eines Dead-Beat-Reglers nach Strategie 2 für eine  $IT_2$ -Strecke

Der Regelverlauf verlängert sich um einen Schritt, die Gesamtregelzeit beträgt 0.4 sec.

Bei einer Begrenzung von  $\pm 0.5$  wird ähnlich verfahren.  $u_1$  wird gleich 0.5 gesetzt und die dazugehörige Regeldifferenz wird zurückberechnet und intern korrigiert.

$$e_1 = (b_1 + b_2 + b_3) \cdot u_{\max} = 0.124$$

Entsprechend ist der korrigierte Sollwert:

$$w_1 = 0 + 0.124 = 0.124$$

Im nächsten Abtastzyklus ergibt sich als Regeldifferenz aus dem eigentlichen Sollwert

$$e_2 = 1 - x_2 = 1 - 0.029 = 0.971 .$$

Die aus dieser Eingangsgröße errechnete Stellgröße ist wiederum größer als der zulässige Wert, so dass eine weitere Korrektur nötig ist.

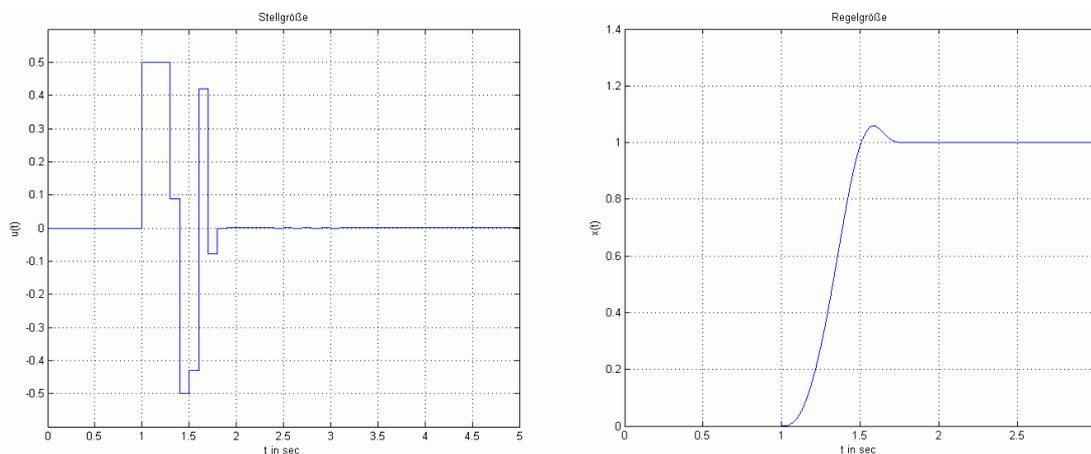
$$e_2 = (b_1 + b_2 + b_3) \cdot 0.5 - b_1 \cdot 0.5 - a_1 \cdot 0.124 = 0.341$$

Das Verfahren wird fortgeführt, bis die berechnete Stellgröße innerhalb der Begrenzung ist und keine Korrektur mehr nötig ist.

t [sec]	k	x[k]	e[k]	u[k]	korrigiertes w[k]
1	1	0	0.124	0.5	0.124
1.1	2	0.029	0.341	0.5	0.37
1.2	3	0.168	0.538	0.5	0.706
1.3	4	0.421	0.579	0.087	1
1.4	5	0.737	0.35	-0.5	1.087
1.5	6	0.988	0.012	-0.43	1
1.6	7	1.057	-0.057	0.421	1
1.7	8	1.01	-0.01	-0.078	1
1.8	9	1	0	0	1

korrigierte Werte

**Tabelle 3-12:** Regelgröße, Regeldifferenz, Stellgröße und regelinterner Sollwert zu den Abtastzeitpunkten bei mit  $\pm 0.5$  begrenzter Stellgröße eines System mit einer  $IT_2$ -Strecke



**Abbildung 3-12:** Stell- und Regelgrößenverlauf bei begrenzter Stellgröße  $u_{\max/\min} = \pm 0.5$  eines Dead-Beat-Reglers nach Strategie 2 für eine  $IT_2$ -Strecke

Die Gesamtregelzeit beträgt 0.8 sec. Es ist zu erkennen, dass der Sollwert einmal nach oben hin korrigiert wurde. Dies kommt zustande, wenn eine negative Stellamplitude korrigiert werden muss. Da die Begrenzung stark ist, sind die ersten vier Stellamplituden positiv und daher ist auch die Steigung hoch. Der Wert der Regelgröße entspricht fast dem eigentlichen Sollwert und aufgrund der hohen Steigung muss diese sehr stark „gebremst“ werden. Da ein

„Bremsen“ mit der benötigten Amplitude aufgrund der Begrenzung nicht möglich ist, muss ein höherer Sollwert zulässig sein, so dass in ein Überschwingen erfolgt. Die letzte Korrektur wirkt also wie ein negativer Sprung von 1.087 auf 1, welcher mit Dead-Beat-Verhalten ausgeregelt wird. Zwar weist der Gesamtregelverlauf, aufgrund des Überschwingens, kein Dead-Beat-Verhalten auf, gleichwohl erfolgt die Regelung nach endlicher Schrittzahl.

### 3.3 Strategie 3: Störgrößenregelung mit Korrekturglied

Da eine Begrenzung wie eine Störung aufgefasst werden kann, kann ein Dead-Beat-Regler auch hinsichtlich Störgrößenverhalten entworfen werden. Dabei werden die Pole der Störübertragungsfunktion in den Ursprung gelegt.

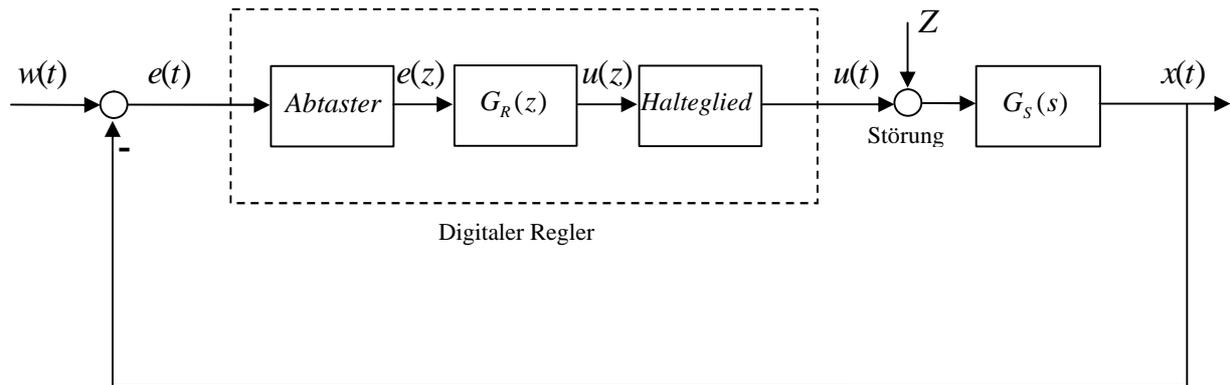


Abbildung 3-13: Regelkreis mit digitalem Regler und Störung

Störübertragungsfunktion: 
$$G_Z = \frac{G_S}{1 + G_R G_S} = \frac{Z_S N_R}{Z_R Z_S + N_R N_S}$$

#### Berechnung des Dead-Beat-Reglers für Störgrößen

Vorgabe: 1. alle Pole der Störübertragungsfunktion bei  $z = 0$

$$N_R = (z-1) \cdot Z_S$$

$\Rightarrow$

$$G_Z(z) = \frac{(z-1) \cdot Z_S^2}{Z_R Z_S + (z-1) \cdot Z_S \cdot N_S} = \frac{(z-1) \cdot Z_S}{Z_R + (1-z) \cdot N_S} \stackrel{!}{=} \frac{(z-1) \cdot Z_S}{z^{n+1}}$$

$$Z_R = z^{n+1} - (1-z) \cdot N_S$$

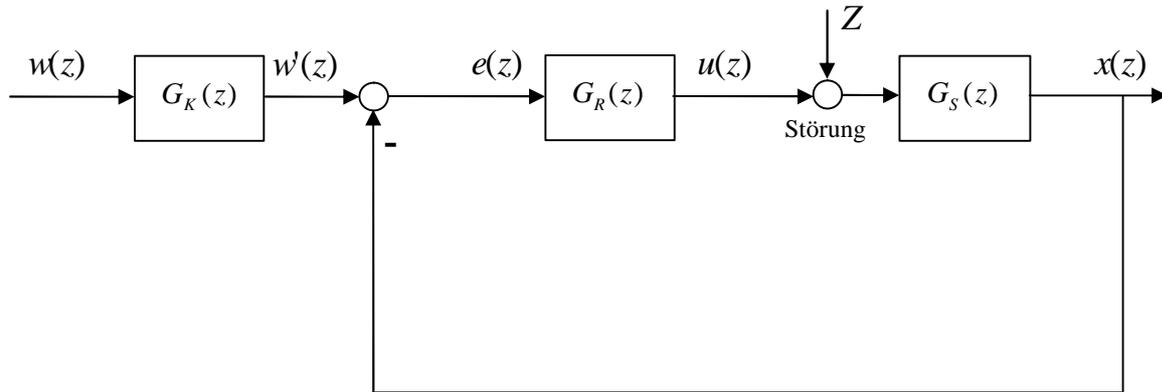


Abbildung 3-14: Digitaler Regelkreis mit Dead-Beat-Regler für Störgrößen und Korrekturglied

Damit eine Dead-Beat-Regelung für Führungssprünge möglich ist, wird ein Korrekturglied benötigt. Auch alle Pole der Führungsübertragungsfunktion müssen in den Ursprung gelegt werden.

### Berechnung des Korrekturgliedes

Vorgabe: 1. alle Pole der Führungsübertragungsfunktion bei  $z = 0$

$$G_W(z) = G_K(z) \cdot \frac{G_R(z) \cdot G_S(z)}{1 + G_R(z) \cdot G_S(z)} = \frac{Z_K}{N_K} \cdot \frac{Z_S Z_R}{Z_S Z_R + N_S N_R} \stackrel{!}{=} \frac{Z_S(z)}{Z_S(z=1) \cdot z^n}$$

$\Rightarrow$

$$G_K(z) = \frac{Z_S(z) \cdot z}{Z_R(z) \cdot Z_S(z=1)}$$

(vgl. Klinger, Störgrößenregelung endlicher Einstellzeit)

### 3.3.1 System 2. Ordnung

Es gilt:

$$G_S(z) = \frac{b_1 z + b_2}{z^2 + a_1 z + a_2} = \frac{Z_S}{N_S} \quad G_R(z) = \frac{Z_R}{N_R}$$

$$Z_R = z^3 - (z-1) \cdot N_S = (1-a_1)z^2 + (a_1-a_2)z + a_2$$

$$N_R = (z-1) \cdot Z_S = b_1 z^2 + (b_2 - b_1)z - b_2$$

$\Rightarrow$

$$G_R(z) = \frac{(1-a_1)z^2 + (a_1-a_2)z + a_2}{b_1 z^2 + (b_2 - b_1)z - b_2}$$

*Korrekturglied*

$$G_K(z) = \frac{Z_K}{N_K}$$

$$Z_K = Z_S \cdot z = b_1 z^2 + b_2 z$$

$$N_K = Z_R \cdot Z_S(z=1) = (1-a_1)(b_1+b_2)z^2 + (a_1-a_2)(b_1+b_2)z + a_2(b_1+b_2)$$

mit

$$K_I = 3$$

$$T_1 = 0.2 \text{ sec}$$

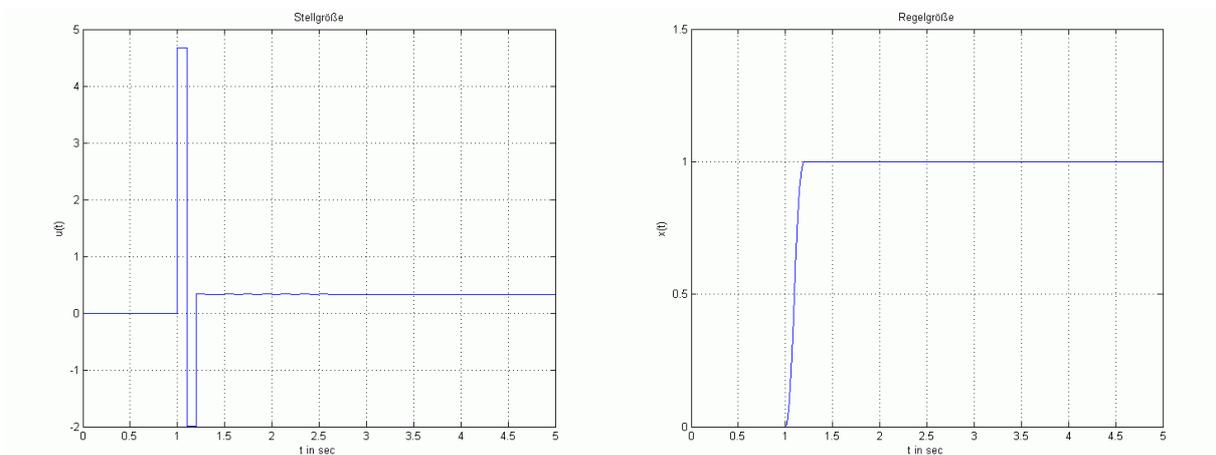
$$T_2 = 0.5 \text{ sec}$$

$$G_R(z) = \frac{2.42526z^2 - 1.92185z + 0.49659}{0.11941z^2 - 0.02484z - 0.09456}$$

*Korrekturglied*

$$G_K(z) = \frac{0.11941z^2 + 0.09456z}{0.51894z^2 - 0.41122z + 0.10626}$$

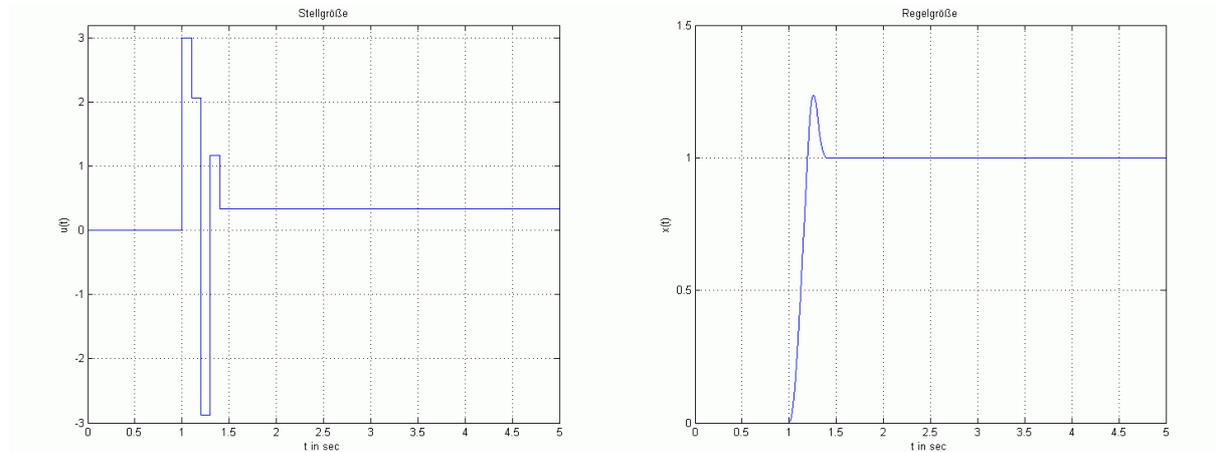
Wie zu erwarten, verlaufen Stellgröße und Regelgröße bei einer unbegrenzten Stellgröße, wie bei einem unbegrenzten Dead-Beat-Regler, der hinsichtlich Führungsverhalten entworfen wurde.



**Abbildung 3-15:** Stell- und Regelgrößenverlauf bei unbegrenzter Stellgröße eines Dead-Beat-Reglers für Störgrößen zur Regelung einer  $PT_2$ -Strecke

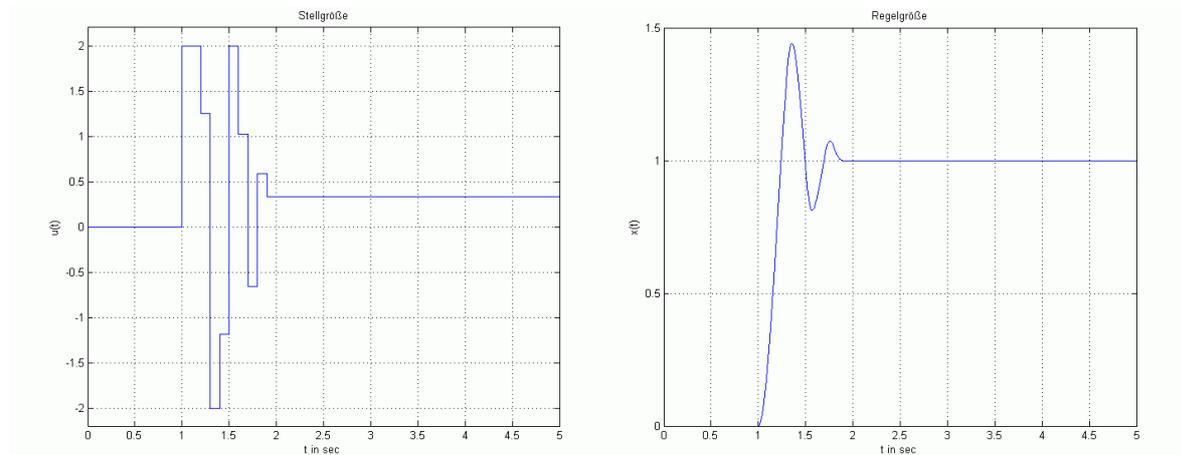
Im Folgenden werden die Stell- und Regelgrößenverläufe für verschiedene Begrenzungen gezeigt.

Schwache Begrenzung  $\pm 3$



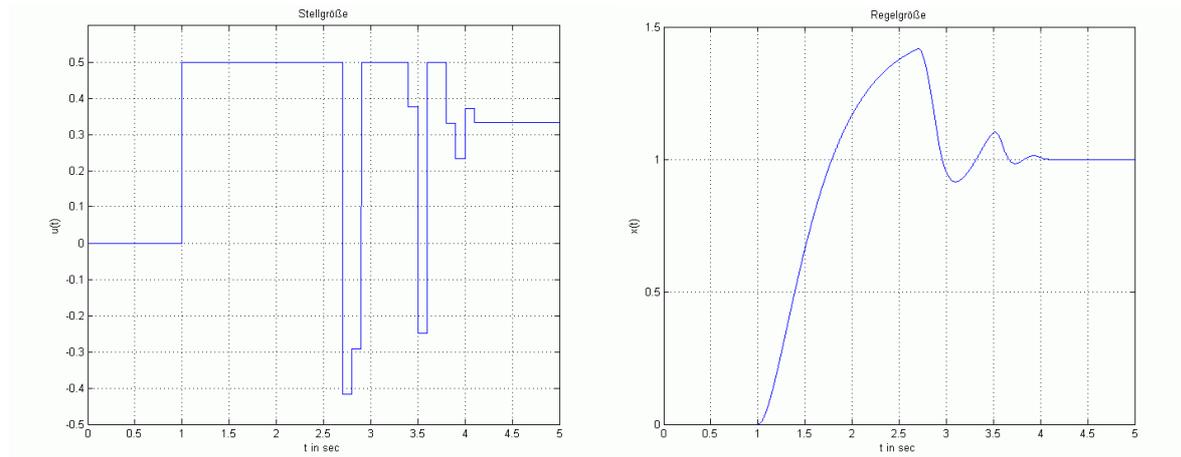
**Abbildung 3-16:** Stell- und Regelgrößenverlauf bei begrenzter Stellgröße  $u_{\max/\min} = \pm 3$  eines Dead-Beat-Reglers für Störgrößen zur Regelung einer  $PT_2$ -Strecke

Mittlere Begrenzung  $\pm 2$



**Abbildung 3-17:** Stell- und Regelgrößenverlauf bei begrenzter Stellgröße  $u_{\max/\min} = \pm 2$  eines Dead-Beat-Reglers für Störgrößen zur Regelung einer  $PT_2$ -Strecke

**Starke Begrenzung  $\pm 0.5$**



**Abbildung 3-18: Stell- und Regelgrößenverlauf bei begrenzter Stellgröße  $u_{\max/\min} = \pm 0.5$  eines Dead-Beat-Reglers für Störgrößen zur Regelung einer PT<sub>2</sub>-Strecke**

**3.3.2 System 3. Ordnung**

Es gilt:

$$G_S(z) = \frac{b_1 z^2 + b_2 z + b_3}{z^3 + a_1 z^2 + a_2 z + a_3} = \frac{Z_S}{N_S} \quad G_R(z) = \frac{Z_R}{N_R}$$

$$Z_R = z^3 - (z-1) \cdot N_S = (1-a_1)z^3 + (a_1-a_2)z^2 + (a_2-a_3)z + a_3$$

$$N_R = (z-1) \cdot Z_S = b_1 z^3 + (b_2 - b_1)z^2 + (b_3 - b_2)z - b_3$$

⇒

$$G_R(z) = \frac{(1-a_1)z^3 + (a_1-a_2)z^2 + (a_2-a_3)z + a_3}{b_1 z^3 + (b_2 - b_1)z^2 + (b_3 - b_2)z - b_3}$$

*Korrekturglied*

$$G_K(z) = \frac{Z_K}{N_K}$$

$$Z_K = Z_S \cdot z = b_1 z^3 + b_2 z^2 + b_3 z$$

$$N_K = Z_R \cdot Z_S(z=1)$$

$$= (1-a_1)(b_1 + b_2 + b_3)z^3 + (a_1-a_2)(b_1 + b_2 + b_3)z^2 + (a_2-a_3)(b_1 + b_2 + b_3)z + a_3(b_1 + b_2 + b_3)$$

$$G_K(z) = \frac{b_1 z^3 + b_2 z^2 + b_3 z}{(1-a_1)(b_1 + b_2 + b_3)z^3 + (a_1-a_2)(b_1 + b_2 + b_3)z^2 + (a_2-a_3)(b_1 + b_2 + b_3)z + a_3(b_1 + b_2 + b_3)}$$

mit

$$K_I = 10 \text{ sec}^{-1}$$

$$T_1 = 0.1 \text{ sec}$$

$$T_2 = 0.2 \text{ sec}$$

$$G_R(z) = \frac{2.97441z^3 - 3.17195z^2 + 1.42067z - 0.22313}{0.05824z^3 + 0.10470z^2 - 0.13541z - 0.02753}$$

Korrekturglied

$$G_K(z) = \frac{0.05824z^3 + 0.16294z^2 + 0.02753z}{0.73980z^3 - 0.78898z^2 + 0.35335z - 0.05550}$$

Wird die Übertragungsfunktion des Reglers näher untersucht, wird deutlich, dass der Regler nicht verwendet werden kann, da nicht alle Pole des Reglers innerhalb des Einheitskreises liegen. Der Regler würde instabiles Verhalten aufweisen, wie anhand der Simulation in MATLAB zu erkennen ist. Der Regelung mit diesem Störgrößenregler wird auf diese Weise Grenzen gesetzt.

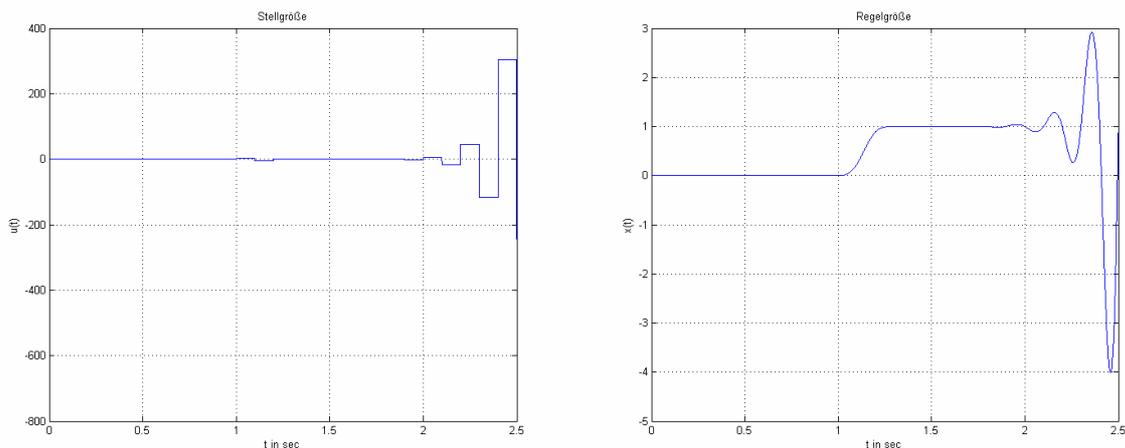
(vgl. Klinger, S. 27)

Pollagen des Reglers:

$$z_1 = -2.61712$$

$$z_2 = -0.18062$$

$$z_3 = 1$$



**Abbildung 3-19:** Stell- und Regelgrößenverlauf bei unbegrenzter Stellgröße eines Dead-Beat-Reglers für Störgrößen zur Regelung einer  $IT_2$ -Strecke

## 4 Umsetzung und Simulation

Die Umsetzung und Simulation der verschiedenen Regelverfahren erfolgt unter MATLAB/Simulink.

MATLAB ist ein Software-Paket zur Lösung mathematisch-technischer Probleme. MATLAB dient primär zur numerischen Lösungen von Problemen. Die Software wird in Industrie und an Hochschulen vor allem für numerische Simulation eingesetzt. Die Software ist für Berechnungen mit Matrizen ausgelegt, woher sich auch der Name ableitet: *MATrix* *LABoratory*.

(s. <http://de.wikipedia.org/wiki/MATLAB> v. 01.07.2007)

Simulink ist eine Erweiterung von MATLAB zur Simulation dynamischer Systeme. Es basiert intern auf MATLAB-Funktionen und erlaubt Modelle, von MATLAB aus, zu steuern. Es können kontinuierliche, sowie zeitdiskrete Systeme, als auch Mischformen modelliert werden. Simulink besitzt eine graphische Bedienoberfläche, wobei die Erstellung eines Modells per Drag&Drop aus einer Block-Bibliothek geschieht.

Mit Simulink kann MATLAB-, C-, Fortran- und Ada-Code mit S-Functions direkt in ein Modell integriert werden. Das Einbinden vom MATLAB-Code ist auch mittels Embedded MATLAB Function möglich.

(vgl. <http://www.tu-harburg.de/rzt/tuinfo/software/numsoft/matlab/kurs/simulink/HTML> v. 01.07.2007)

## 4.1 Simulation der Deat-Beat-Regelung

Zur Simulation eines unbegrenzten Dead-Beat-Reglers genügt die Modellierung mit Standard-Blöcken aus der Simulink-Bibliothek. Für den Regler wird der Standard-Block *Discrete Transfer Fcn* verwendet. Bei Doppelklick auf den Block können die, auf die Strecke und Abtastzeit passenden Koeffizienten und benutzte Abtastzeit, eingetragen werden.

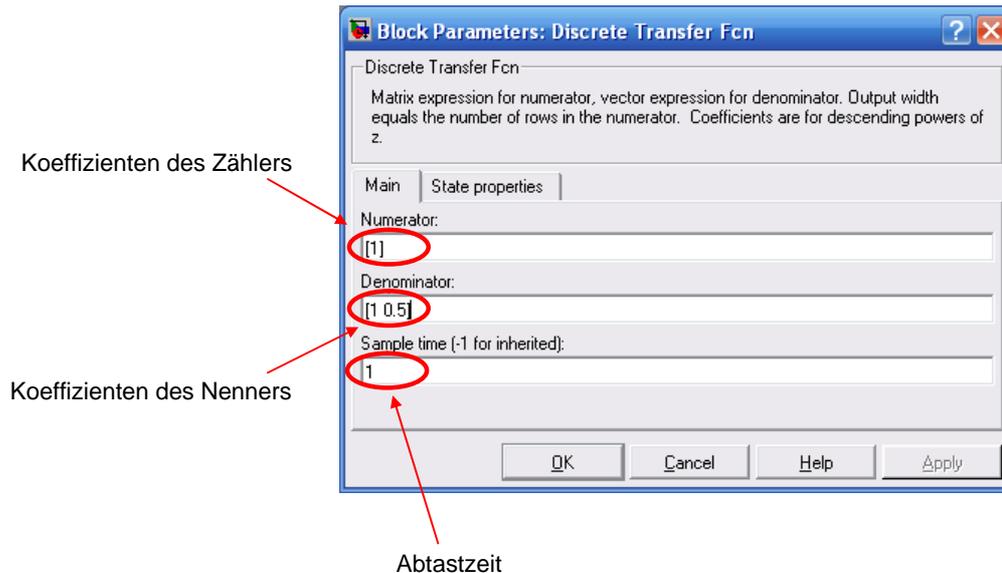
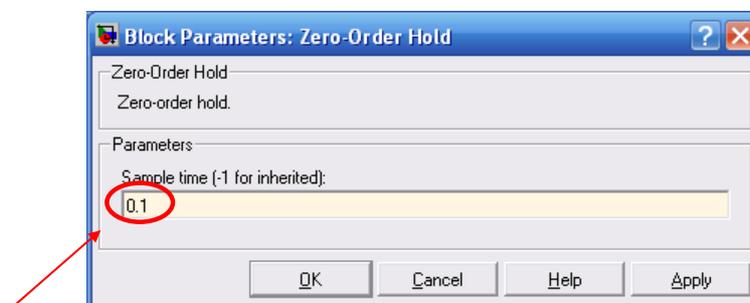


Abbildung 4-1: Dialogfenster zur Parametrierung des Reglers



Der *Zero-Order Hold-Block* wird für den Übergang vom zeitdiskreten Regler zur kontinuierlichen Strecke benötigt. Die zum Abtastzeitzyklus zugehörige Stellgröße ist das Eingangssignal und wird bis zum nächsten Abtastzeitpunkt gehalten. Bei Doppelklick auf den Block kann die Abtastzeit (*Sample Time*) eingetragen werden.



Abtastzeit

Abbildung 4-2: Dialogfenster zum Einstellen der Abtastzeit

(vgl. Angerman/ Beuschel/ Rau/ Wohlfarth 2004 , S. 327)

Abgebildet sind die Simulationsmodelle in MATLAB/ Simulink für eine PT<sub>2</sub>- und IT<sub>2</sub>-Strecke.

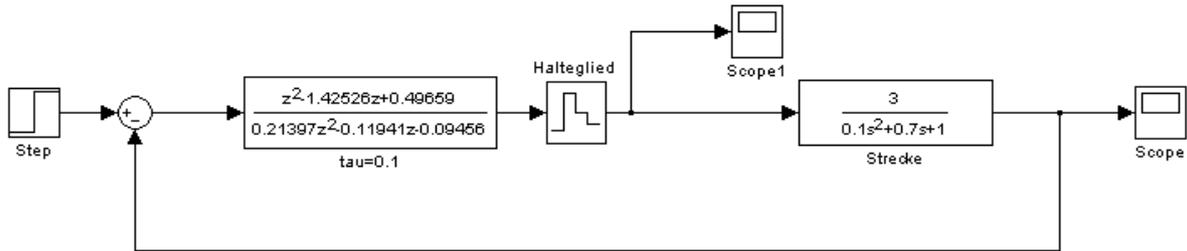


Abbildung 4-3: Simulationsmodell des Regelkreises mit Dead-Beat-Regler für eine PT<sub>2</sub>-Strecke

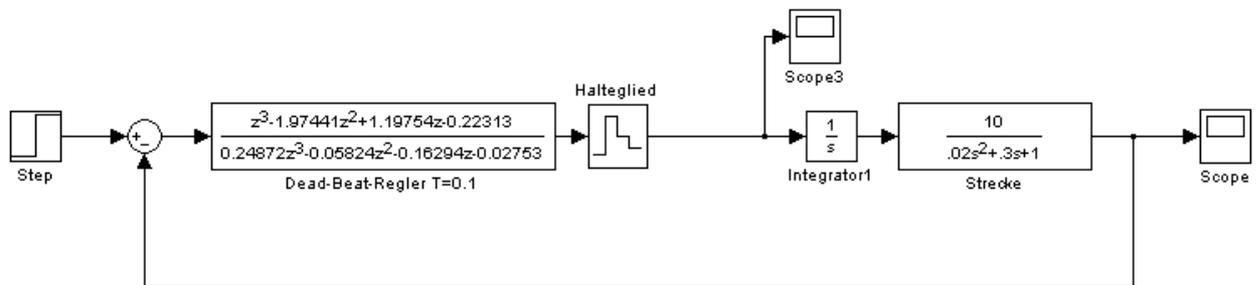


Abbildung 4-4: Simulationsmodell des Regelkreises mit Dead-Beat-Regler für eine IT<sub>2</sub>-Strecke

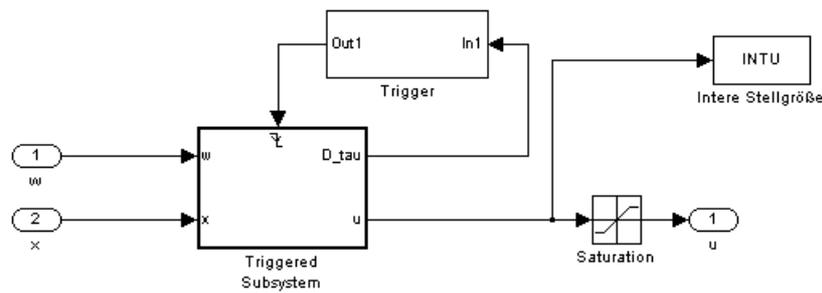
## 4.2 Umsetzung und Simulation der Strategie 1: Abtastzeitenverlängerung

Der Regelalgorithmus wird in einer Embedded Matlab Function realisiert. Der gesamte Regler besteht aus mehreren Ebenen. Der Embedded-Matlab-Function-Block wird über ein triggered Subsystem eingebunden, welches wiederum in ein weiteres Subsystem eingebunden ist.

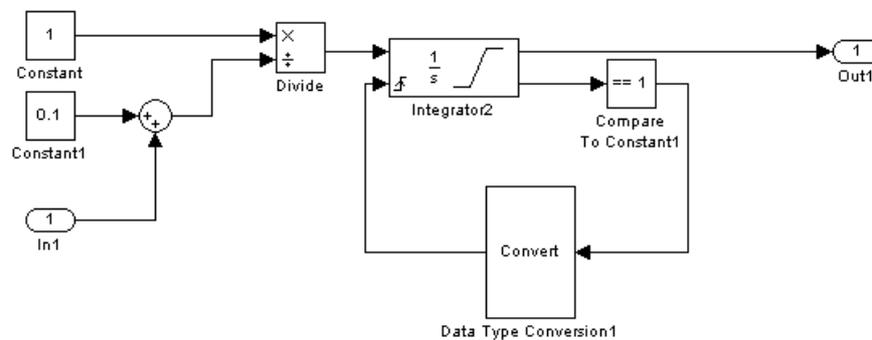
### Ebene 1:



Abbildung 4-5: Reglerblock in der ersten Ebene

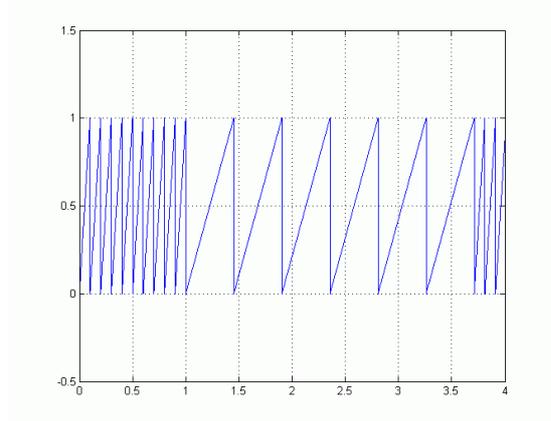
**Ebene 2:****Abbildung 4-6: Reglerblock in der zweiten Ebene**

Das triggered Subsystem enthält zusätzlich noch einen Triggerblock. Das getriggerte Subsystem wird nur zum Zeitpunkt des Trigger-Impulses ausgeführt. Hier wird das System auf die negative Flanke getriggert. Jeweils zum Triggerimpuls werden die Eingangswerte gelesen und Ausgangswerte ausgegeben, so dass so ein Abtastvorgang nachgebildet wird. Es muss für eine Abtastzeitvariation möglich sein, dass Triggersignal entsprechend zu modellieren.

**Trigger:****Abbildung 4-7: Aufbau des Triggers**

Das Triggersignal hat die Form eines „Sägezahnes“. Der Ausgang des Integrator-Blocks wird von außen auf Null gesetzt. In den Einstellungen des Integrator-Blocks wird unter „External reset“ eingestellt, dass bei positiver Flanke des Rücksetzsignals der Reset ausgelöst werden soll. Sobald der Ausgang des Integrators den Wert „1“ erreicht hat, wird das Rücksetzsignal gesetzt. Es entsteht eine „Sägezahn-Funktion“. Je nach Eingang „In1“ des Subsystem „Trigger“ wird die Steigung und somit die Periode der Sägezahn-Funktion verändert.

Folgend ist die „Sägezahn-Funktion“ mit variabler Periode abgebildet.



**Abbildung 4-8: Triggersignal**

Mit der variablen Periodendauer des Triggersignals ist es möglich die Abtastzeit des Reglers zu variieren.

### **Embedded Matlab Function:**

Mit der Embedded Matlab Function können benutzerdefinierte Funktionen in das Simulink Modell integriert werden. Es eignet sich besonders zu Verarbeitung von MATLAB-Code, der textbasierten Programmiersprache von MATLAB. Es können beliebige Ein- und Ausgänge gebildet werden.

Da diese Funktion zyklisch aufgerufen wird, müssen die Größen der vergangenen Zyklen außerhalb des Blockes gespeichert werden.

(vgl. <http://www.mathworks.com> „Introduction to Embedded MATLAB Function“ v. 11.07.07)

### **Speicher:**



Der Memory-Block hält das Eingangssignal intern einen Abtastschritt und gibt erst dann das Eingangssignal an den Ausgang. Somit stellt also der Memory-Block intern ein Halteglied 0. Ordnung dar. Sind mehrere Memory-Blöcke hintereinander geschaltet, entspricht die Anzahl der hintereinander geschalteten Memory-Blöcke der Anzahl der Schrittweite bis das Signal am Ende ausgegeben wird.

(vgl. Angerman/ Beuschel/ Rau/ Wohlfarth 2004)

Die zum Abtastzyklus zugehörigen Größen (Sollwert, Regelgröße, Regeldifferenz, Stellgröße) werden ausgegeben und dann über einen Memory-Block wieder als Eingang eingeführt, um diese für den Regelalgorithmus verwenden zu können. Es wird so eine Art Schieberegister nachgebildet.



Abbildung 4-9: Aufbau des Speichers

**Parameterübergabe:**

Die Parameter werden über Constant-Blöcke eingegeben und an die Embedded MATLAB Function übergeben.

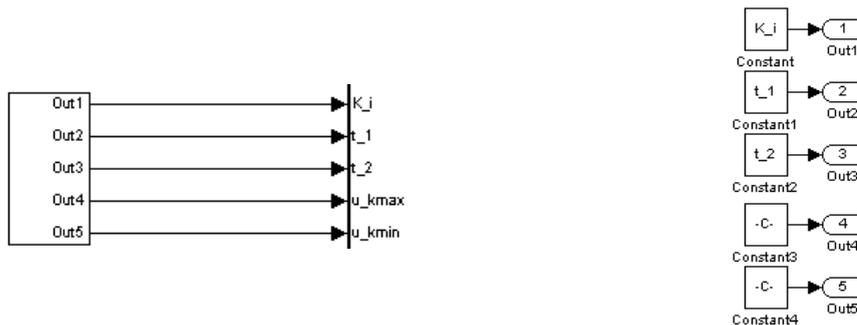


Abbildung 4-10: Aufbau des Subsystems zur Parameterübergabe

Bei Doppelklick in einen Constant-Block, kann entweder ein direkter Wert oder ein Variablenname eingetragen werden.

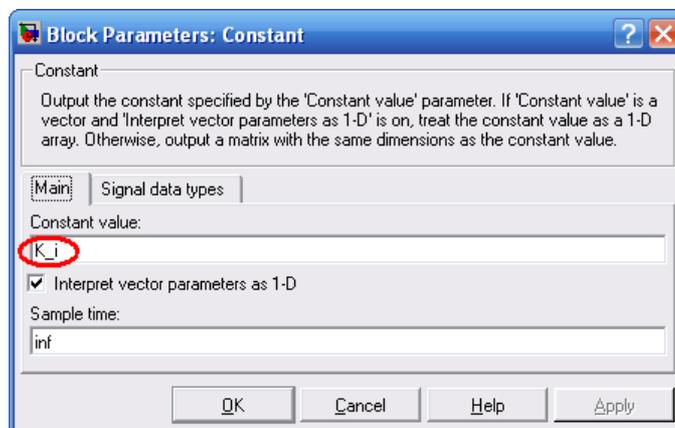


Abbildung 4-11: Dialogfenster zur Eingabe des Konstantenwertes

Durch Maskierung des Reglermodells können die Parameter auch über ein Dialogfenster übergeben werden. Dabei müssen die entsprechenden Variablennamen eingehalten werden.

#### 4.2.1 Regelung einer Strecke 2.Ordnung

##### Simulationsmodell in Simulink:

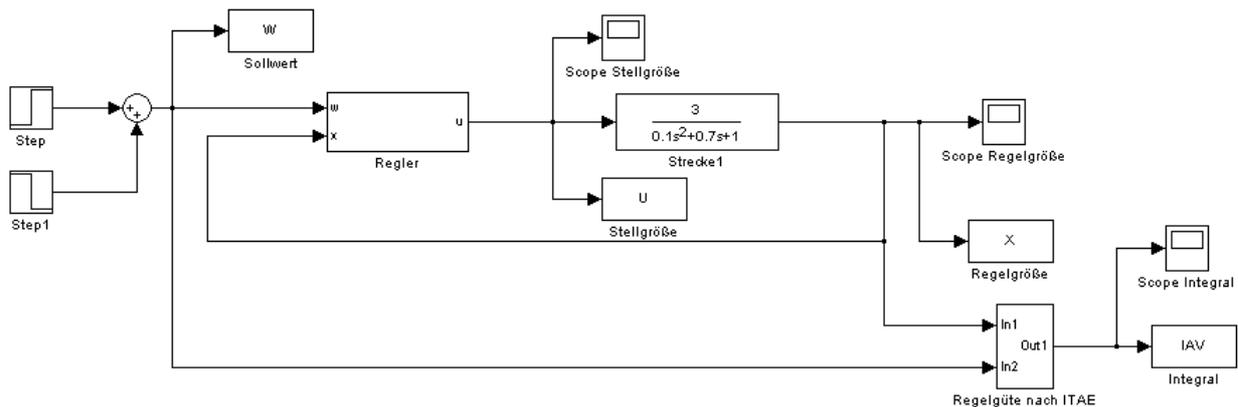


Abbildung 4-12: Simulationsmodell zur Regelung einer PT<sub>2</sub>-Strecke mit dem Regler nach Strategie 1

Das Simulationsmodell in Simulink entspricht dem Wirkschaltplan für den Regler, der nach Strategie 1 (Abtastzeitenverlängerung) arbeitet, für die Regelung einer PT<sub>2</sub>-Strecke.

Vor Simulationsstart müssen die Parameter eingegeben werden. Bei Doppelklick auf den Reglerblock erscheint ein Dialogfenster, in dem die Streckenparameter der PT<sub>2</sub>-Strecke und die Stellgrößenbegrenzungen eingegeben werden.

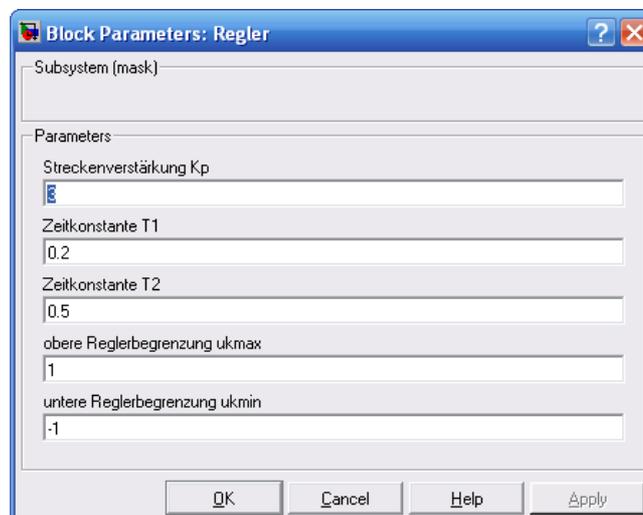


Abbildung 4-13: Eingabemaske des Subsystems zur Regelung einer PT<sub>2</sub>-Strecke nach Strategie 1

## 4.2.2 Regelung einer Strecke 3.Ordnung

### Simulationsmodell in Simulink:

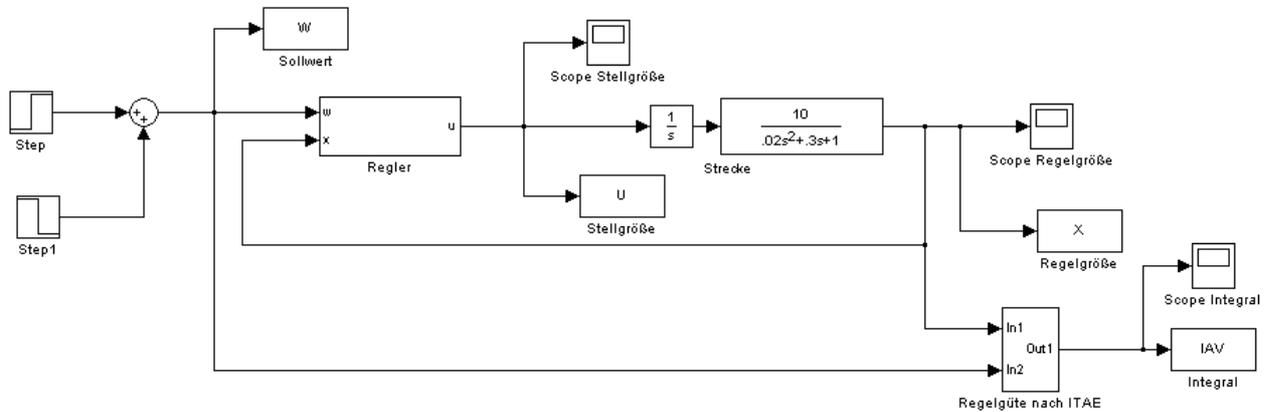


Abbildung 4-14: Simulationsmodell zur Regelung einer IT<sub>2</sub>-Strecke mit dem Regler nach Strategie 1

Das Simulationsmodell in Simulink entspricht dem Wirkschaltplan für den Regler, der nach Strategie 1 (Abtastzeitenverlängerung) arbeitet, für die Regelung einer IT<sub>2</sub>-Strecke.

Vor Simulationsstart müssen die Parameter eingegeben werden. Bei Doppelklick auf den Reglerblock erscheint ein Dialogfenster, in dem die Streckenparameter der IT<sub>2</sub>-Strecke und die Stellgrößenbegrenzungen eingegeben werden.

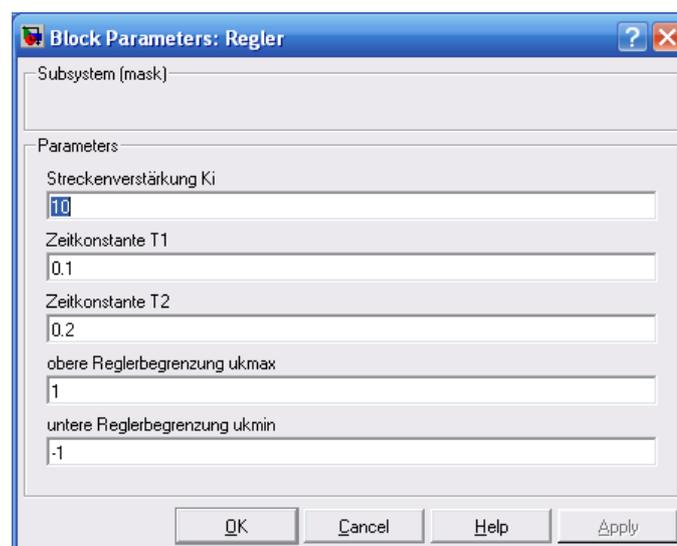


Abbildung 4-15: Eingabemaske des Subsystems zur Regelung einer IT<sub>2</sub>-Strecke nach Strategie 1

### 4.3 Umsetzung und Simulation der Strategie 2: Sollwertkorrektur

Wie bei dem Regler nach Strategie 1 wird der Regelalgorithmus in einer Embedded Matlab Function realisiert. Der Aufbau entspricht dem des Reglers nach Strategie 1. Der gesamte Regler besteht aus mehreren Ebenen. Der Embedded-Matlab-Function-Block wird über ein triggered Subsystem eingebunden, welches wiederum in ein weiteres Subsystem eingebunden ist. Der Unterschied besteht lediglich im Programmcode und in der Triggerung. Es gibt nur eine feste Abtastzeit.

Im Programmcode werden Korrekturen an den Regeldifferenzen gemacht und dann erst in das nachgestellte Schieberegister ausgegeben. (Grundlagen wurden bereits im Kap. 3.2 erläutert.)

#### 4.3.1 Regelung einer Strecke 2.Ordnung

##### Simulationsmodell in Simulink:

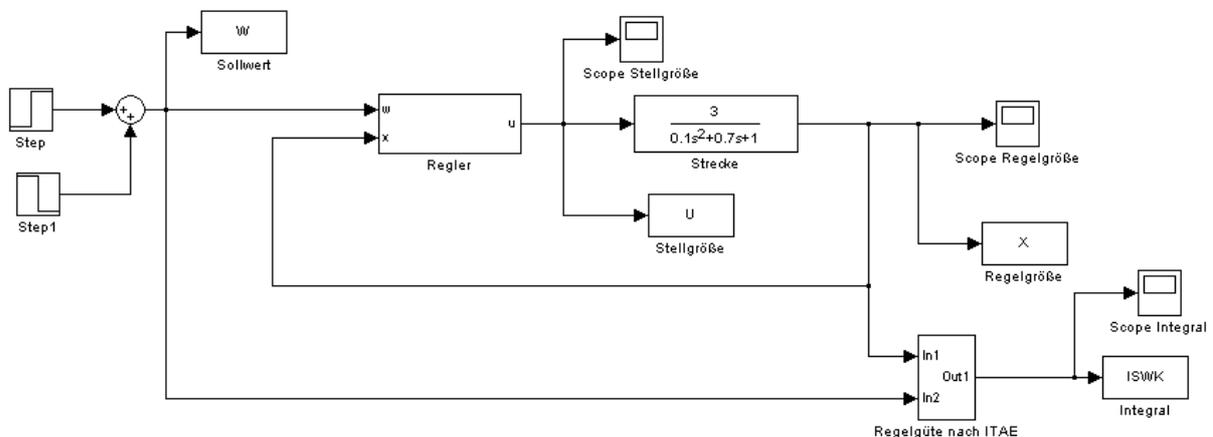


Abbildung 4-16: Simulationsmodell zur Regelung einer PT2-Strecke mit dem Regler nach Strategie 2

Das Simulationsmodell in Simulink entspricht dem Wirkschaltplan für den Regler, der nach Strategie 1 (Abtastzeitenverlängerung) arbeitet, für die Regelung einer PT2-Strecke.

Vor Simulationsstart müssen die Parameter eingegeben werden. Bei Doppelklick auf den Reglerblock erscheint ein Dialogfenster, in dem die Streckenparameter der PT2-Strecke und die Stellgrößenbegrenzungen eingegeben werden.

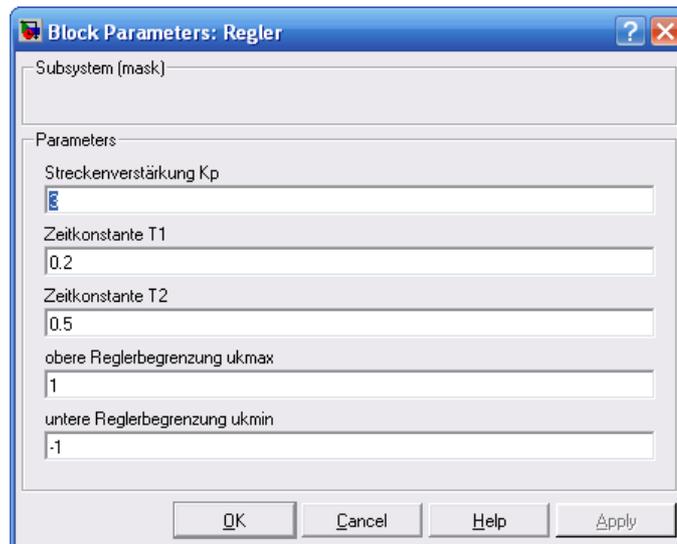


Abbildung 4-17: Eingabemaske des Subsystems zur Regelung einer PT<sub>2</sub>-Strecke nach Strategie 2

Wie bereits erwähnt, entspricht der Aufbau dieses Simulationsmodells dem Aufbau des Simulationsmodells mit dem Regler nach Strategie 1.

### 4.3.2 Regelung einer Strecke 3.Ordnung

#### Simulationsmodell in Simulink:

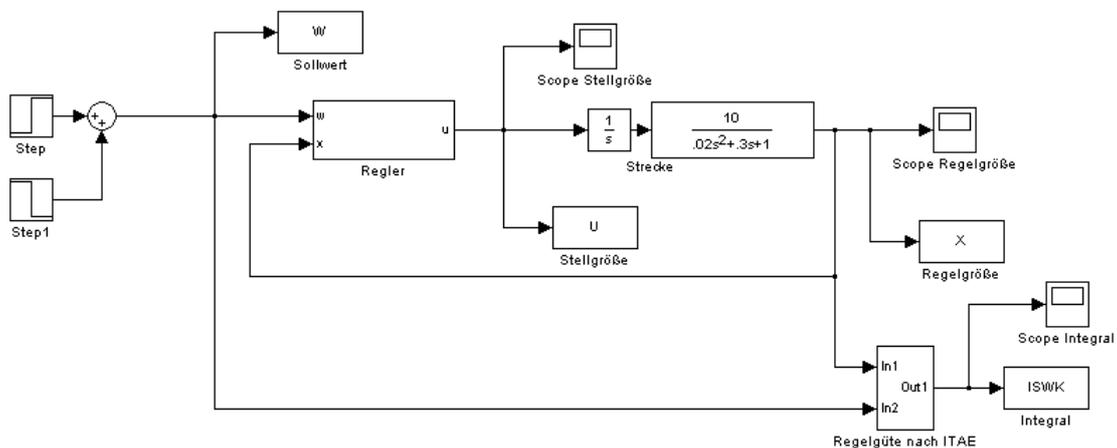


Abbildung 4-18: Simulationsmodell zur Regelung einer IT<sub>2</sub>-Strecke mit dem Regler nach Strategie 2

Das Simulationsmodell in Simulink entspricht dem Wirkschaltplan für den Regler, der nach Strategie 1 (Abtastzeitenverlängerung) arbeitet, für die Regelung einer IT<sub>2</sub>-Strecke.

Vor Simulationsstart müssen die Parameter eingegeben werden. Bei Doppelklick auf den Reglerblock erscheint ein Dialogfenster, in dem die Streckenparameter der IT<sub>2</sub>-Strecke und die Stellgrößenbegrenzungen eingegeben werden.

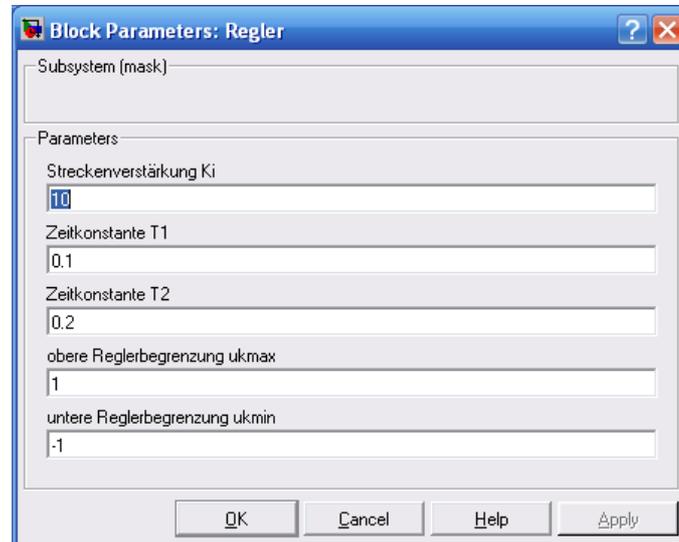


Abbildung 4-19: Eingabemaske des Subsystems zur Regelung einer IT<sub>2</sub>-Strecke nach Strategie 2

Wie schon erwähnt, entspricht der Aufbau dieses Simulationsmodells dem Aufbau des Simulationsmodells mit dem Regler nach Strategie 1.

#### 4.4 Umsetzung und Simulation der Strategie 3: Störgrößenregelung mit Korrekturglied

Wie beim Dead-Beat-Regler zur Führungsgrößenregelung besteht das Modell aus Standardblöcken der Simulink-Bibliothek. Nur die entsprechenden Reglerkoeffizienten und die benutzte Abtastzeit müssen eingetragen werden.

Folgende Abbildung zeigt den Regelkreis mit dem Störgrößenregler mit Korrekturglied als MATLAB/ Simulink-Modell.

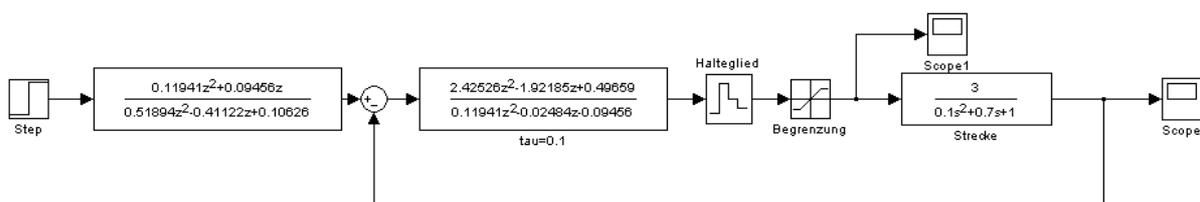
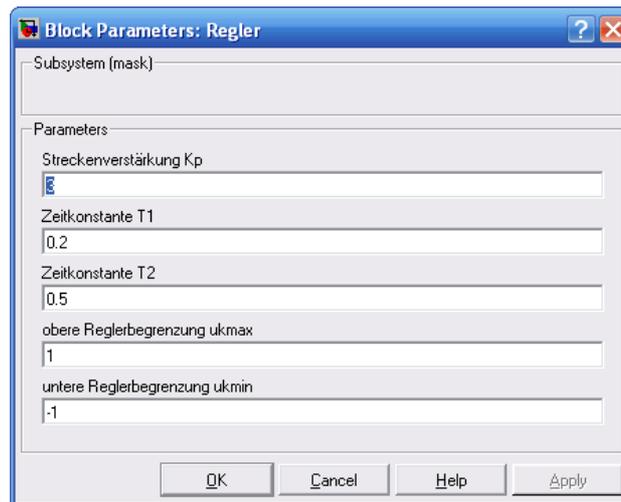


Abbildung 4-20: Regelkreis mit Dead-Beat-Regler für Störgrößen und Korrekturglied zur Regelung einer PT<sub>2</sub>-Strecke



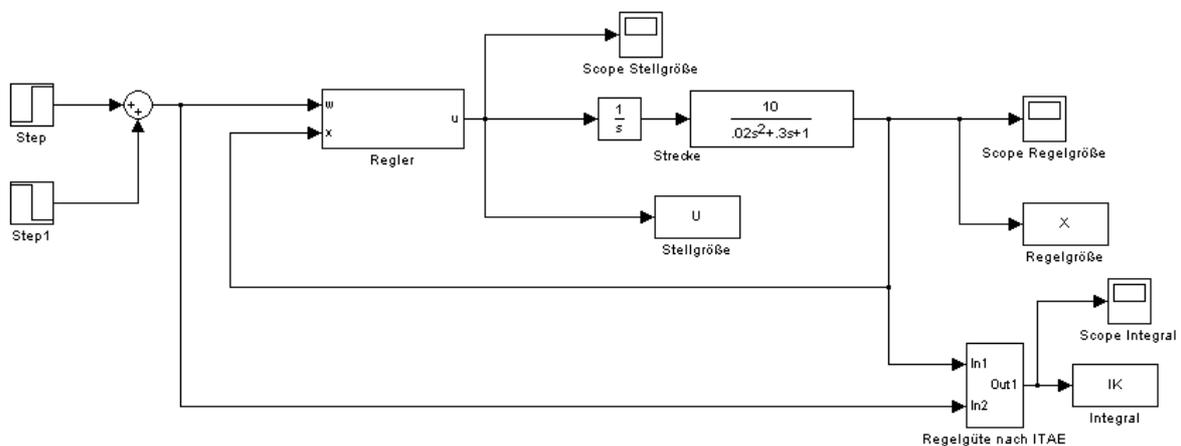


**Abbildung 4-22:** Eingabemaske des Subsystems zur Regelung einer  $PT_2$ -Strecke mit Kombinationsregler

Der Aufbau dieses Simulationsmodells ist identisch dem Aufbau des Simulationsmodells mit dem Regler nach Strategie 1 und Regler nach Strategie 2.

#### 4.5.2 Regelung einer Strecke 3.Ordnung

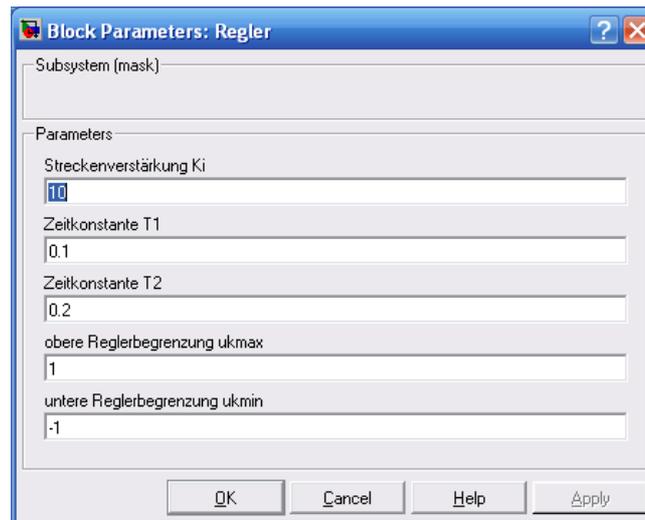
##### Simulationsmodell in Simulink:



**Abbildung 4-23:** Simulationsmodell zur Regelung einer  $IT_2$ -Strecke mit dem Kombinationsregler

Das Simulationsmodell in Simulink entspricht dem Wirkschaltplan für den Regler, der nach Strategie 1 (Abtastzeitenverlängerung) arbeitet, für die Regelung einer  $IT_2$ -Strecke.

Vor Simulationsstart müssen die Parameter eingegeben werden. Bei Doppelklick auf den Reglerblock erscheint ein Dialogfenster, in dem die Streckenparameter der  $IT_2$ -Strecke und die Stellgrößenbegrenzungen eingegeben werden.



**Abbildung 4-24:** Eingabemaske des Subsystems zur Regelung einer  $IT_2$ -Strecke mit Kombinationsregler

Der Aufbau dieses Simulationsmodells ist identisch dem Aufbau des Simulationsmodells mit dem Regler nach Strategie 1 und Regler nach Strategie 2.

## 5 Vergleich

Um die Regelverfahren miteinander zu vergleichen, werden unterschiedliche Fälle des Führungsverhaltens untersucht.

Außerdem werden die Regelgüten der Verfahren bestimmt. Dazu werden einfache Führungssprünge unterschiedlicher Höhe auf das Regelsystem gegeben.

Zur Ermittlung der Regelgüte wird das ITAE-Kriterium (engl.: **integral of time-multiplied absolute value of error**) als Kennwert benutzt. Das ITAE-Kriterium wird auch als **Zeitgewichtige Betragsregelfläche** bezeichnet. Es wird der Betrag der Regeldifferenz mit der Zeit  $t$  multipliziert und integriert.

$$\text{ITEA-Kriterium: } I = \int_0^{\infty} |e| \cdot t dt$$

Bei dieser Untersuchung wird das Integral über der Simulationszeit ( $t_s = 5.0\text{sec}$ ) gebildet.

$$I = \int_0^{t_s} |e| \cdot t dt$$

Durch die Multiplikation mit der Zeit werden Schwingungen mit kleiner Amplitude nach längerer Zeit stärker berücksichtigt und gewichtet. Je kleiner der Wert des ITAE-Kriterium, desto besser ist die Regelung.

(vgl. Lutz u. Wendt, 1998, S.368)

In MATLAB/ Simulink wird die Ermittlung durch folgenden Aufbau realisiert.

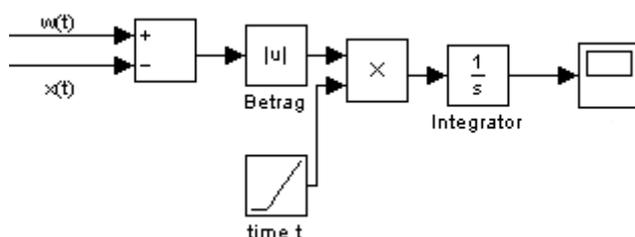


Abbildung 5-1: Aufbau zur Ermittlung des ITAE



Der Ramp-Block stellt ein rampenförmiges Signal her. Damit das Signal dem Wert der Zeit entspricht, wird die Steigung auf 1, die Startzeit auf 1, damit die Zeit erst beginnt sobald der erste Sprung stattfindet, und der Startwert auf null gestellt.

(vgl. Angerman/ Beuschel/ Rau/ Wohlfarth 2004, S 251)

## 5.1 Vergleich der stellgrößenbegrenzten Regler für Strecken mit $PT_2$ -Strecken bei dynamischer Führungsgröße

Die Untersuchung der Regler mit der  $PT_2$ -Strecke werden anhand eines System gemacht, welches eine Begrenzung von  $\pm 1$  aufweist, da bei einem  $PT_2$ -System für einen Führungssprung der stationäre Endwert der Stellgröße nicht Null ist. Um eine Sprunghöhe zu halten benötigt die Strecke eine konstante Stellgröße ungleich Null. Eine Begrenzung hat zu Folge, dass nicht jede absolute Sprunghöhe möglich ist. Je stärker die Begrenzung, desto niedrigere Sprünge können realisiert werden. Daher wird eine Begrenzung  $\pm 1$  zur Untersuchung gewählt und eine Anfangsabtastzeit von 0.1 sec benutzt.

### 5.1.1 Fall 1: Positive Sollwertänderung während der Regelung

Zunächst erfolgt aus der Ruhelage ein positiver Sollwertsprung von 0 auf 1 zum Zeitpunkt  $t = 1.0$  sec. Zum Zeitpunkt  $t = 1.5$  sec erfolgt der nächste Sollwertsprung von 1 auf 2.

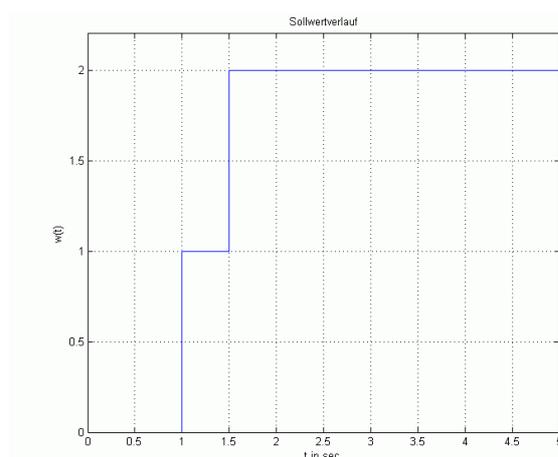
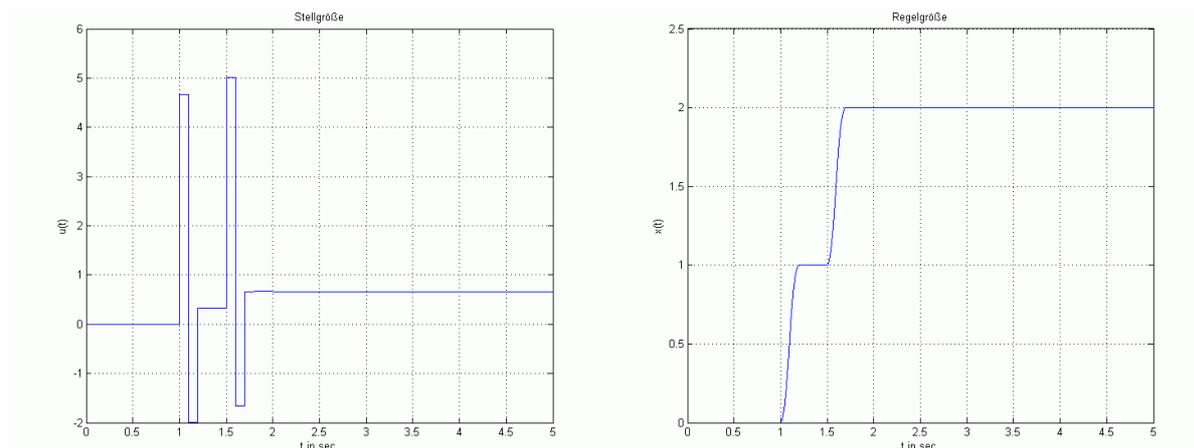


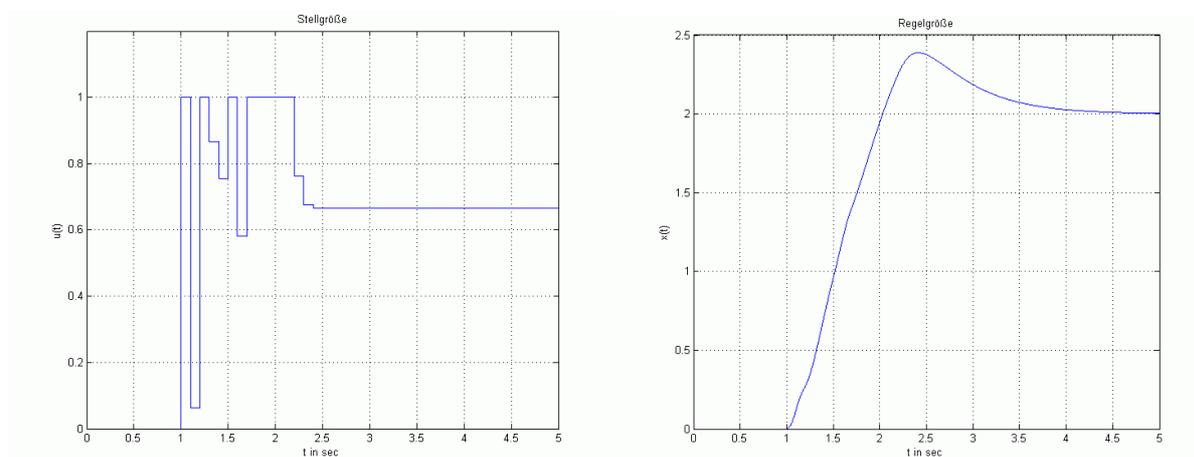
Abbildung 5-2: Positive Sollwertänderung von 1 auf 2

Ist der Regler nicht begrenzt, wird der erste Sprung so schnell ausgeregelt, so dass der zweite Sprung während einer Ruhelage stattfindet. Es sind zwei Überführungsvorgänge, wobei das System von einer Ruhelage in eine andere Ruhelage überführt wird.



**Abbildung 5-3: Stell- und Regelgrößenverlauf bei positiver Sollwertänderung mit Dead-Beat-Regler ohne Begrenzung**

Ist der Regler auf  $\pm 1$  begrenzt sehen die Verläufe der stell- und Führungsgröße wie folgt aus.

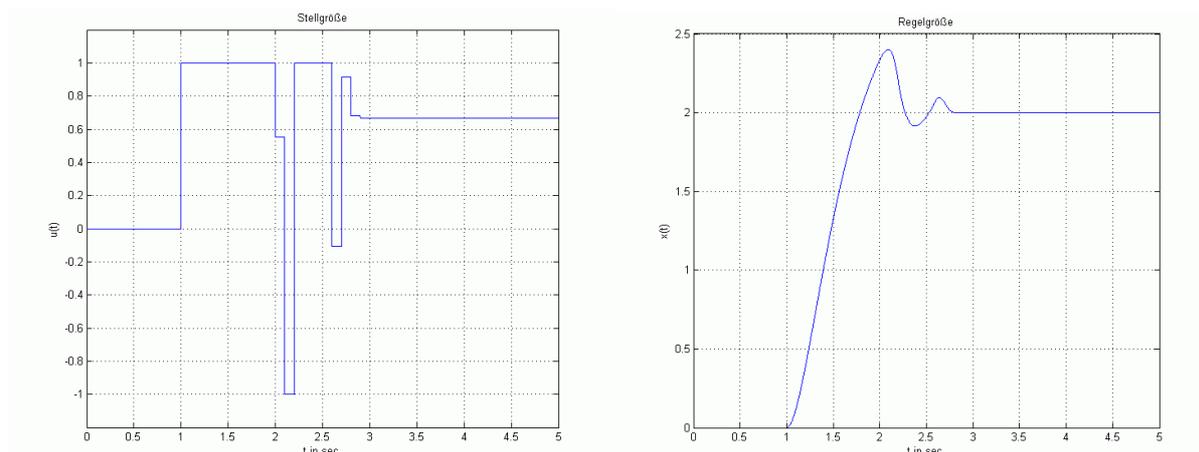


**Abbildung 5-4: Stell- und Regelgrößenverlauf bei positiver Sollwertänderung mit Dead-Beat-Regler mit Begrenzung von  $\pm 1$**

Während des ersten Sprungs kommt es bereits zu einer Übersteuerung, was sich an einem kleinen Knick im Regelgrößenverlauf zeigt. Nachdem der zweite Sprung erfolgt kommt es zu einem Überschwinger, welcher sich zum Ende der Simulationszeit noch nicht ausgeglet hat.

### **Stellgrößenbegrenzter Dead-Beat-Regler nach Strategie 3:**

Durch den Dead-Beat-Regler für Störgrößen ergeben sich beim Regelgrößenverlauf mehrere Überschwinger.

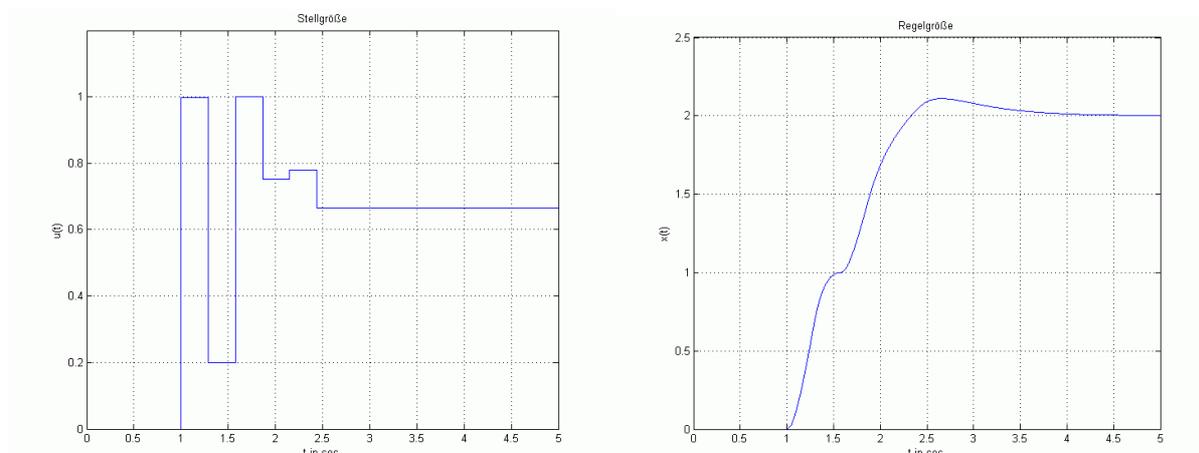


**Abbildung 5-5: Stell- und Regelgrößenverlauf bei positiver Sollwertänderung mit Dead-Beat-Regler für Störgrößen mit Begrenzung von  $\pm 1$**

Die Steigung des Regelgrößenverlaufs ist während der ersten Sollwertaufschaltung sehr groß, so dass die Regelgröße früh den ersten Sollwert annimmt. Die Regelgröße übersteigt den ersten Sollwert und bevor der zweite Sollwert aufgeschaltet wird, ist die Regeldifferenz bereits kleiner als der dann zu erreichende zweite Sollwert. Der zweite Sollwert wird auch durch die große Steigung schnell erreicht. Es kommt zu drei Überschwingern, deren Steigungen ebenfalls groß sind. Die Regelung ist nach 1.9 sec abgeschlossen.

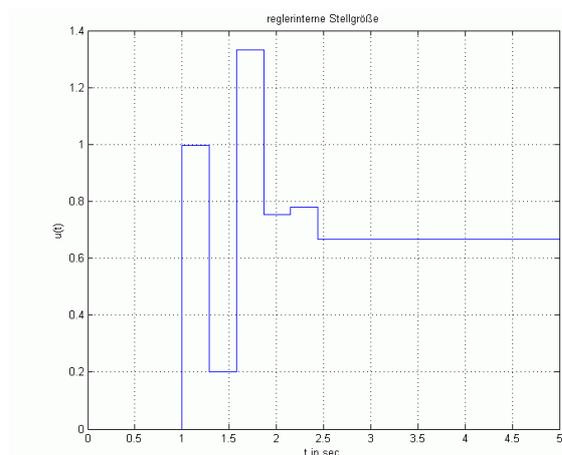
### Stellgrößenbegrenzter Dead-Beat-Regler nach Strategie 1:

Wird das Regelverfahren der Abtastzeitenänderung gewählt, wird die Abtastzeit auf  $t_{neu} = 0.288$  verlängert. Der zweite Sprung erfolgt erst zum Zeitpunkt  $t = 1.576$  sec. Die Regelung ist noch nicht abgeschlossen und die verlängerte Abtastzeit wird beibehalten.



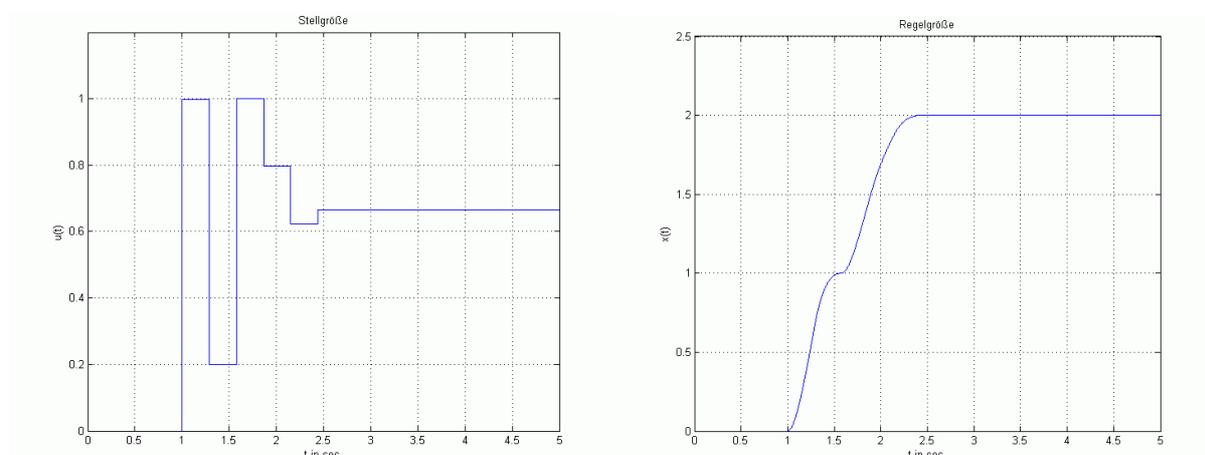
**Abbildung 5-6: Stell- und Regelgrößenverlauf bei positiver Sollwertänderung mit Regler nach Strategie 1 mit Begrenzung von  $\pm 1$**

Bei dem zweiten Sprung kommt es zur Übersteuerung, wie auf dem reglerinternen Stellgrößenverlauf zu erkennen ist.



**Abbildung 5-7: Reglerinterner Stellgrößenverlauf bei positiver Sollwertänderung mit Regler nach Strategie 1 mit einer Begrenzung von  $\pm 1$**

Da sich das System nicht in Ruhe befand, kann die Abtastzeit nicht noch mal verlängert werden. Das System kann nicht mit endlicher Einstellzeit ausgeregelt werden. Um dieses Übersteuern zu vermeiden, arbeitet der **Kombinationsregler** bei einer zu großen Stellgröße, nachdem bereits die Abtastzeit verlängert wurde, mit der Sollwertkorrektur.

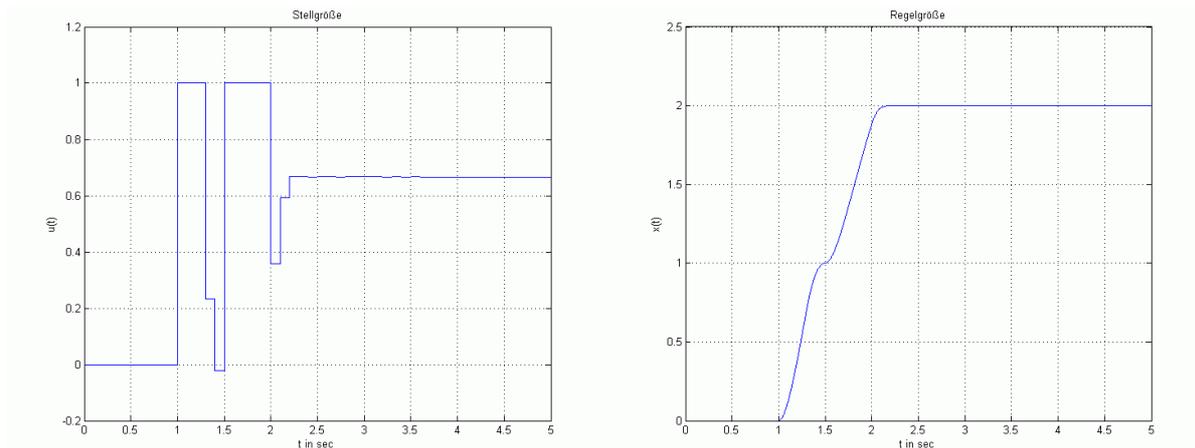


**Abbildung 5-8: Stell- und Regelgrößenverlauf bei positiver Sollwertänderung mit Kombinationsregler mit Begrenzung von  $\pm 1$**

Durch die anschließende Sollwertkorrektur kann das System insgesamt schwingungsfrei und in 1,44 sec ausgeregelt werden. Das Regelsystem weist Dead-Beat-Verhalten auf.

### Stellgrößenbegrenzter Dead-Beat-Regler nach Strategie 2:

Arbeitet der Regler nur mit der Sollwertkorrektur wird diese sofort registriert. Der Regler kann schneller auf den zweiten Sprung reagieren.

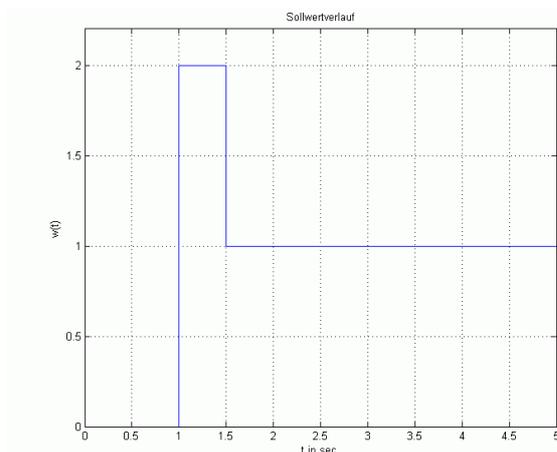


**Abbildung 5-9: Stell- und Regelgrößenverlauf bei positiver Sollwertänderung mit Regler nach Strategie 2 mit Begrenzung von  $\pm 1$**

Auch dieses Regelverhalten weist Dead-Beat-Verhalten auf. Das System wird in zwölf Abtastschritten ausgeregelt, so dass nach insgesamt 1.2 sec die Regelabweichung komplett beseitigt wird.

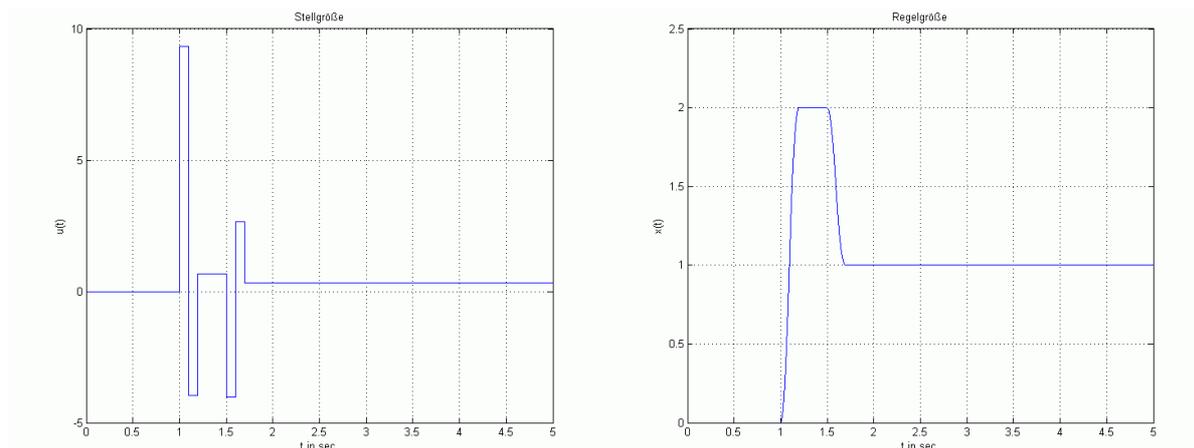
### 5.1.2 Fall 2: Negative Sollwertänderung während der Regelung

Zunächst erfolgt aus der Ruhelage ein positiver Sollwertsprung von 0 auf 2 zum Zeitpunkt  $t = 1.0$  sec. Zum Zeitpunkt  $t = 1.5$  sec erfolgt der nächste Sollwertsprung von 2 auf 1.



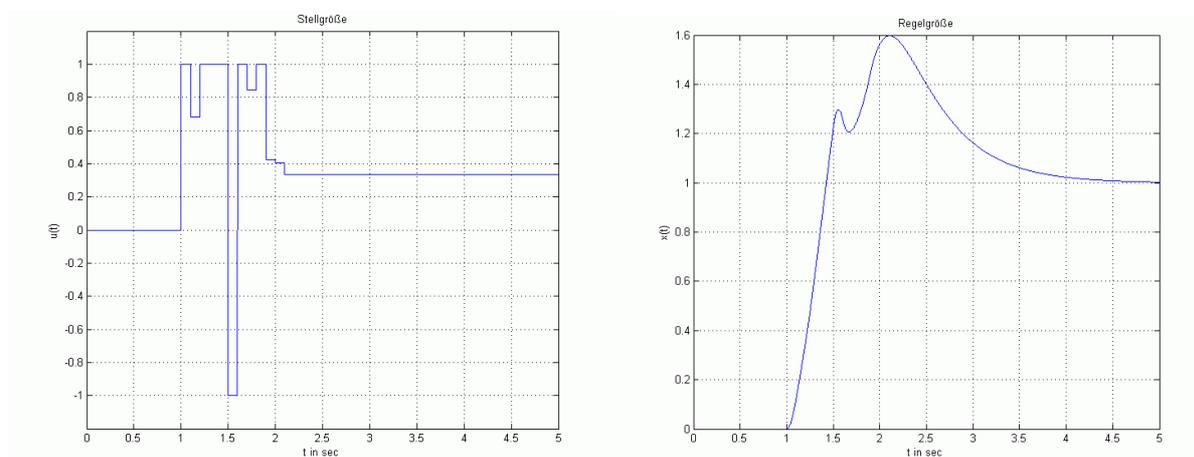
**Abbildung 5-10: Negative Sollwertänderung von 2 auf 1**

Ist der Regler nicht begrenzt, wird der erste Sprung so schnell ausgeregelt, so dass der zweite Sprung während einer Ruhelage stattfindet. Es sind zwei Überführungsvorgänge, wobei das System von einer Ruhelage in eine andere Ruhelage überführt wird.



**Abbildung 5-11: Stell- und Regelgrößenverlauf bei negativer Sollwertänderung mit Dead-Beat-Regler ohne Begrenzung**

Ist der Regler auf  $\pm 1$  begrenzt sehen die Verläufe der stell- und Führungsgröße wie folgt aus.

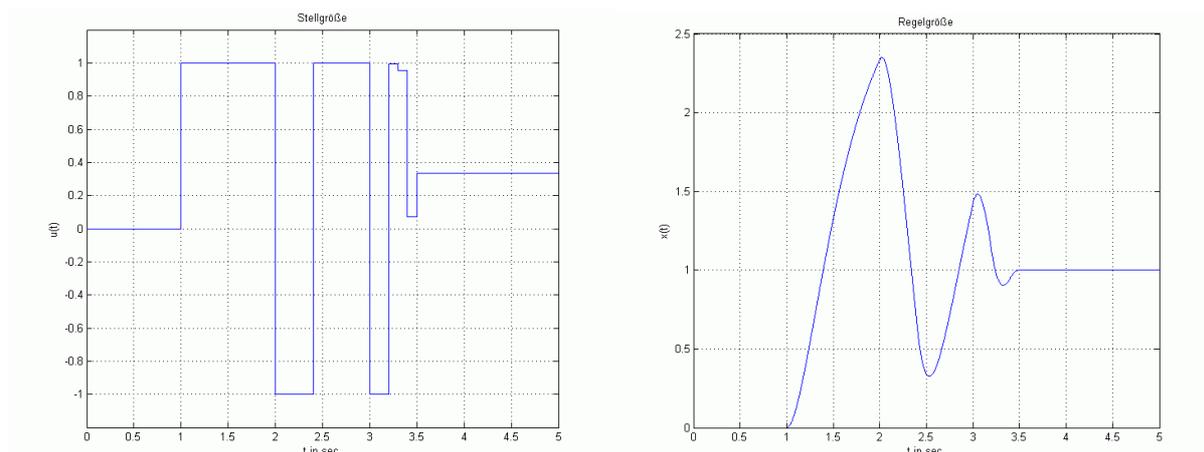


**Abbildung 5-12: Stell- und Regelgrößenverlauf bei negativer Sollwertänderung mit Dead-Beat-Regler mit Begrenzung von  $\pm 1$**

Es kommt während des ersten Sollwertsprunges bereits zur Übersteuerung. Das System wird mit der Dynamik der Strecke ausgeregelt.

### Stellgrößenbegrenzter Dead-Beat-Regler nach Strategie 3:

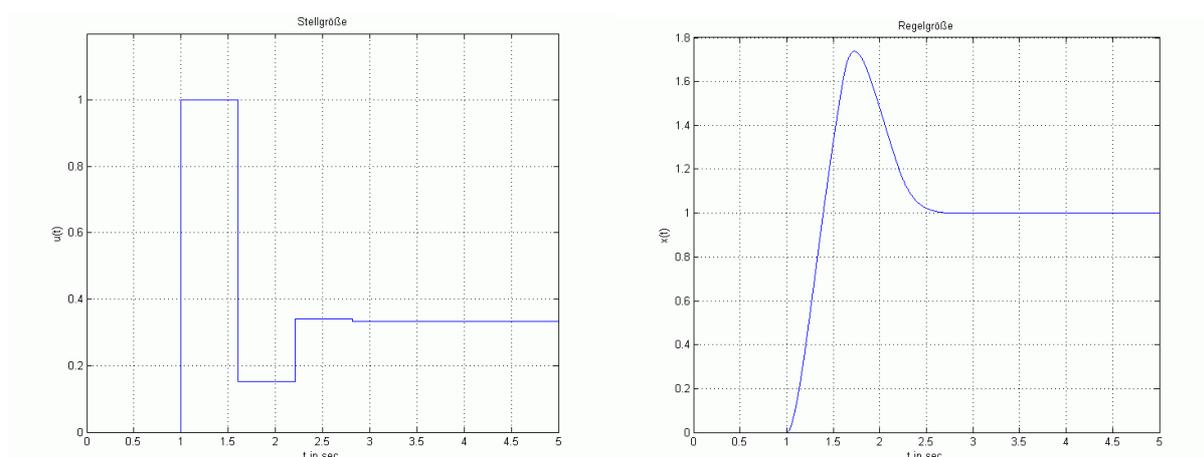
Bei dem Dead-Beat-Regler für Störgrößen ergeben sich beim Regelgrößenverlauf mehrere hohe Überschwinger. Das liegt daran, dass das Regelsystem mit einer hohen Steigung auf den ersten Sollwert geregelt wird. Der anschließende negative Sprung bewirkt auch eine große negative Steigung, so dass vier Überschwinger entstehen. Erst zum Zeitpunkt  $t = 3.5$  sec ist die Regeldifferenz beseitigt. Das System wird aber in endlicher Zeit ausgeregelt.



**Abbildung 5-13:** Stell- und Regelgrößenverlauf bei negativer Sollwertänderung mit Dead-Beat-Regler für Störgrößen mit Begrenzung von  $\pm 1$

### Stellgrößenbegrenzter Dead-Beat-Regler nach Strategie 1:

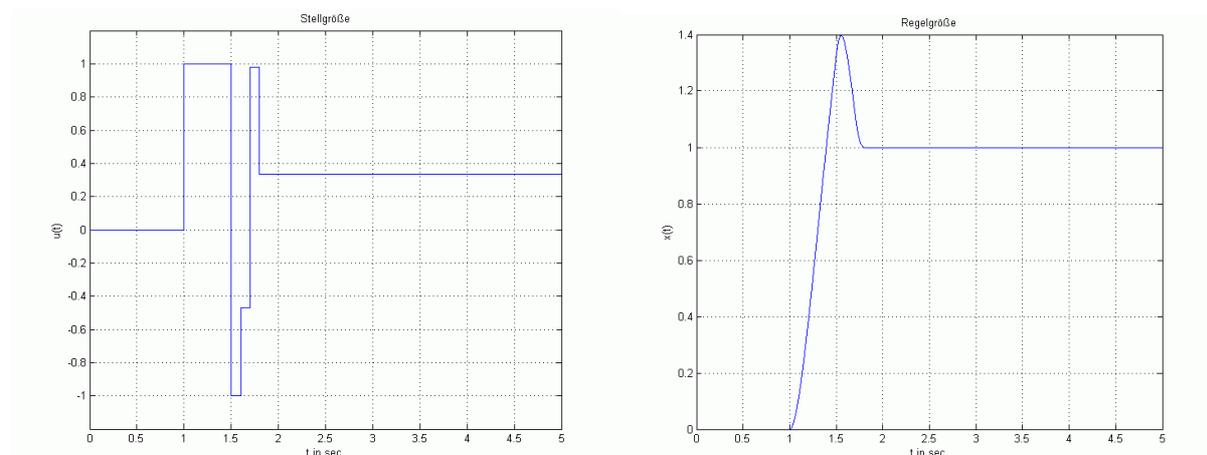
Wird das Regelverfahren der Abtastzeitenänderung gewählt, wird die Abtastzeit auf  $t_{neu} = 0.604$  verlängert. Der zweite Sprung erfolgt zum Zeitpunkt  $t = 1.604$  sec, also nach dem ersten Abtastschritt. Da die Regelung noch nicht abgeschlossen ist und das System nicht in Ruhe ist, wird die Abtastzeit beibehalten. Der Regler benötigt nach dem zweiten Sollwertsprung zwei Abtastschritte, um den zweiten Sollwert zu erreichen. Da es nach der Sollwertänderung nicht zu einer weiteren Übersteuerung kommt, muss bei dem Kombinationsregler nicht noch die Strategie 2 gefahren werden, so dass die Regelung mit der Abtastzeitenverlängerung und die Regelung mit dem **Kombinationsregler** in diesem Fall identisch aussehen.



**Abbildung 5-14:** Stell- und Regelgrößenverlauf bei negativer Sollwertänderung mit Regler nach Strategie 1 mit Begrenzung von  $\pm 1$

### Stellgrößenbegrenzter Dead-Beat-Regler nach Strategie 2:

Wird die Abtastzeit nicht verlängert, sondern nur der Sollwert entsprechend korrigiert, ergeben sich folgende Stell- und Regelgrößenverläufe.

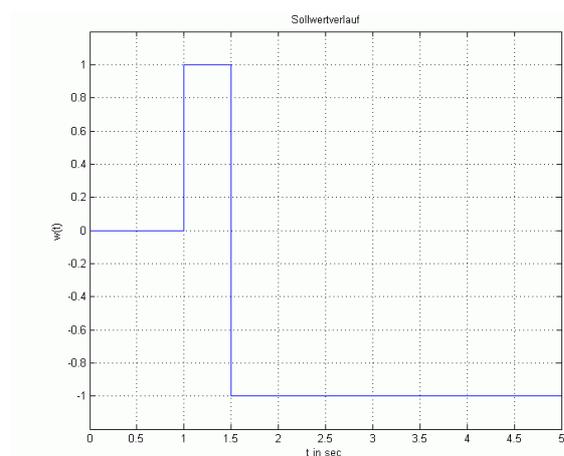


**Abbildung 5-15: Stell- und Regelgrößenverlauf bei negativer Sollwertänderung mit Regler nach Strategie 2 mit Begrenzung von  $\pm 1$**

Eine Sollwertänderung wird im Regler sofort registriert und der Regler kann dementsprechend schnell reagieren, so dass der neue Sollwert in bereits 0.3 sec erreicht wird. Das System wird schwingungsfrei in die Ruhelage überführt.

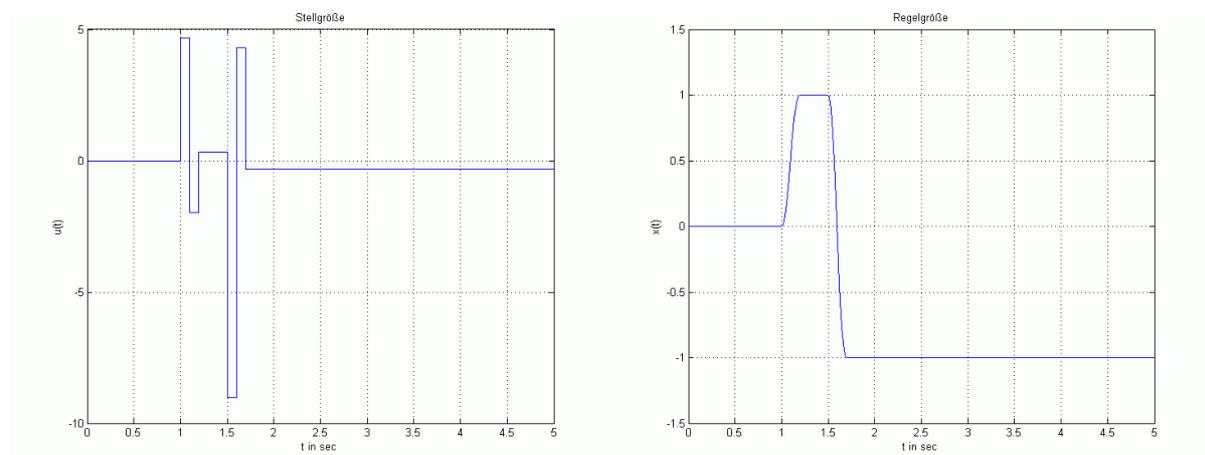
### 5.1.3 Fall 3: Vorzeichenwechsel des Sollwertes während einer Regelung

Zunächst erfolgt aus der Ruhelage ein positiver Sollwertsprung von 0 auf 1 zum Zeitpunkt  $t = 1.0$  sec. Zum Zeitpunkt  $t = 1.5$  sec erfolgt ein Sprung der Höhe -2, so dass der Sollwert sein Vorzeichen ändert.



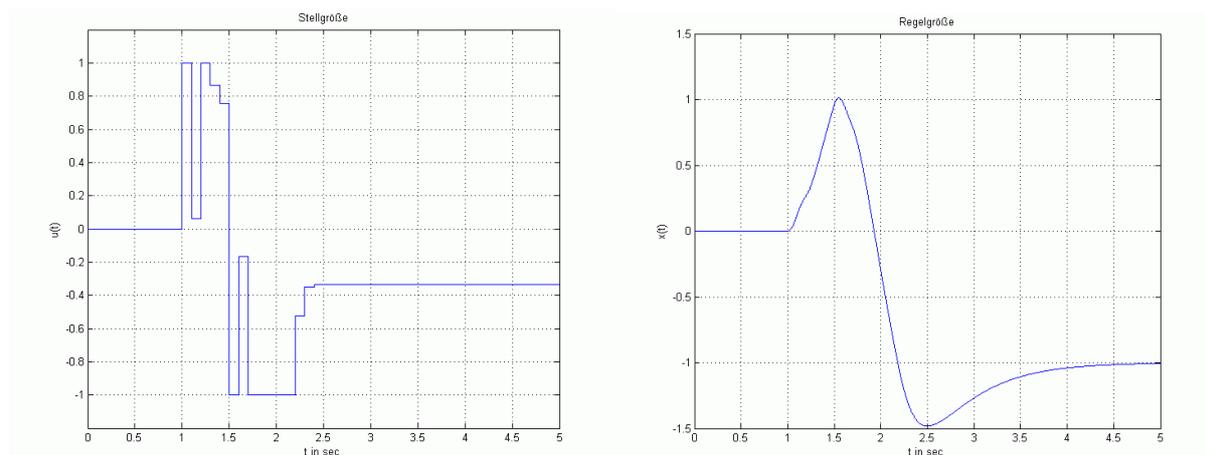
**Abbildung 5-16: Vorzeichenwechsel des Sollwertes von 1 auf -1**

Ist der Regler nicht begrenzt, wird der erste Sprung so schnell ausgeregelt, dass der zweite Sprung während einer Ruhelage stattfindet. Es erfolgen zwei Überföhrungsvorgänge, wobei das System von einer Ruhelage in eine andere Ruhelage überföhrt wird.



**Abbildung 5-17: Stell- und Regelgrößenverlauf bei Vorzeichenwechsel des Sollwertes mit Dead-Beat-Regler ohne Begrenzung**

Ist der Regler auf  $\pm 1$  begrenzt sehen die Verläufe der stell- und Föhrungsgröße wie folgt aus.



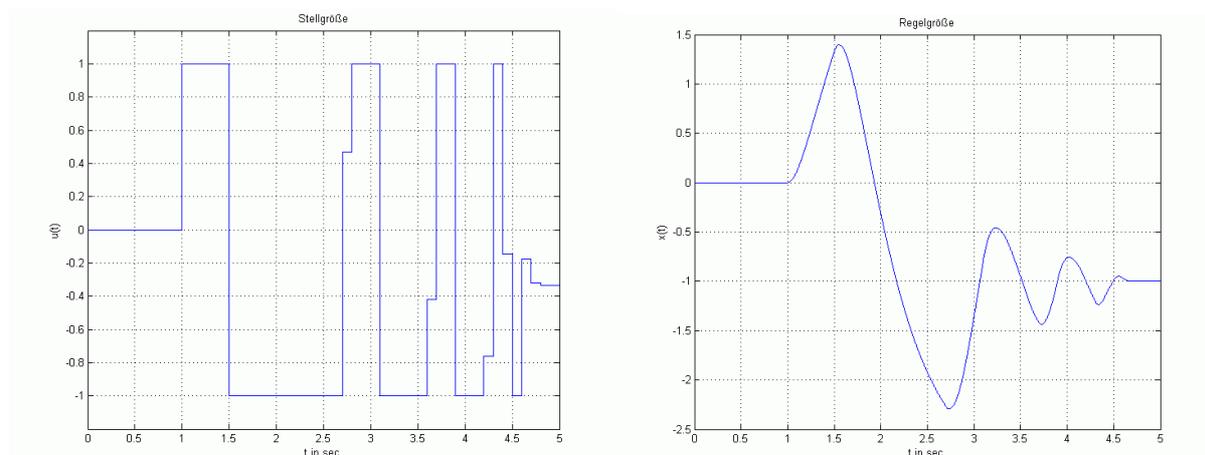
**Abbildung 5-18: Stell- und Regelgrößenverlauf bei Vorzeichenwechsel des Sollwertes mit Dead-Beat-Regler mit Begrenzung von  $\pm 1$**

Es kommt bereits während des ersten Sollwertesprunges zur Übersteuerung. Das System wird mit der Dynamik der Strecke ausgeregelt.

### Stellgrößenbegrenzter Dead-Beat-Regler nach Strategie 3:

Nachdem die Sollwertänderung registriert ist, muss der Regelverlauf eigentlich stark gebremst werden. Die benötigte Amplitude kann aufgrund der Begrenzung jedoch nicht erreicht werden, so dass der Betrag der negativen Steigung nicht so groß ist, wie die positive Steigung

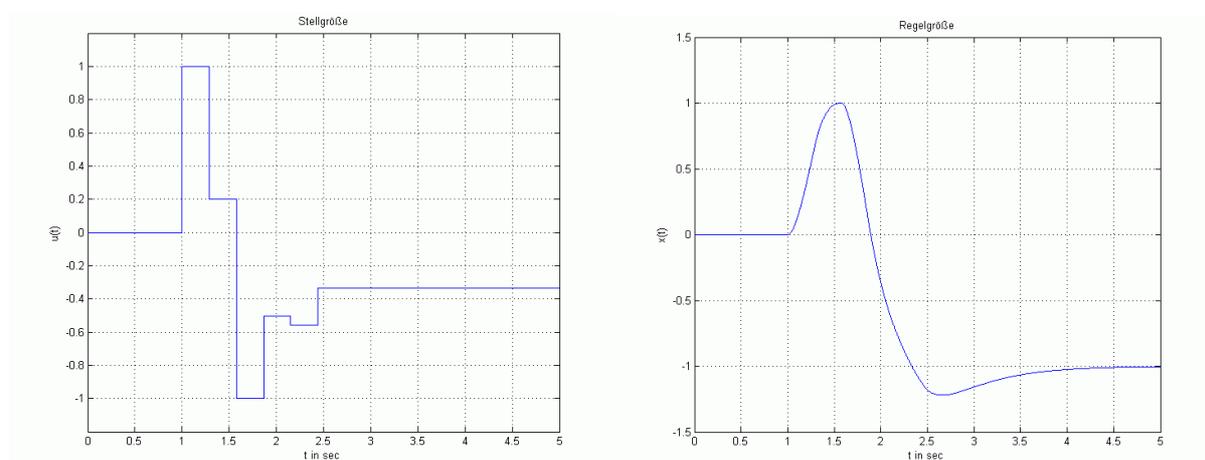
vor der Sollwertänderung. Es kommt nach der Sollwertänderung zu sechs Überschwingern. Das System ist zum Zeitpunkt  $t = 4.7$  sec ausgeglet.



**Abbildung 5-19:** Stell- und Regelgrößenverlauf bei Vorzeichenwechsel des Sollwertes mit Dead-Beat-Regler für Störgrößen mit Begrenzung von  $\pm 1$

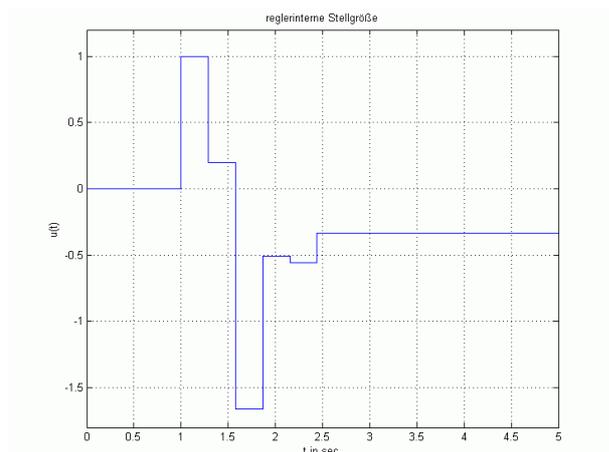
### Stellgrößenbegrenzter Dead-Beat-Regler nach Strategie 1:

Wird das Regelverfahren der Abtastzeitenänderung gewählt, wird die Abtastzeit auf  $t_{neu} = 0.288$  verlängert. Der zweite Sprung wird erst zum Zeitpunkt  $t = 1.576$  sec ausgeführt. Die Regelung ist noch nicht abgeschlossen und die verlängerte Abtastzeit wird beibehalten.



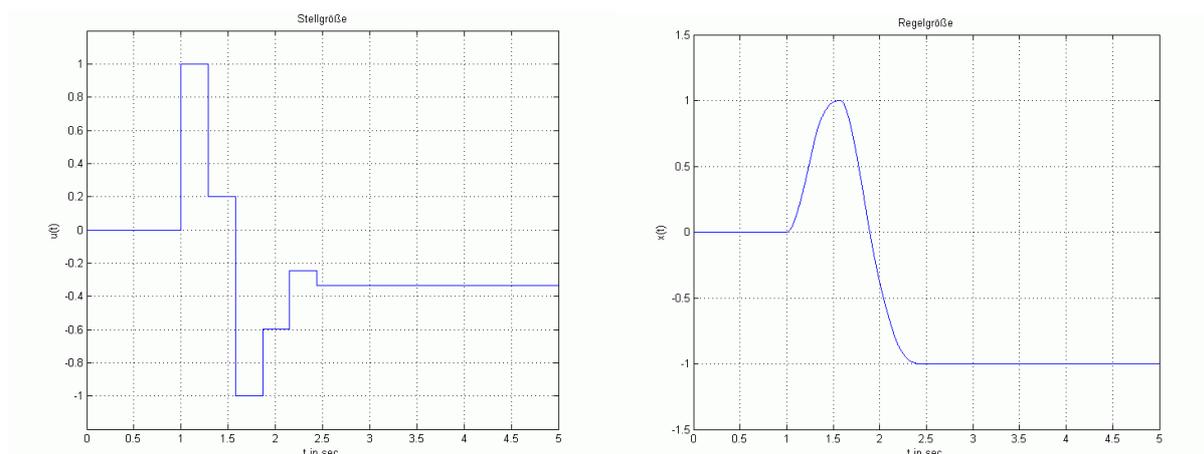
**Abbildung 5-20:** Stell- und Regelgrößenverlauf bei Vorzeichenwechsel des Sollwertes mit Regler nach Strategie 1 mit Begrenzung von  $\pm 1$

Bei dem zweiten Sprung kommt es zur Übersteuerung, wie auf dem reglerinternen Stellgrößenverlauf zu erkennen ist.



**Abbildung 5-21: Reglerinterner Stellgrößenverlauf bei Vorzeichenwechsel des Sollwertes mit Regler nach Strategie 1 mit Begrenzung von  $\pm 1$**

Da das System sich nicht in Ruhe befand, kann die Abtastzeit nicht noch mal verlängert werden. Das System kann nicht mit endlicher Einstellzeit ausgeregelt werden. Um dieses Übersteuern zu vermeiden, arbeitet der **Kombinationsregler** bei einer zu großen Stellgröße, nachdem bereits die Abtastzeit verlängert wurde, mit der Sollwertkorrektur.

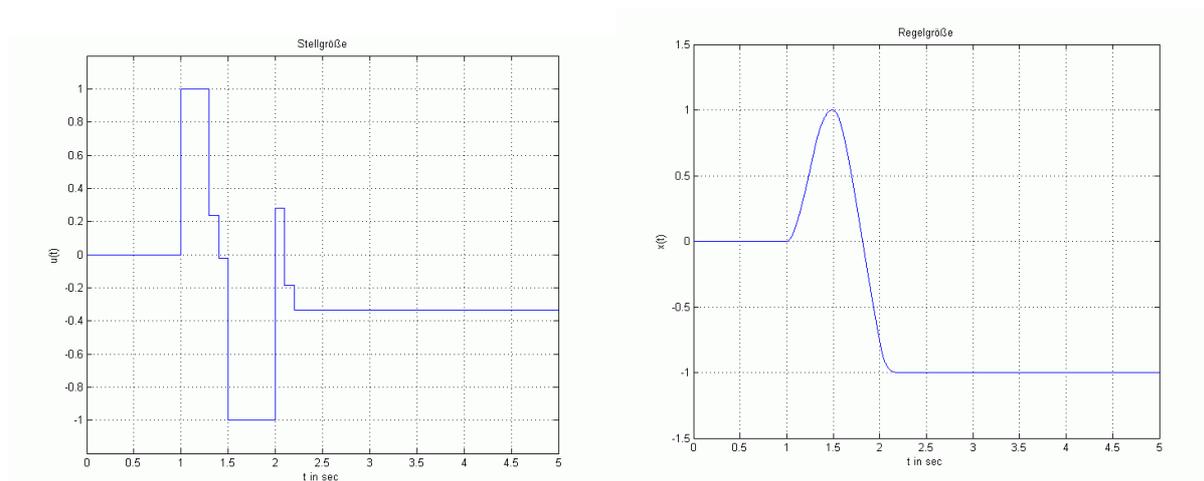


**Abbildung 5-22: Stell- und Regelgrößenverlauf bei Vorzeichenwechsel des Sollwertes mit Kombinationsregler mit Begrenzung von  $\pm 1$**

Durch die anschließende Sollwertkorrektur kann das System insgesamt schwingungsfrei und in 1.44 sec ausgeregelt werden. Das Regelsystem weist Dead-Beat-Verhalten auf.

### Stellgrößenbegrenzter Dead-Beat-Regler nach Strategie 2:

Arbeitet der Regler nur mit der Sollwertkorrektur wird die Sollwertkorrektur sofort registriert. Der Regler kann schneller auf den zweiten Sprung reagieren.



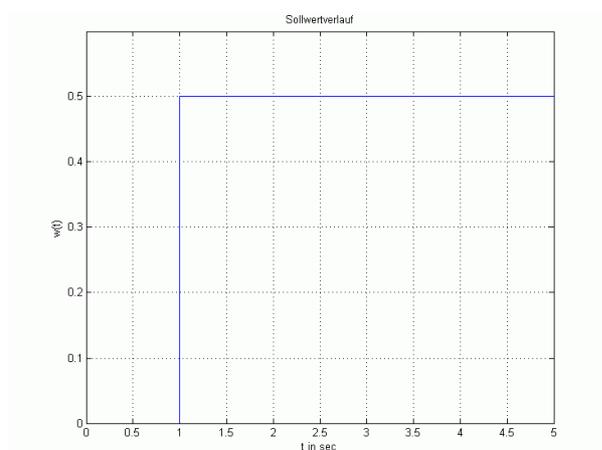
**Abbildung 5-23: Stell- und Regelgrößenverlauf bei Vorzeichenwechsel des Sollwertes mit Regler nach Strategie 2 mit Begrenzung von  $\pm 1$**

Auch dieses Regelverhalten weist Dead-Beat-Verhalten auf. Das System wird in zwölf Abtastschritten ausgeregelt, so dass nach insgesamt 1.2 sec die Regelabweichung komplett beseitigt wird.

## 5.2 Vergleich der Regelgüte eines System mit einer $PT_2$ -Strecke anhand des Führungsverhalten für verschiedene feste Führungsgrößen

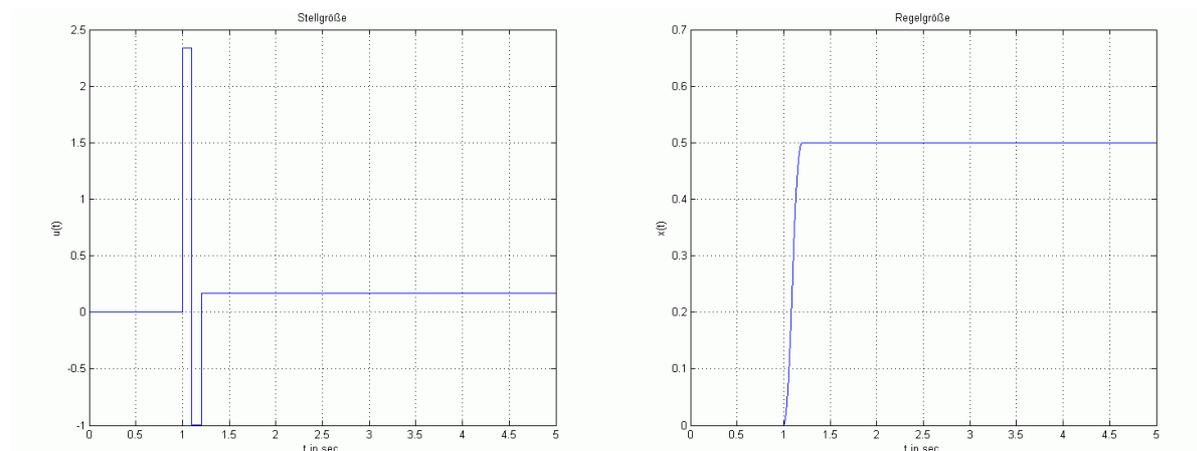
Es werden für vier Führungssprunghöhen die Regelgüten der Regelverfahren ermittelt und diese direkt in einem Diagramm über die Simulationszeit aufgezeigt.

Zum Zeitpunkt  $t = 1.0$  sec wird ein Sprung der Höhe **0.5** auf das System gegeben.



**Abbildung 5-24: Einfacher Sprung von 0 auf 0.5**

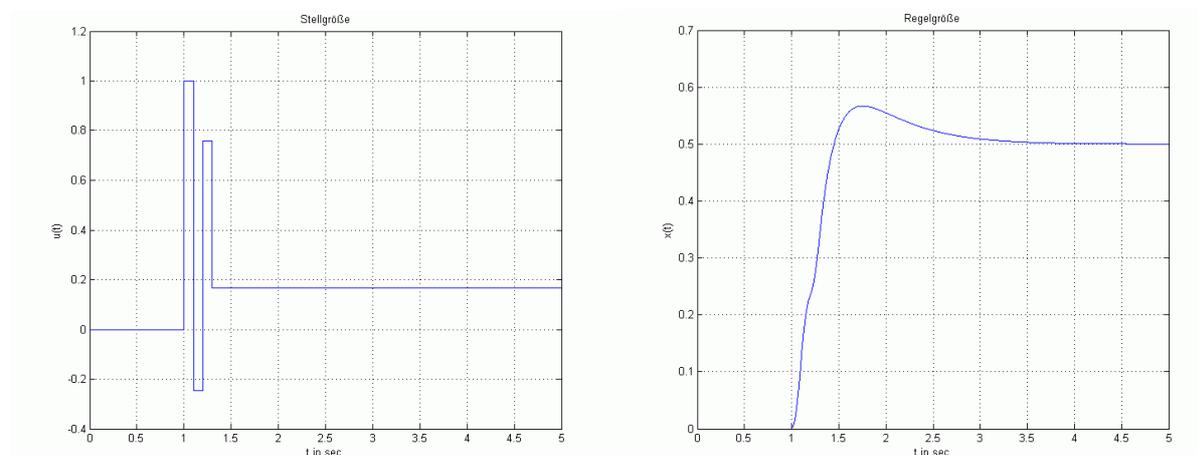
Für einen Dead-Beat-Regler für Führungsgrößen ohne begrenzte Stellgröße ergibt sich folgender Stell- und Regelgrößenverlauf.



**Abbildung 5-25:** Stell- und Regelgrößenverlauf mit Dead-Beat-Regler ohne Begrenzung bei einem Sprung der Höhe 0.5

Die erste Stellamplitude beträgt 2.337. Für diese Sprunghöhe ist die Begrenzung von  $\pm 1$  schwach bis mittel.

### Begrenzter Dead-Beat-Regler:

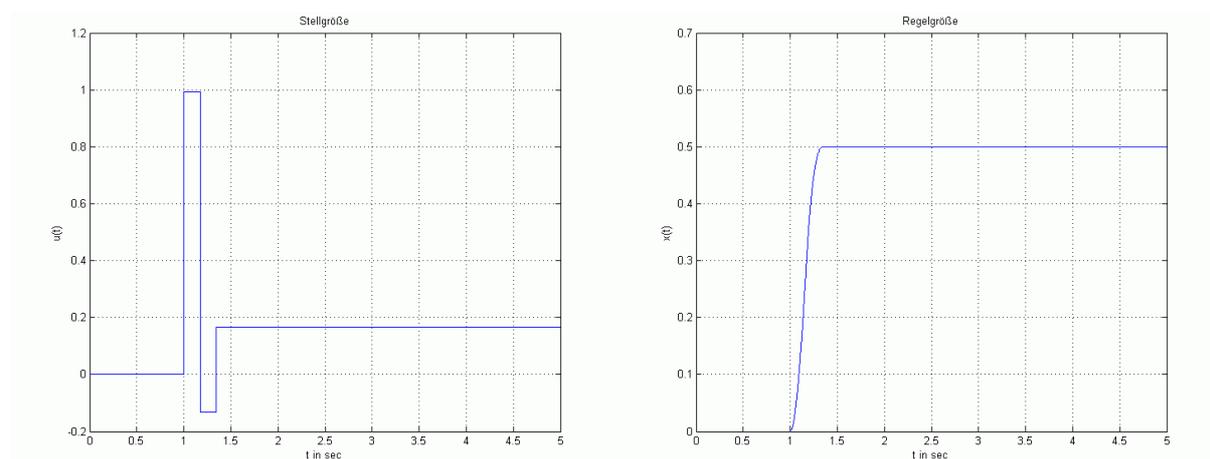


**Abbildung 5-26:** Stell- und Regelgrößenverlauf mit Dead-Beat-Regler mit Begrenzung von  $\pm 1$  bei einem Sprung der Höhe 0.5

Durch die Begrenzung schwingt das System einmal über und der Überschwinger wird anschließend mit der Dynamik der Strecke ausgeregelt. Die Regelung wird nur sehr langsam ausgeregelt.

### Stellgrößenbegrenzter Dead-Beat-Regler nach Strategie 1:

Arbeitet der Regler nach Strategie 1 verlängert sich die Abtastzeit auf  $t_{neu} = 0.172$ , um die Stellamplitude innerhalb der Begrenzung zu halten. Der Regelverlauf des Kombinationsreglers und des Reglers nach Strategie 1 entsprechen einander.

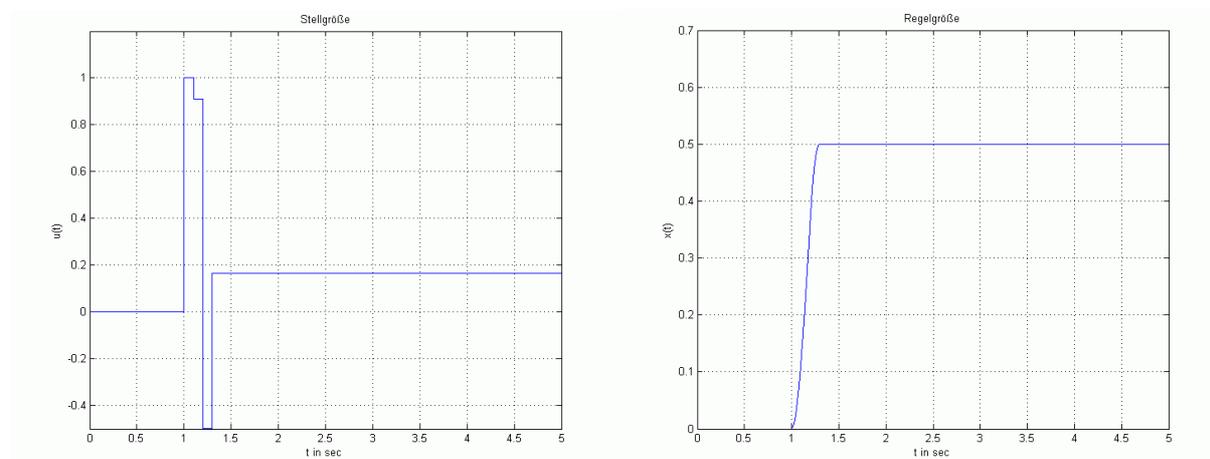


**Abbildung 5-27: Stell- und Regelgrößenverlauf mit Regler nach Strategie 1 mit Begrenzung von  $\pm 1$  bei einem Sprung der Höhe 0.5**

Die Regeldifferenz kann innerhalb von zwei verlängerten Abtastschritten beseitigt werden. Der Sollwert ist nach 0.344 sec erreicht.

### Stellgrößenbegrenzter Dead-Beat-Regler nach Strategie 2:

Da es sich um keine starke Begrenzung handelt, wird die Regelung um einen Abtastschritt verlängert, so dass die Regelung nach 0.3 sec abgeschlossen ist.

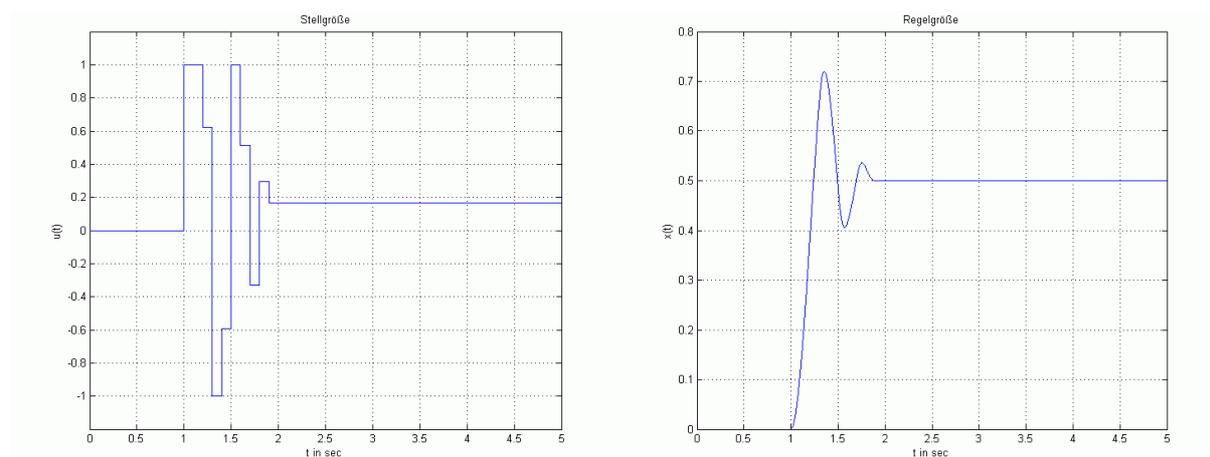


**Abbildung 5-28: Stell- und Regelgrößenverlauf mit Regler nach Strategie 2 mit Begrenzung von  $\pm 1$  bei einem Sprung der Höhe 0.5**

Insgesamt weist die Zustandsüberführung Dead-Beat-Verhalten auf. Das System wird in endlicher Einstellzeit ausgeregelt.

### Dead-Beat-Regler für Störgrößen mit Korrekturglied:

Bei der Dead-Beat-Regelung für Störgrößen unterscheiden sich die Verläufe der Stellgröße und Regelgröße erheblich von den Stell- und Regelgrößenverläufen der anderen Regler.



**Abbildung 5-29: Stell- und Regelgrößenverlauf mit Dead-Beat-Regler für Störgrößen mit Begrenzung von  $\pm 1$  bei einem Sprung der Höhe 0.5**

Es kommt in der Sprungantwort zum Überschwingen der Regelgröße. Das Regelverhalten weicht vom Dead-Beat-Verhalten ab. Jedoch ist nach bereits neun Abtastschritten und 0.9 sec das System komplett ausgeregelt.

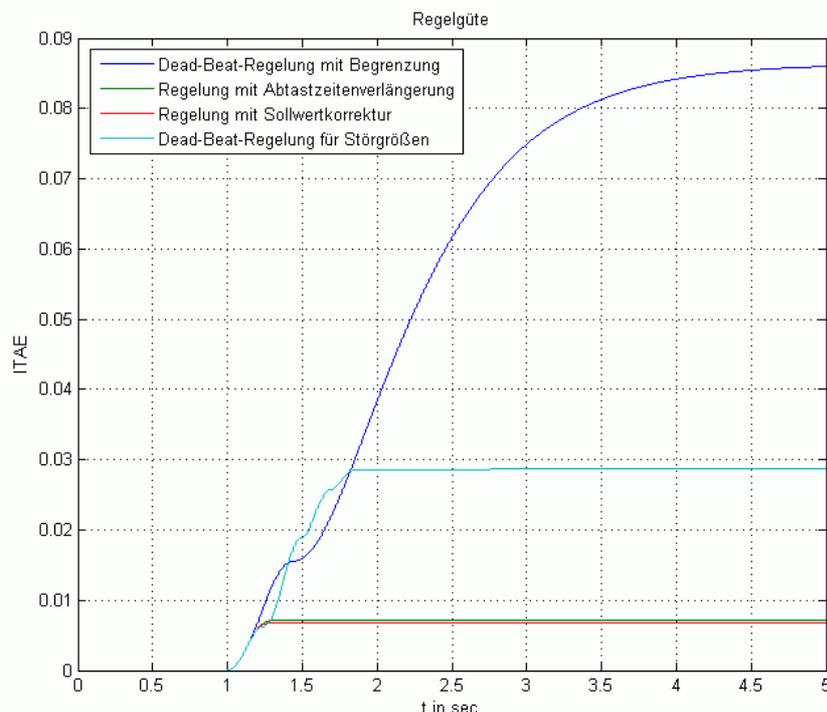


Abbildung 5-30: Vergleich der Regelgüten nach dem ITAE-Kriterium bei einem Sprung von 0 auf 0.5

Die begrenzte Dead-Beat-Regelung ist deutlich die ungünstigste, da der Wert des ITAE deutlich größer, als die der anderen Regelverfahren ist. Durch die Schwingungen bei der Dead-Beat-Regelung für Störgrößen wird der Wert des ITAE wesentlich größer als die Werte der Regelung nach Strategie 1 und 2, erreicht aber einen festen Wert zum Ende der Simulationszeit. Die Regelverfahren nach Strategie 1 und 2 sind in etwa gleichwertig, wobei die Regelung nach Strategie 2 ein wenig optimaler ist als die Regelung nach Strategie 1.

Zum Zeitpunkt  $t = 1.0$  sec wird ein Sprung der Höhe 1 auf das System gegeben.

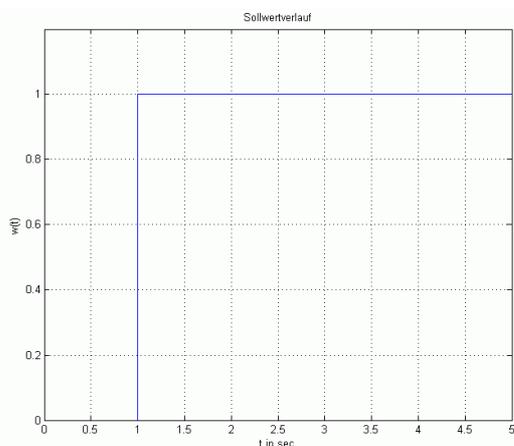
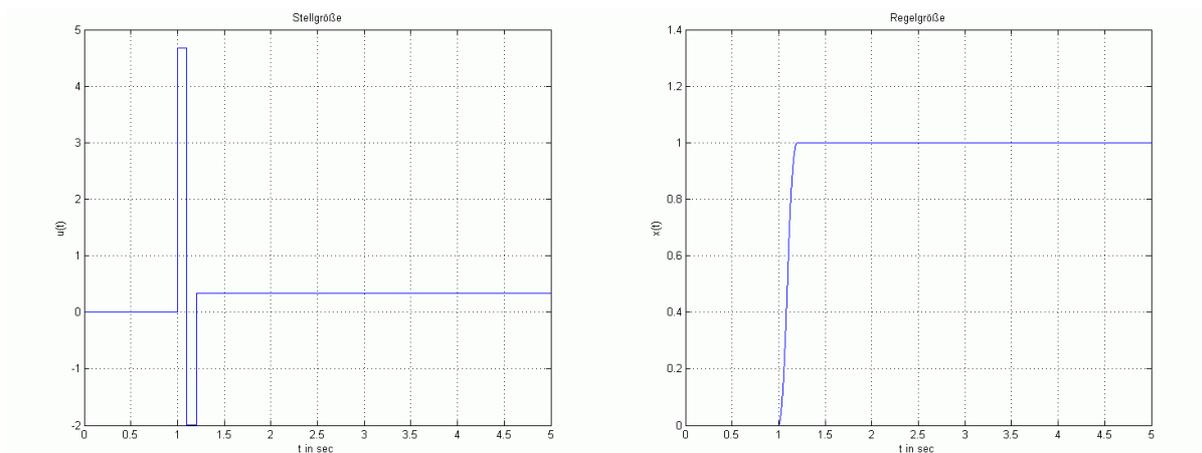


Abbildung 5-31: Einfacher Sprung von 0 auf 1

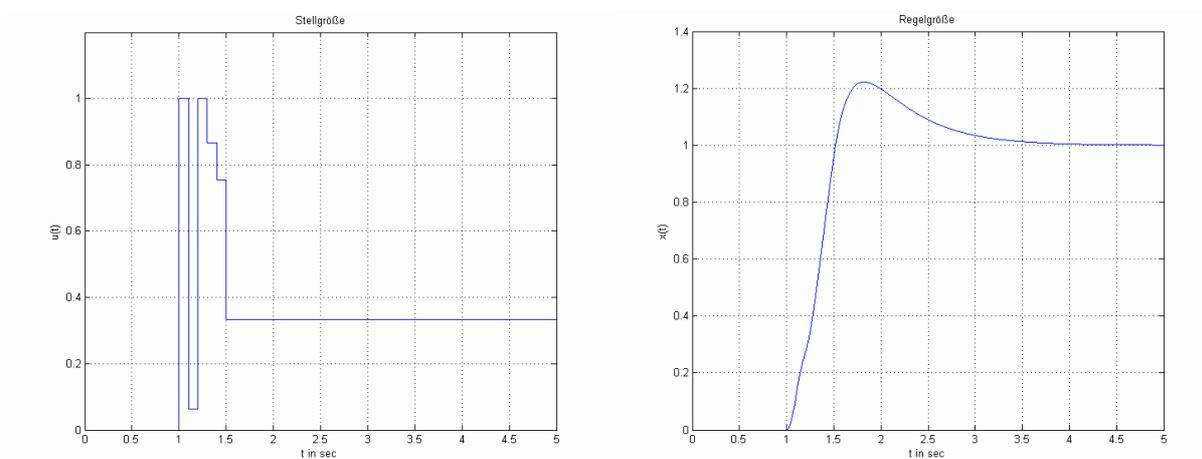
Für einen Dead-Beat-Regler für Führungsgrößen ohne begrenzte Stellgröße ergibt sich folgender Stell- und Regelgrößenverlauf.



**Abbildung 5-32: Stell- und Regelgrößenverlauf mit Dead-Beat-Regler ohne Begrenzung bei einem Sprung der Höhe 1**

Die erste Stellamplitude beträgt 4.674. Bei dieser Sprunghöhe handelt es sich bei einer Begrenzung von  $\pm 1$  um eine mittlere Begrenzung.

### Begrenzter Dead-Beat-Regler:

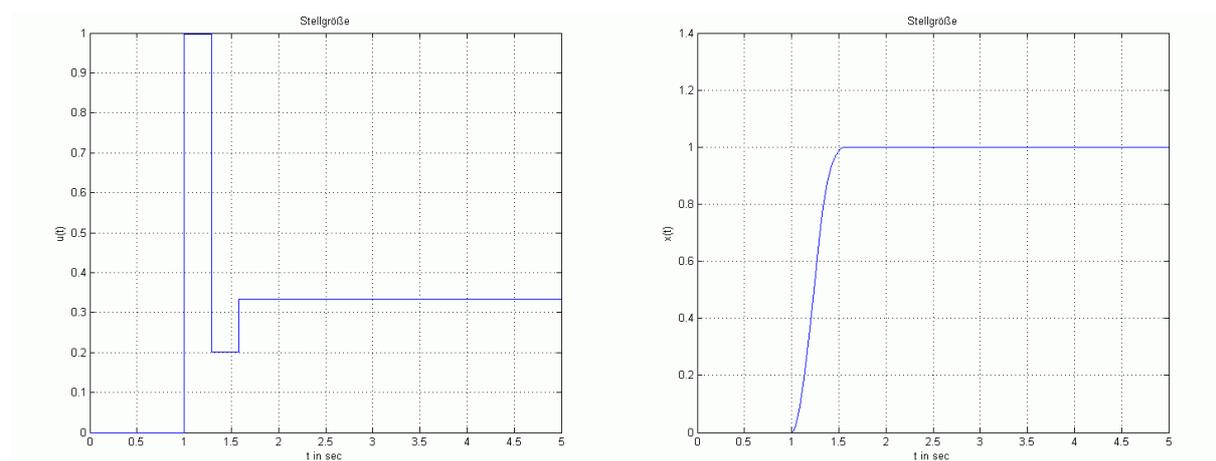


**Abbildung 5-33: Stell- und Regelgrößenverlauf mit Dead-Beat-Regler mit Begrenzung von  $\pm 1$  bei einem Sprung der Höhe 1**

Durch die Begrenzung schwingt das System einmal über und der Überschwinger wird anschließend mit der Dynamik der Strecke ausgeregelt. Die Regelung ist nach 4 sec immer noch nicht abgeschlossen.

### Stellgrößenbegrenzter Dead-Beat-Regler nach Strategie 1:

Arbeitet der Regler nach Strategie 1 verlängert sich die Abtastzeit auf  $t_{neu} = 0.288\text{sec}$ , um die Stellamplitude innerhalb der Begrenzung zu halten. Der Regelverlauf des Kombinationsreglers und des Reglers nach Strategie 1 entsprechen einander.

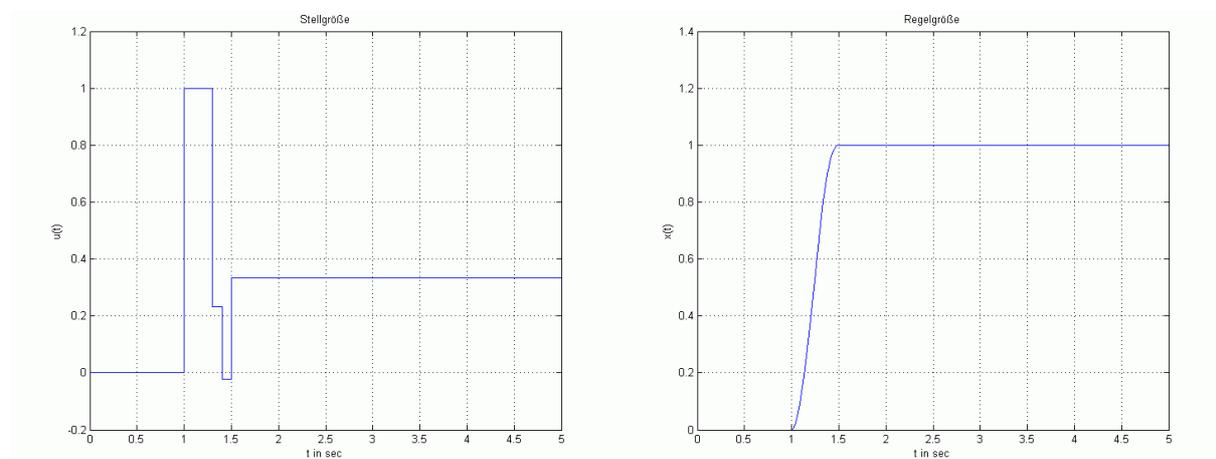


**Abbildung 5-34: Stell- und Regelgrößenverlauf mit Regler nach Strategie 1 mit Begrenzung von  $\pm 1$  bei einem Sprung der Höhe 1**

Die Regeldifferenz kann innerhalb von zwei verlängerten Abtastschritten beseitigt werden. Der Sollwert ist nach 0.576 sec erreicht.

### Stellgrößenbegrenzter Dead-Beat-Regler nach Strategie 2:

Da es sich um eine mittlere Begrenzung handelt, wird die Regelung um drei Abtastschritte verlängert, so dass die Regelung nach 0.5 sec abgeschlossen ist.

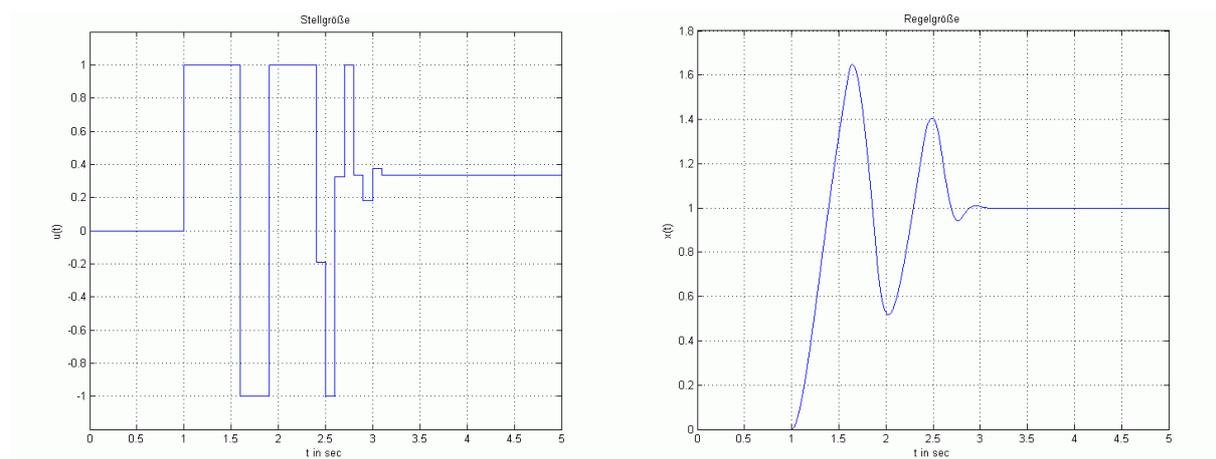


**Abbildung 5-35: Stell- und Regelgrößenverlauf mit Regler nach Strategie 2 mit Begrenzung von  $\pm 1$  bei einem Sprung der Höhe 1**

Insgesamt weist die Zustandsüberführung Dead-Beat-Verhalten auf. Das System wird in endlicher Einstellzeit ausgeregelt.

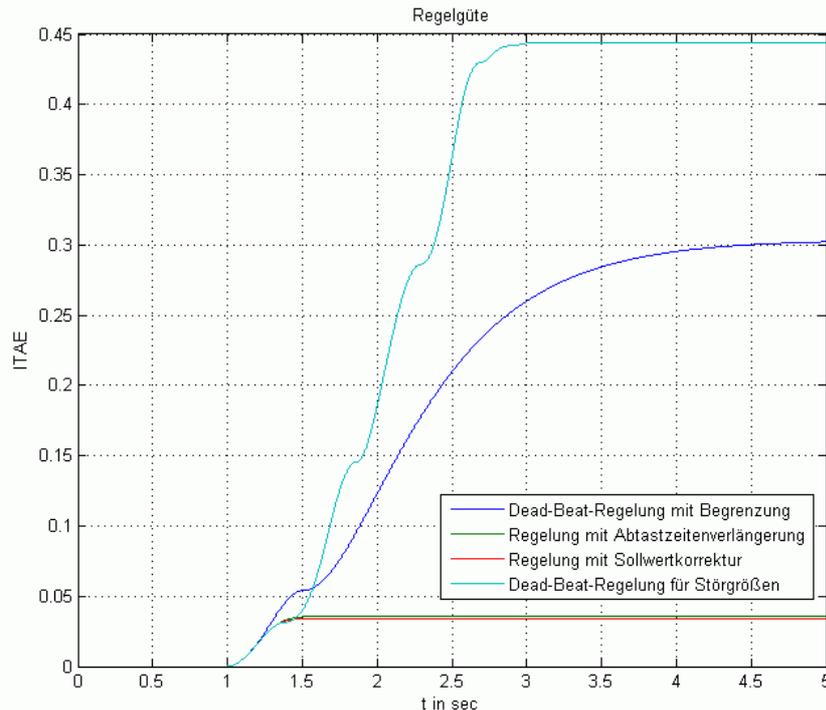
### Dead-Beat-Regler für Störgrößen mit Korrekturglied:

Bei der Dead-Beat-Regelung für Störgrößen unterscheiden sich die Verläufe der Stellgröße und Regelgröße erheblich von den Stell- und Regelgrößenverläufen der anderen Regler.



**Abbildung 5-36: Stell- und Regelgrößenverlauf mit Dead-Beat-Regler für Störgrößen mit Begrenzung von  $\pm 1$  bei einem Sprung der Höhe 1**

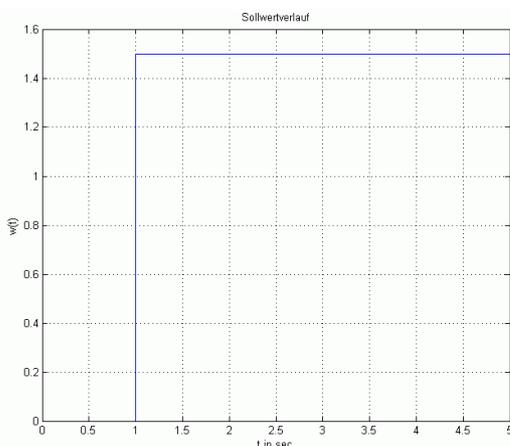
Es kommt in der Sprungantwort zum Überschwingen der Regelgröße, die Amplituden der Schwingungen sind größer als im vorherigen Fall. Das Regelverhalten weicht vom Dead-Beat-Verhalten ab. Nach 31 Abtastschritten und 3.1 sec ist das System komplett ausgeregelt.



**Abbildung 5-37: Vergleich der Regelgüten nach dem ITAE-Kriterium bei einem Sprung von 0 auf 1**

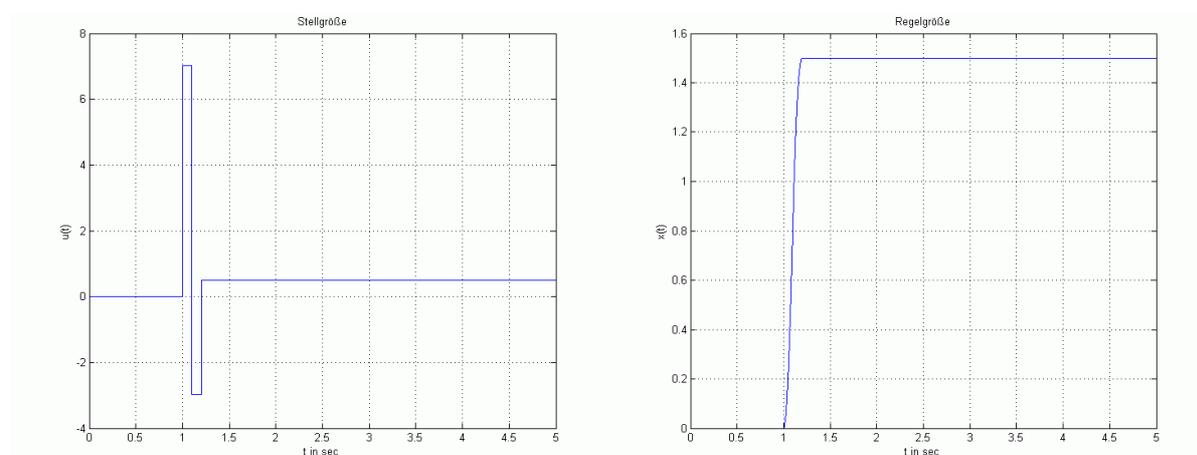
Die Dead-Beat-Regelung für Störgrößen weist aufgrund der großen Amplituden die schlechteste Regelgüte auf, so dass es den Anschein hat, dass die einfache Dead-Beat-Regelung besser ist. Aber im Gegensatz zur einfachen Dead-Beat-Regelung erreicht aber der Wert des ITAE der Dead-Beat-Regelung für Störgrößen einen endlichen Wert zum Ende der Simulationszeit, was bedeutet, dass die Regelabweichung vollständig beseitigt wird. Die Regelgüten der Regelverfahren nach Strategie 1 und nach Strategie 2 sind in etwa gleichwertig, wobei das Regelverfahren nach Strategie 2 erneut ein wenig optimaler ist.

Zum Zeitpunkt  $t = 1.0$  sec wird ein Sprung der Höhe **1.5** auf das System gegeben.



**Abbildung 5-38: Einfacher Sprung von 0 auf 1.5**

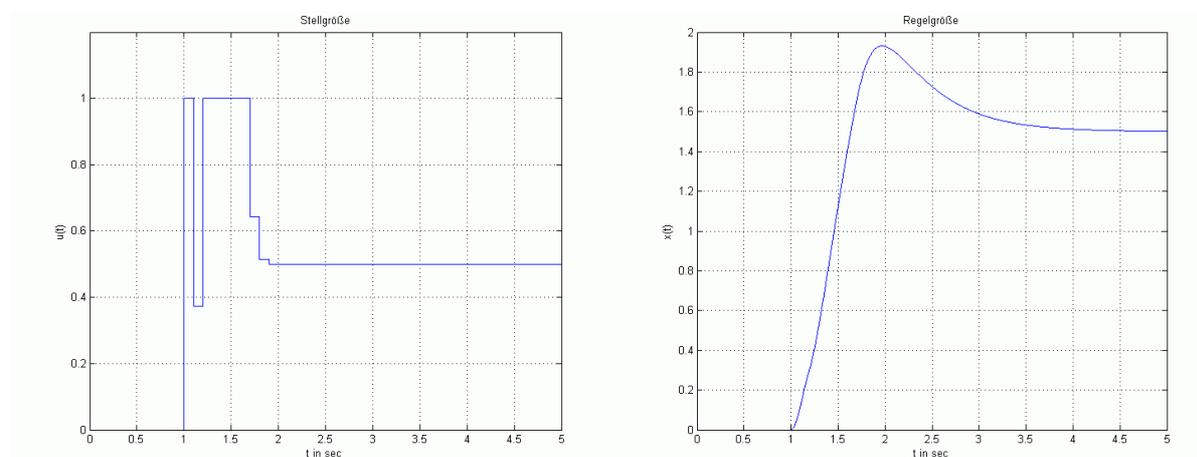
Für einen Dead-Beat-Regler für Führungsgrößen ohne begrenzte Stellgröße ergibt sich folgender Stell- und Regelgrößenverlauf.



**Abbildung 5-39:** Stell- und Regelgrößenverlauf mit Dead-Beat-Regler ohne Begrenzung bei einem Sprung der Höhe 1.5

Die erste Stellamplitude beträgt 7.010. Für diese Sprunghöhe handelt es sich bei einer Begrenzung von  $\pm 1$  um eine mittlere bis starke Begrenzung.

### Begrenzter Dead-Beat-Regler:

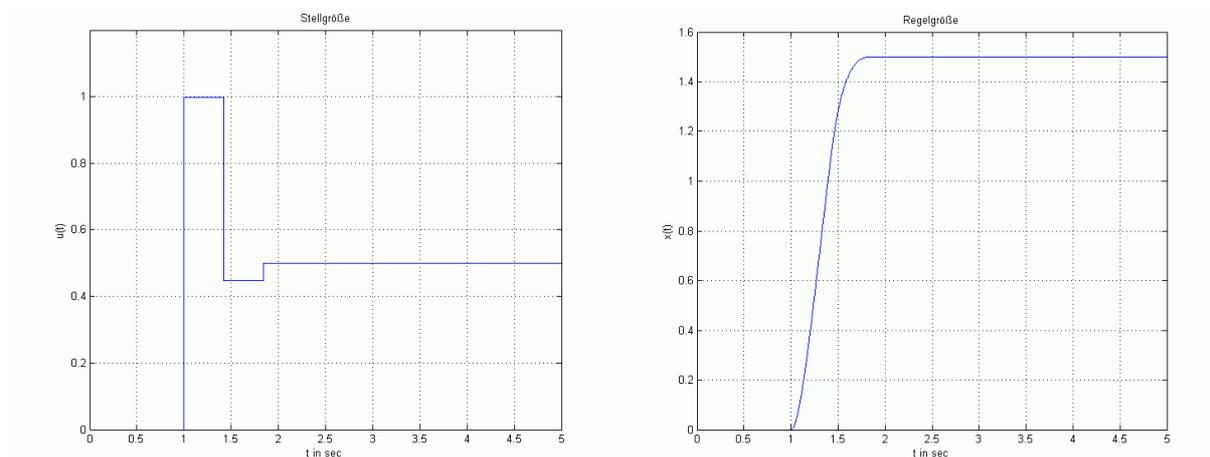


**Abbildung 5-40:** Stell- und Regelgrößenverlauf mit Dead-Beat-Regler mit Begrenzung von  $\pm 1$  bei einem Sprung der Höhe 1.5

Durch die Begrenzung schwingt das System noch stärker über und der Überschwinger wird anschließend mit der Dynamik der Strecke ausgeregelt. Die Regelung ist nach 4 sec immer noch nicht abgeschlossen.

### Stellgrößenbegrenzter Dead-Beat-Regler nach Strategie 1:

Arbeitet der Regler nach Strategie 1 verlängert sich die Abtastzeit auf  $t_{neu} = 0.422$ , um die Stellamplitude innerhalb der Begrenzung zu halten. Der Regelverlauf des Kombinationsreglers und des Reglers nach Strategie 1 entsprechen einander.

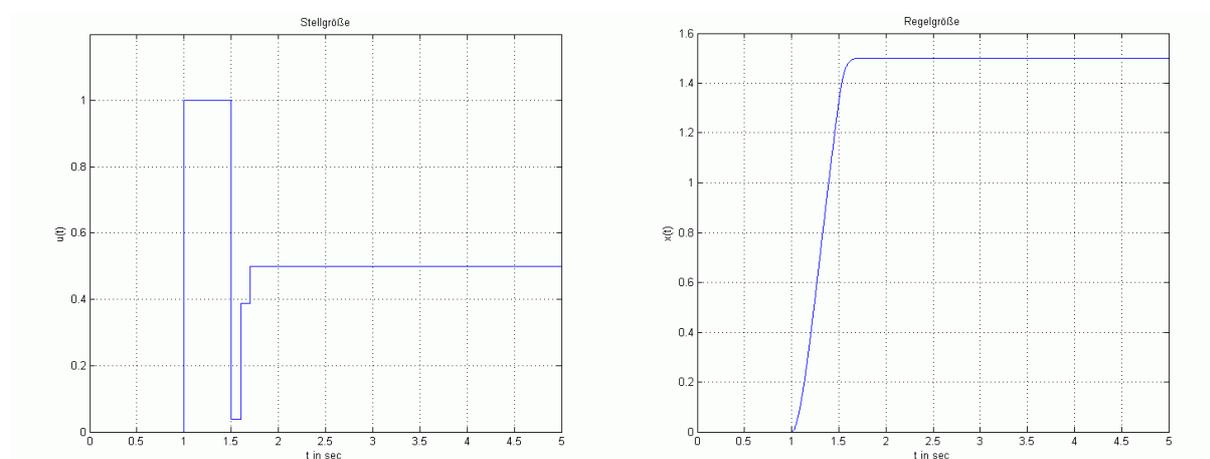


**Abbildung 5-41:** Stell- und Regelgrößenverlauf mit Regler nach Strategie 1 mit Begrenzung von  $\pm 1$  bei einem Sprung der Höhe 1.5

Die Regeldifferenz kann innerhalb von zwei verlängerten Abtastschritten beseitigt werden. Der Sollwert ist nach 0.844 sec erreicht.

### Stellgrößenbegrenzter Dead-Beat-Regler nach Strategie 2:

Der Regler vergrößert die Schrittzahl. Insgesamt wird für die Gesamtregelung eine längere Einstellzeit zugelassen. Das Regelsystem benötigt sieben Abtastschritte, um den Sollwert zu erreichen.

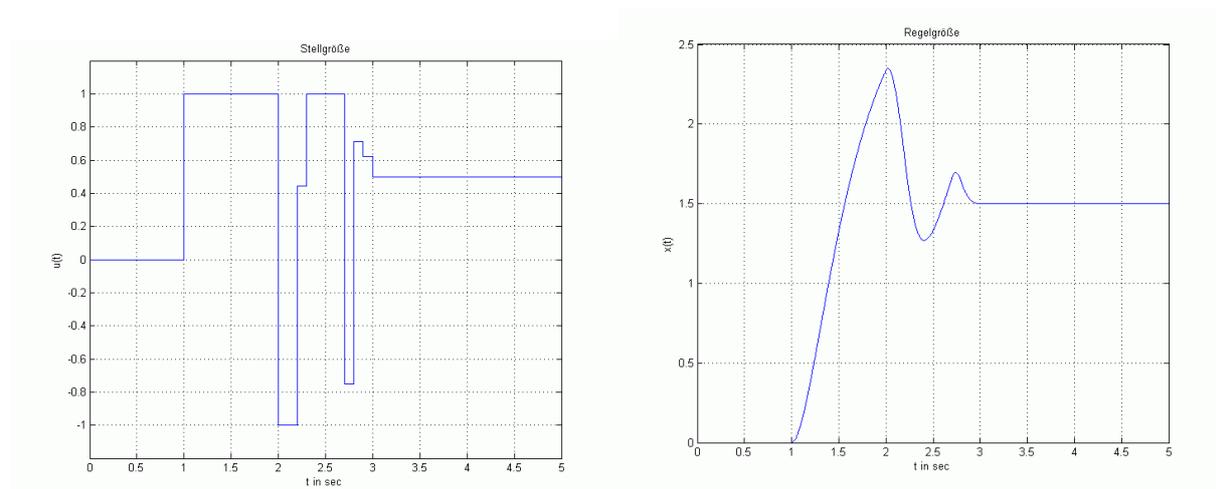


**Abbildung 5-42:** Stell- und Regelgrößenverlauf mit Regler nach Strategie 2 mit Begrenzung von  $\pm 1$  bei einem Sprung der Höhe 1.5

Insgesamt weist die Zustandsüberführung Dead-Beat-Verhalten auf. Das System wird in endlicher Einstellzeit ausgeregelt.

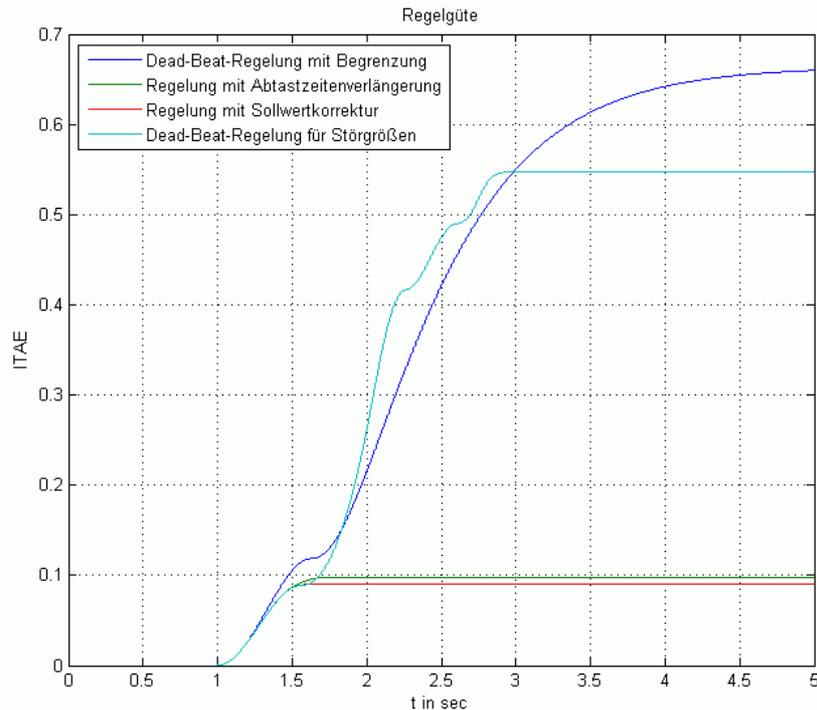
### Dead-Beat-Regler für Störgrößen mit Korrekturglied:

Bei der Dead-Beat-Regelung für Störgrößen unterscheiden sich die Verläufe der Stellgröße und Regelgröße erheblich von den Stell- und Regelgrößenverläufen der anderen Regler.



**Abbildung 5-43: Stell- und Regelgrößenverlauf mit Dead-Beat-Regler für Störgrößen mit Begrenzung von  $\pm 1$  bei einem Sprung der Höhe 1.5**

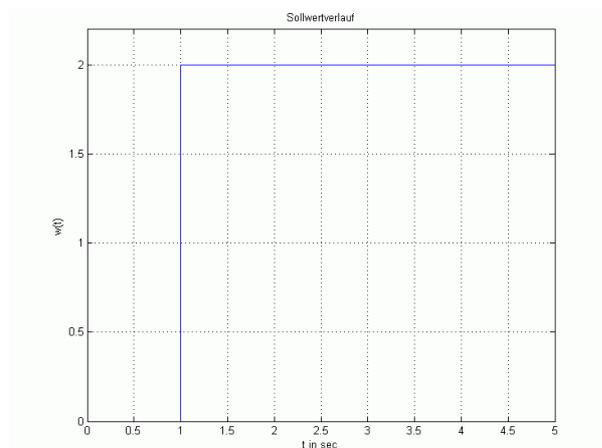
Es kommt in der Sprungantwort zum starken Überschwingen der Regelgröße. Das Regelverhalten weicht vom Dead-Beat-Verhalten ab. Allerdings wird das Regelsystem in endlicher Einstellzeit ausgeregelt. Nach 30 Abtastschritten und 3.0 sec ist das System ausgeregelt.



**Abbildung 5-44:** Vergleich der Regelgüten nach dem ITAE-Kriterium bei einem Sprung von 0 auf 1.5

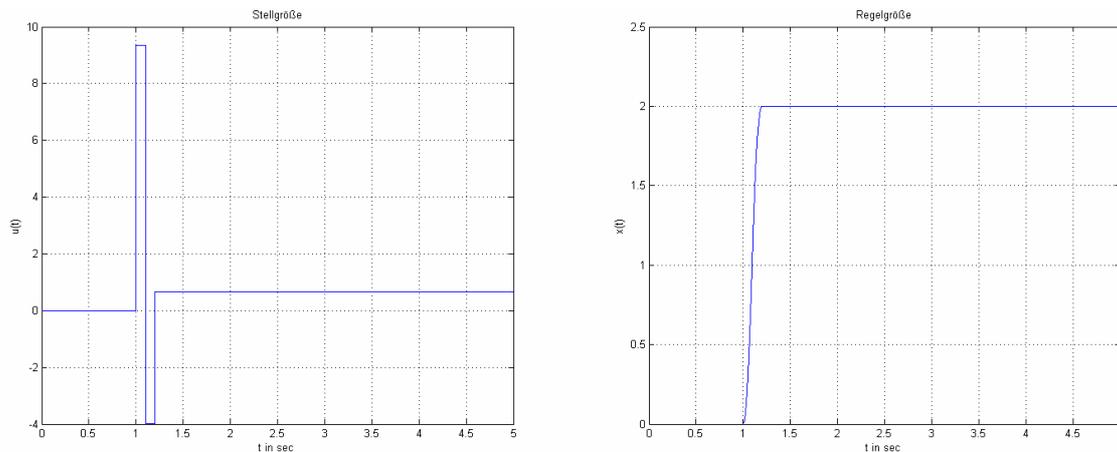
Für diese Sprunghöhe erweist sich die einfache Dead-Beat-Regelung nach dem ITAE-Kriterium wieder als schlechteste. Der Wert des ITAE der Dead-Beat-Regelung für Störgrößen ist um eine vielfaches größer als, der von den Regelverfahren nach Strategie 1 und 2. Auch hier ist das Regelverfahren nach Strategie 2 optimaler. Die Werte der ITAE der beiden Regelverfahren gehen etwas deutlicher auseinander.

Zum Zeitpunkt  $t = 1.0$  sec wird ein Sprung der Höhe 2.0 auf das System gegeben.



**Abbildung 5-45:** Einfacher Sprung von 0 auf 2

Für einen Dead-Beat-Regler für Führungsgrößen ohne begrenzte Stellgröße ergibt sich folgender Stell- und Regelgrößenverlauf.

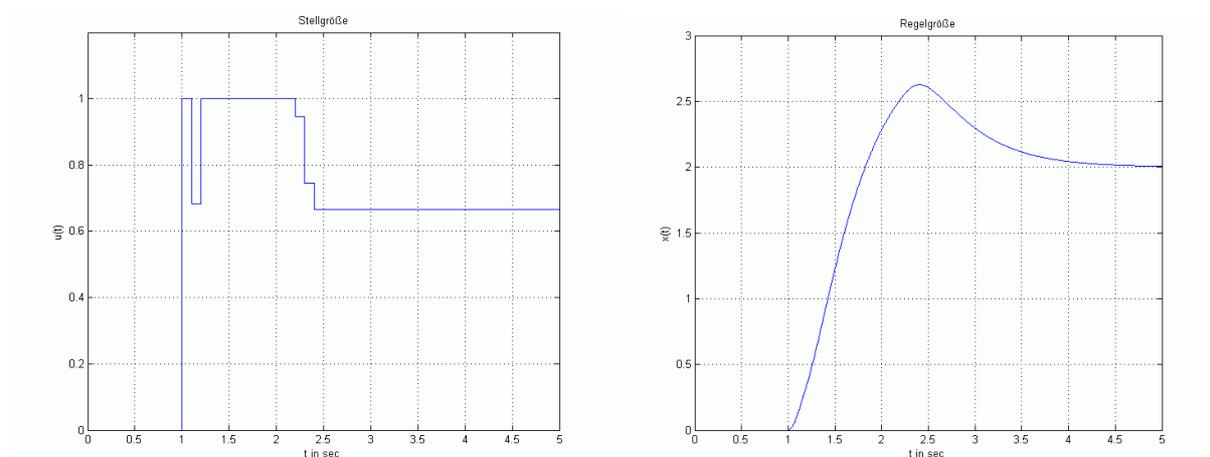


**Abbildung 5-46: Stell- und Regelgrößenverlauf mit Dead-Beat-Regler ohne Begrenzung bei einem Sprung der Höhe 2**

Es ist zu sehen, dass bei einer Abtastzeit von 0.1 sec die Stellgrößen sehr groß wird. Die erste Stellamplitude beträgt 9.347. Das Regelsystem wird, wie bei einem System 2. Ordnung zu erwarten ist, in zwei Schritten exakt und schwingungsfrei ausgeregelt.

Folgend sind die Stellgrößen- und Regelgrößenverläufe der verschiedenen Regelverfahren gezeigt. Die Regelverläufe des Kombinationsreglers und des Reglers nach Strategie 1 entsprechen einander.

### Begrenzter Dead-Beat-Regler:

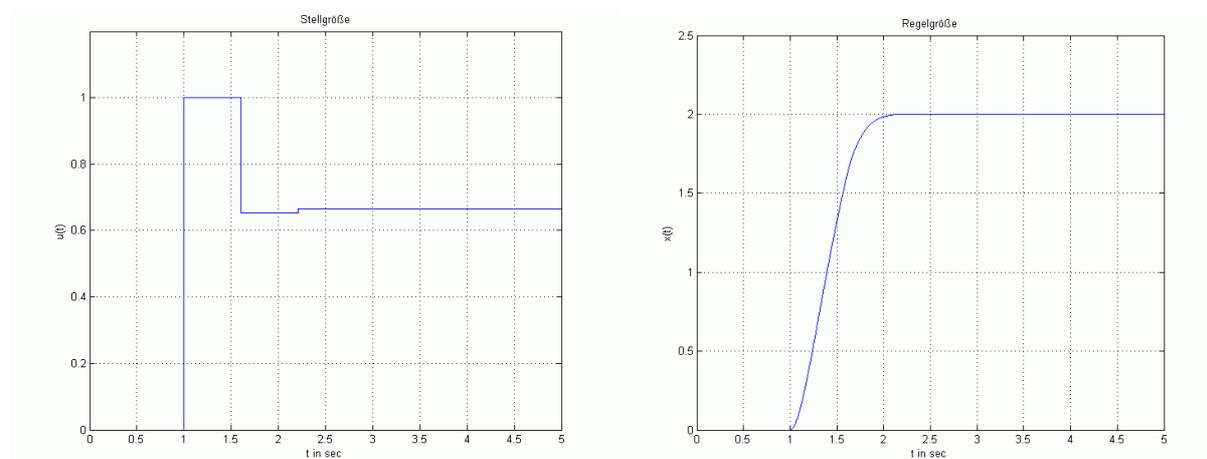


**Abbildung 5-47: Stell- und Regelgrößenverlauf mit Dead-Beat-Regler mit Begrenzung von  $\pm 1$  bei einem Sprung der Höhe 2**

Durch die Begrenzung schwingt das System einmal über und der Überschwinger wird anschließend mit der Dynamik der Strecke ausgeregelt. Die Regelung ist nach 4 sec immer noch nicht abgeschlossen.

### Stellgrößenbegrenzter Dead-Beat-Regler nach Strategie 1:

Arbeitet der Regler nach Strategie 1 verlängert sich die Abtastzeit auf  $t_{neu} = 0.604$ , um die Stellamplitude innerhalb der Begrenzung zu halten. Da es während der Regelung nicht zu einer weiteren Übersteuerung kommt, arbeitet der Kombinationsregler genauso. Die Stell- und Regelgrößenverläufe sind bei beiden Reglern identisch.

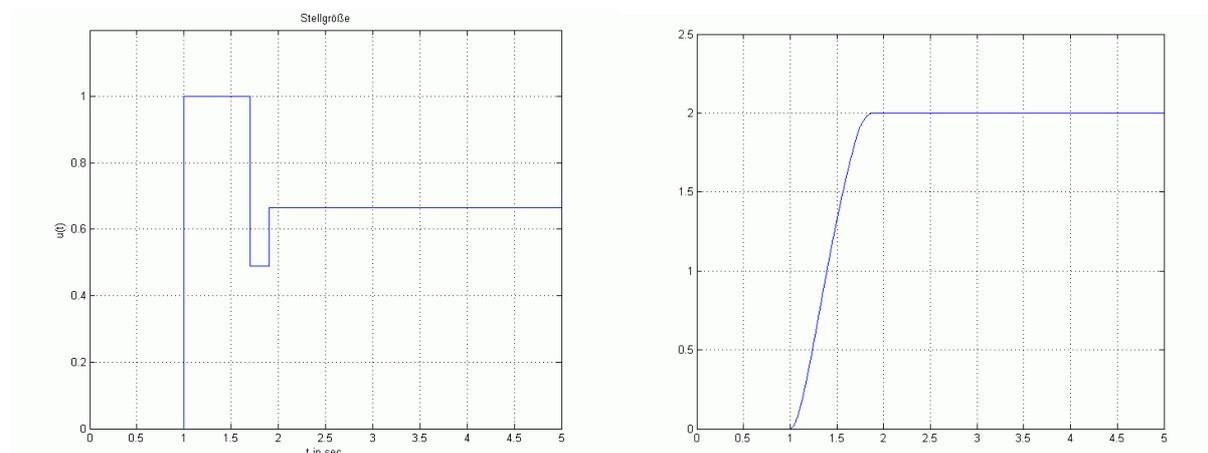


**Abbildung 5-48: Stell- und Regelgrößenverlauf mit Regler nach Strategie 1 mit Begrenzung von  $\pm 1$  bei einem Sprung der Höhe 2**

Das System kann in zwei vergrößerten Abtastschritten endgültig ausgeregelt werden, so dass der Sollwert nach 1.208 sec erreicht ist.

### Stellgrößenbegrenzter Dead-Beat-Regler nach Strategie 2:

Der Regler vergrößert die Schrittzahl. Insgesamt wird für die Gesamtregelung eine längere Einstellzeit zugelassen. Das Regelsystem benötigt neun Abtastschritte, um den Sollwert zu erreichen.

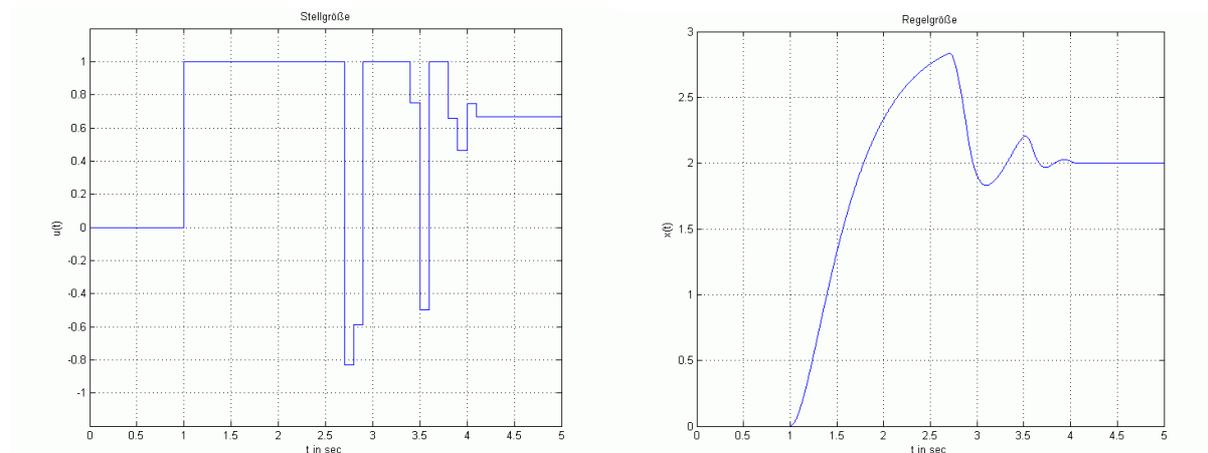


**Abbildung 5-49: Stell- und Regelgrößenverlauf mit Regler nach Strategie 2 mit Begrenzung von  $\pm 1$  bei einem Sprung der Höhe 2**

Insgesamt weist die Zustandsüberführung Dead-Beat-Verhalten auf. Das System wird in endlicher Einstellzeit ausgeregelt.

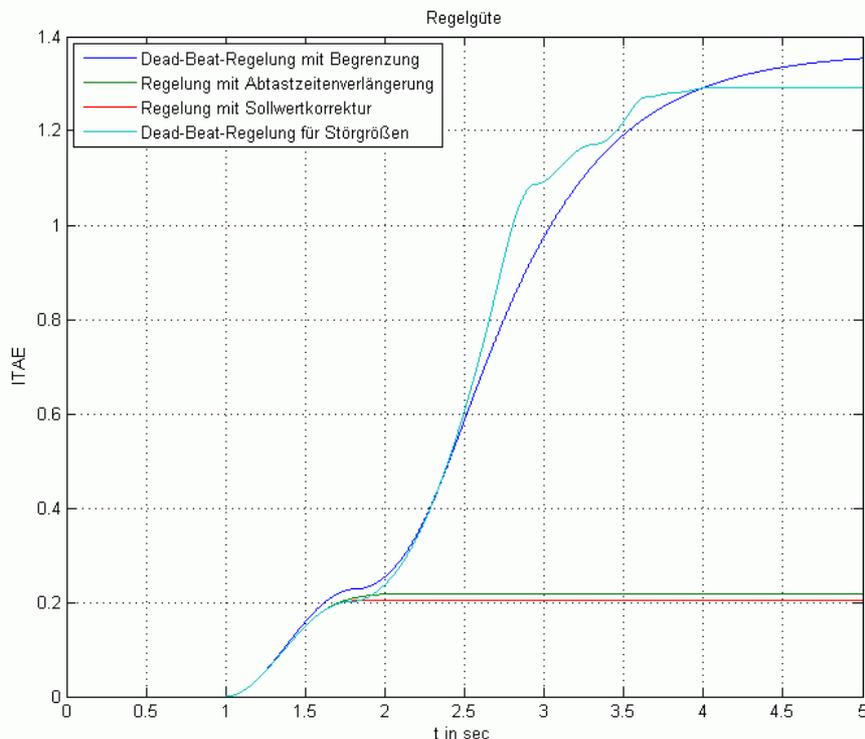
### Dead-Beat-Regler für Störgrößen mit Korrekturglied:

Bei der Dead-Beat-Regelung für Störgrößen unterscheiden sich die Verläufe der Stellgröße und Regelgröße erheblich von den Stell- und Regelgrößenverläufen der anderen Regler.



**Abbildung 5-50: Stell- und Regelgrößenverlauf mit Dead-Beat-Regler für Störgrößen mit Begrenzung von  $\pm 1$  bei einem Sprung der Höhe 2**

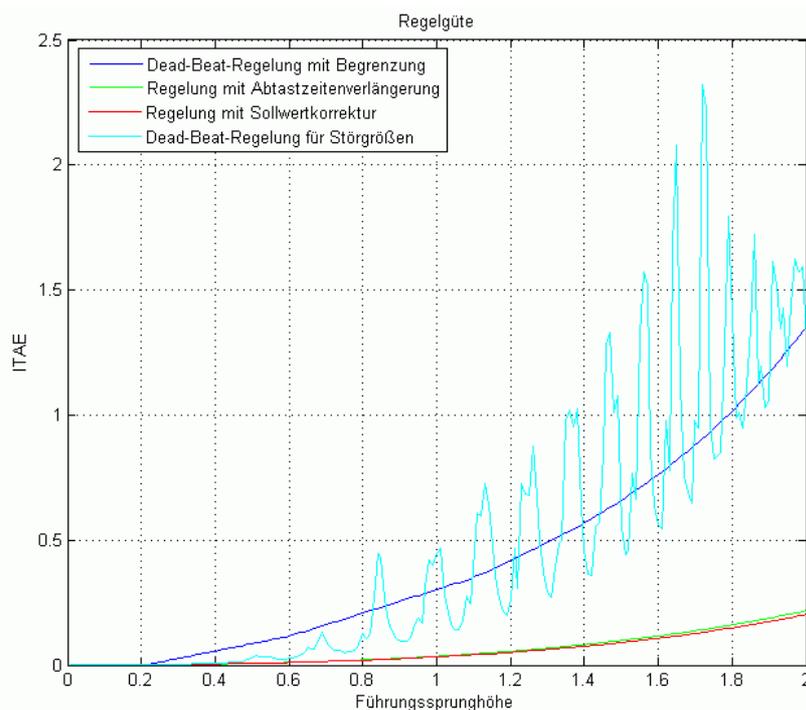
Es kommt in der Sprungantwort zum Überschwingen der Regelgröße. Das Regelverhalten weicht vom Dead-Beat-Verhalten ab. Allerdings wird das Regelsystem in endlicher Einstellzeit ausgeregelt. Nach 31 Abtastschritten und 3.1 sec ist das System ausgeregelt.



**Abbildung 5-51:** Vergleich der Regelgüten nach dem ITAE-Kriterium bei einem Sprung von 0 auf 2

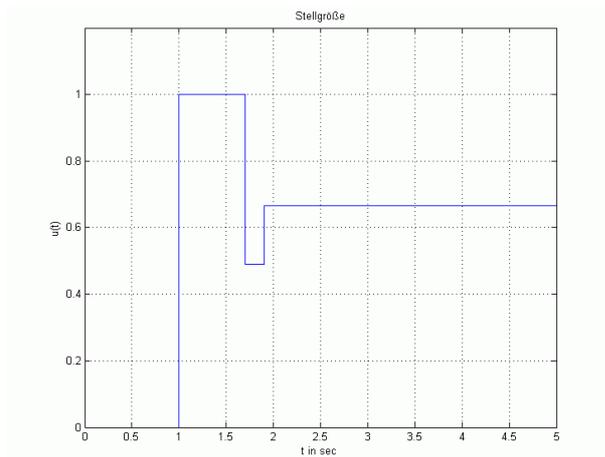
Die Regelgütenverläufe der Regelung mit Abtastzeitenverlängerung und Regelung mit Sollwertkorrektur sind am Ende der Simulationszeit etwa gleich. Die Regelung mit Sollwertkorrektur weist eine etwas bessere Regelgüte auf. Der Wert des ITAE der Dead-Beat-Regelung für Störgrößen steigt aufgrund der starken Schwingungen sehr stark an, erreicht aber zum Ende der Simulationszeit einen festen Wert. Der begrenzte Dead-Beat-Regler hingegen hat etwa zum Zeitpunkt  $t = 3.5$  sec noch einen kleineren Wert, wächst aber an, so dass der Wert des ITAE zum Ende der Simulationszeit größer wird, da zu dem Zeitpunkt die Regelung noch nicht abgeschlossen ist.

Folgend sind die Regelgüten nach einer Simulationszeit von 5 sec in Abhängigkeit der Sprunghöhe dargestellt. Die Führungssprunghöhe wird als Maß der Stärke der Begrenzung genommen.

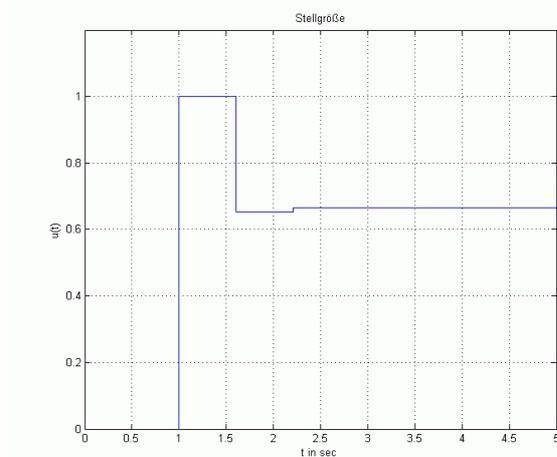


**Abbildung 5-52: Regelgüte nach einer Simulationsdauer von 5 sec in Abhängigkeit der Führungssprunghöhe**

Bei kleinen Führungssprüngen kommt es noch nicht zur Begrenzung, daher sind die Regelgüten bei einer Führungssprunghöhe bis ca. 0.2 bei allen Regelungen gleich. Mit wachsender Führungssprunghöhe werden alle Regelungen tendenziell schlechter. Die Regelung mit Abtastzeitenverlängerung und die Regelung mit Sollwertkorrektur besitzen etwa dieselben Regelgüten, wobei die Regelung mit Sollwertkorrektur mit wachsender Führungssprunghöhe eine bessere Regelgüte aufweist als die Regelung mit Abtastzeitenverlängerung. Das liegt daran, dass bei der Sollwertkorrektur mit der kleinstmöglichen Abtastzeit gearbeitet wird. Der Stellgrößenverlauf kann am genauesten an die Begrenzung angepasst werden, da jede Stellgröße an die Begrenzung angepasst wird. Wobei bei der Abtastzeitenverlängerung bei starker Begrenzung nur die erste Stellgröße an die Begrenzung angepasst wird und anschließend die große Abtastzeit gehalten werden muss, so dass eine lange Einstellzeit entsteht. Folgend sind die Stellgrößenverläufe der Regelung mit Sollwertkorrektur und Regelung mit Abtastzeitenverlängerung für einen Führungssprung von 0 auf 2 im Vergleich zu sehen.



**Abbildung 5-53: Stellgrößenverlauf des Reglers mit Sollwertkorrektur**



**Abbildung 5-54: Stellgrößenverlauf des Reglers mit Abtastzeitenverlängerung**

Der Regelgütenverlauf des Dead-Beat-Reglers für Störgrößen weist starke Schwingungen auf, hat aber eine steigende Tendenz. Je nach Führungssprunghöhe entstehen durch die unterschiedlich stark begrenzten Stellgrößen mehrere Störimpulse. Der Regler muss die Störimpulse ausregeln, wodurch weitere begrenzte Stellgrößen entstehen. Diese erneuten Störimpulse wirken den anderen entgegen, so dass dies dazu führt, dass in Abhängigkeit der Führungssprunghöhe unterschiedliche viele und unterschiedlich starke Schwingungen im Regelgrößenverlauf entstehen, wie an den folgenden Regelgrößenverläufe zu sehen ist.

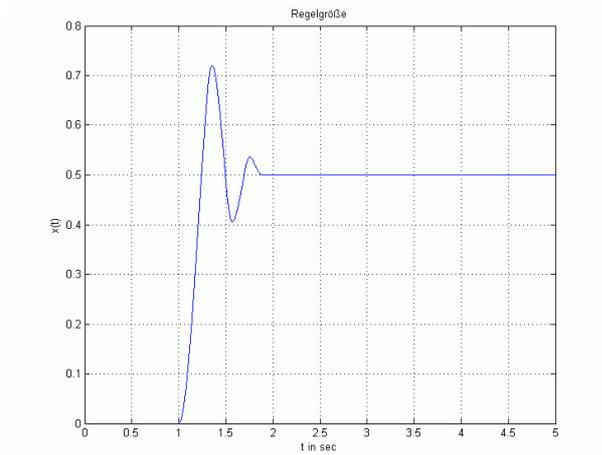


Abbildung 5-55: Regelgrößenverlauf bei einem Führungssprung von 0 auf 0.5

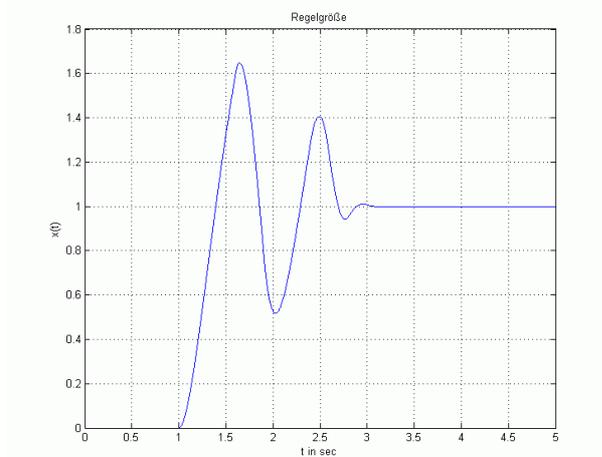


Abbildung 5-56: Regelgrößenverlauf bei einem Führungssprung von 0 auf 1

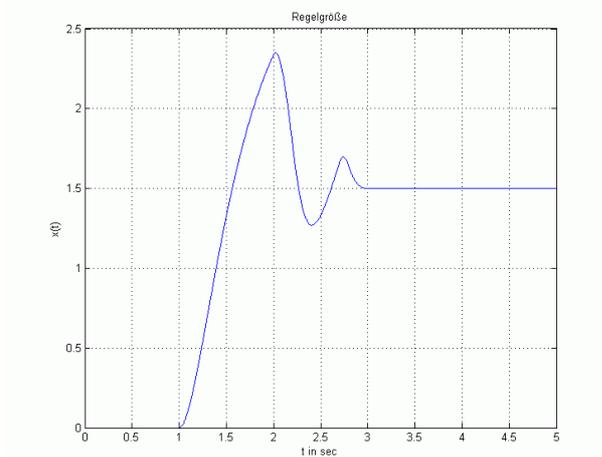


Abbildung 5-57: Regelgrößenverlauf bei einem Führungssprung von 0 auf 1.5

Kommt es zu vielen und starken Schwingungen, fällt die Regelgüte des begrenzten Dead-Beat-Reglers günstiger aus als die Dead-Beat-Regelung für Störgrößen, obwohl diese in endlicher Einstellzeit ausregelt.

### 5.3 Vergleich der stellgrößenbegrenzten Regler für Strecken mit $IT_2$ -Strecken bei dynamischer Führungsgröße

Die Untersuchung der Regler mit der  $IT_2$ -Strecke werden anhand eines System gemacht, welches Begrenzung von  $\pm 1$  aufweist. Da ein Störgrößenregler mit Korrekturglied mit dieser Strecke nicht möglich ist, erfolgt der Vergleich nur zwischen dem Dead-Beat-Regler für Führungsgrößen sprünge, dem Regelverfahren zur Abtastzeitenverlängerung, dem Regelverfahren zur Sollwertkorrektur und dem Kombinationsregler.

#### 5.3.1 Fall 1: Positive Sollwertänderung während der Regelung

Zunächst erfolgt aus der Ruhelage ein positiver Sollwertsprung von 0 auf 4 zum Zeitpunkt  $t = 1.0$  sec. Zum Zeitpunkt  $t = 1.5$  sec erfolgt der nächste Sollwertsprung von 4 auf 6.

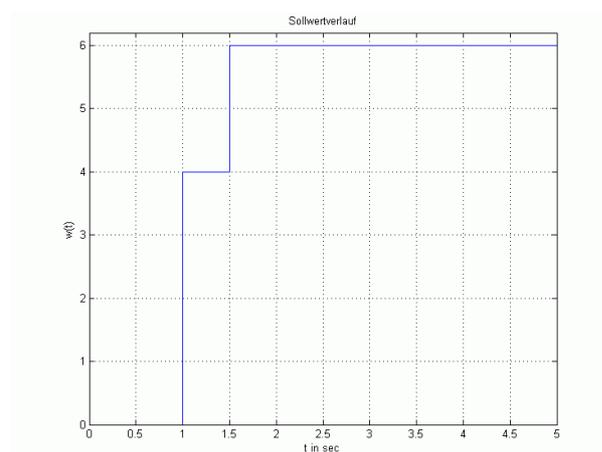
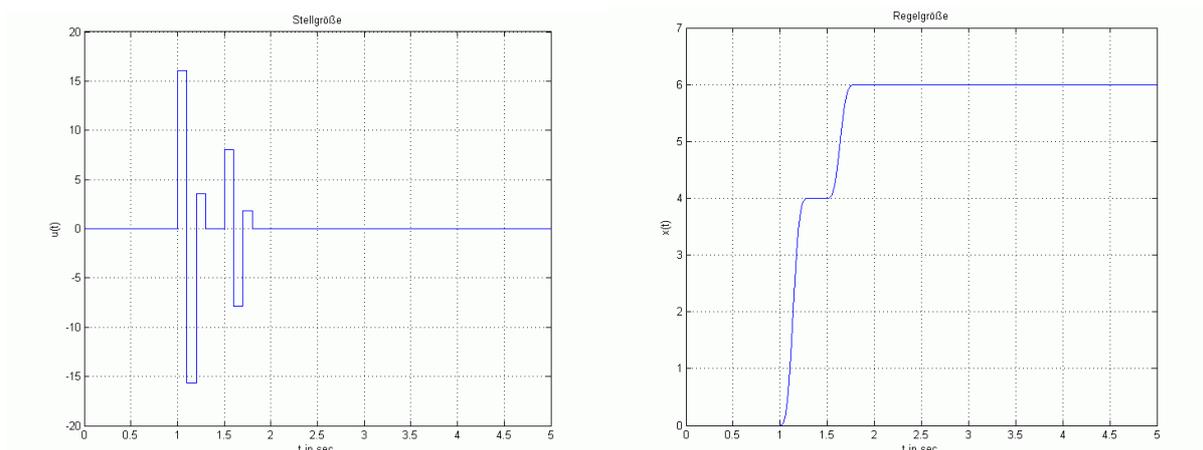


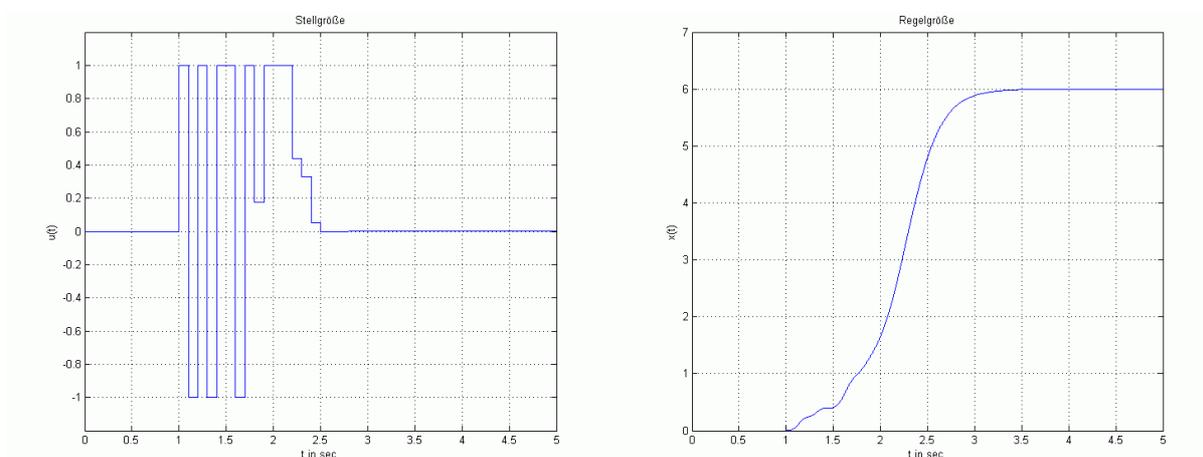
Abbildung 5-58: Positive Sollwertänderung von 4 auf 6

Ist der Regler nicht begrenzt, wird der erste Sprung so schnell ausgeregelt, so dass der zweite Sprung während einer Ruhelage stattfindet. Es sind zwei Überführungsvorgänge, wobei das System von einer Ruhelage in eine andere Ruhelage überführt wird.



**Abbildung 5-59: Stell- und Regelgrößenverlauf bei positiver Sollwertänderung mit Dead-Beat-Regler ohne Begrenzung**

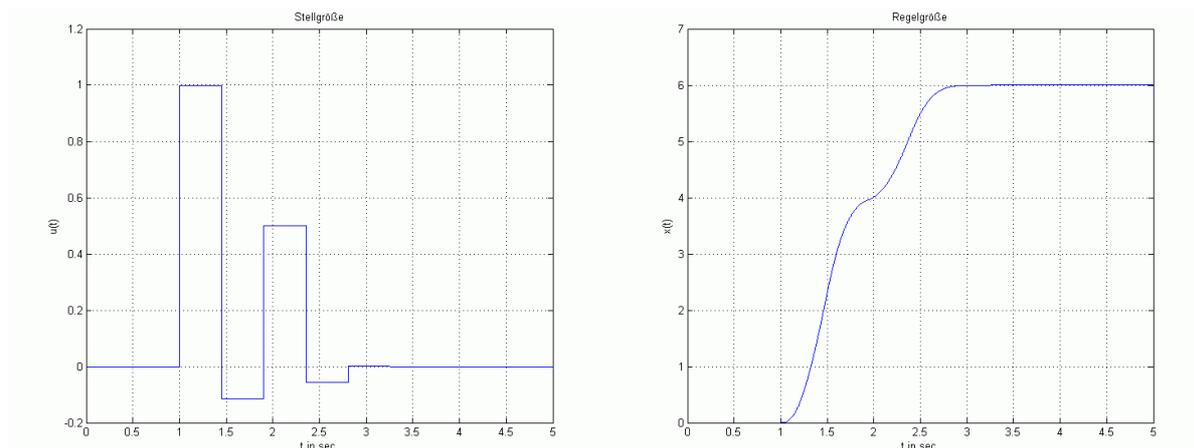
Ist der Regler auf  $\pm 1$  begrenzt sehen die Verläufe der stell- und Führungsgröße wie folgt aus.



**Abbildung 5-60: Stell- und Regelgrößenverlauf bei positiver Sollwertänderung mit Dead-Beat-Regler mit Begrenzung von  $\pm 1$**

### Stellgrößenbegrenzter Dead-Beat-Regler nach Strategie 1:

Wird das Regelverfahren der Abtastzeitenänderung gewählt, wird die Abtastzeit auf  $t_{neu} = 0.452$  verlängert. Der zweite Sprung erfolgt erst zum Zeitpunkt  $t = 1.904$  sec. Die Regelung ist noch nicht abgeschlossen und die verlängerte Abtastzeit wird beibehalten.

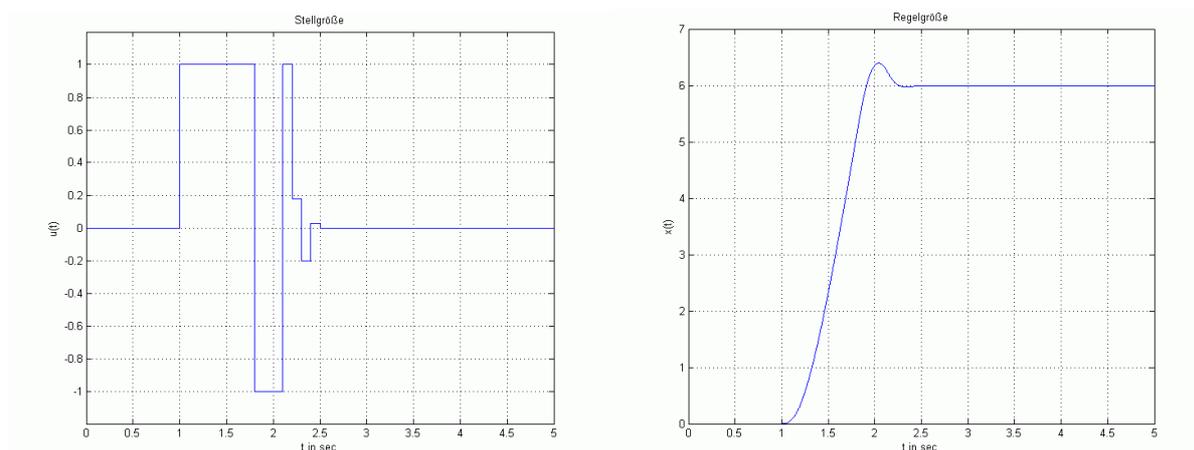


**Abbildung 5-61: Stell- und Regelgrößenverlauf bei positiver Sollwertänderung mit Regler nach Strategie 1 mit Begrenzung von  $\pm 1$**

Da es zu keinem weiteren Überschreiten der Grenzwerte kommt, arbeitet der **Kombinationsregler** genauso.

### Stellgrößenbegrenzter Dead-Beat-Regler nach Strategie 2:

Arbeitet der Regler nach Strategie 2, wird die Sollwertkorrektur sofort registriert. Der Regler kann schneller auf den zweiten Sprung reagieren.



**Abbildung 5-62: Stell- und Regelgrößenverlauf bei positiver Sollwertänderung mit Regler nach Strategie 2 mit Begrenzung von  $\pm 1$**

Es kommt zu zwei Überschwingern, wobei der der zweite wieder sehr klein und kaum sichtbar ist. Das System wird in 15 Abtastschritten ausgegelt.

### 5.3.2 Fall 2: Negative Sollwertänderung während der Regelung

Zunächst erfolgt aus der Ruhelage ein positiver Sollwertsprung von 0 auf 4 zum Zeitpunkt  $t = 1.0 \text{ sec}$ . Zum Zeitpunkt  $t = 1.5 \text{ sec}$  erfolgt der nächste Sollwertsprung von 4 auf 2.

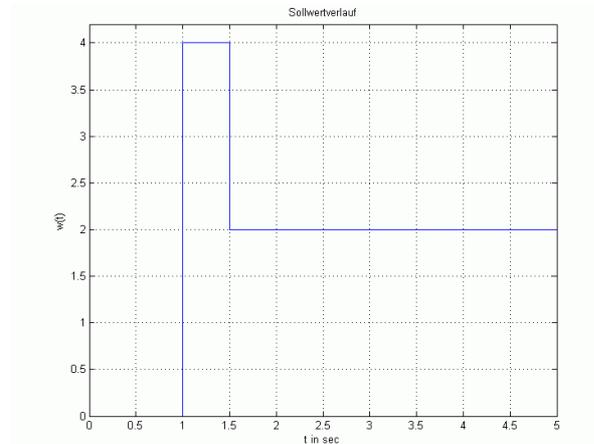


Abbildung 5-63: Negative Sollwertänderung von 4 auf 2

Ist der Regler nicht begrenzt, wird der erste Sprung so schnell ausgeregelt, so dass der zweite Sprung während einer Ruhelage stattfindet. Es erfolgen zwei Überführungsvorgänge, wobei das System von einer Ruhelage in eine andere Ruhelage überführt wird.

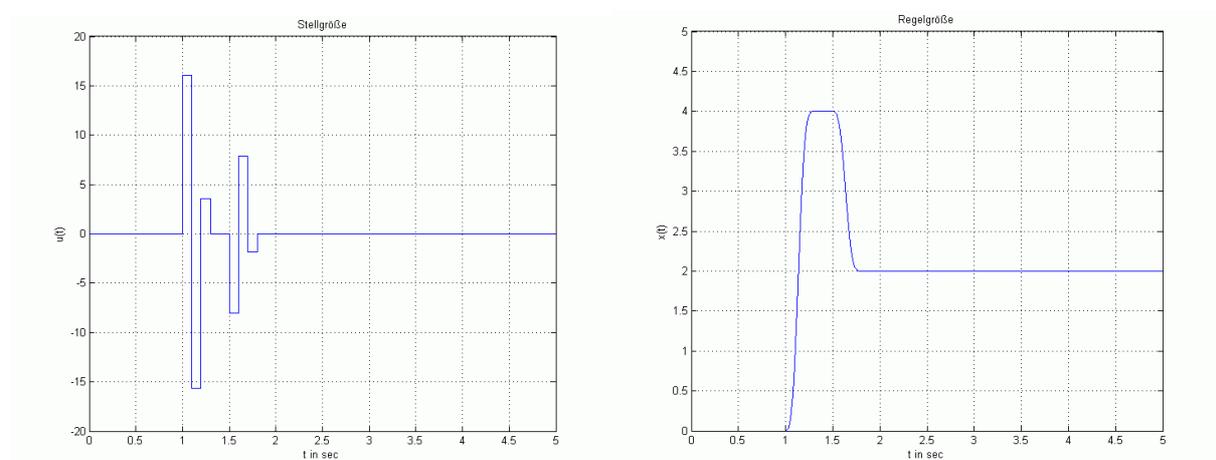
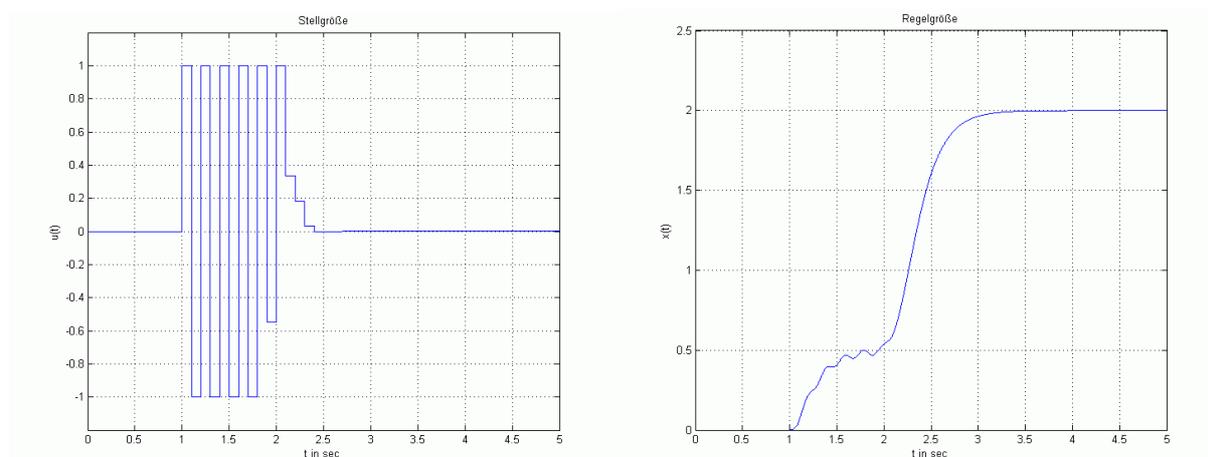


Abbildung 5-64: Stell- und Regelgrößenverlauf bei negativer Sollwertänderung mit Dead-Beat-Regler ohne Begrenzung

Wird der Regler auf  $\pm 1$  begrenzt sehen die Verläufe der stell- und Führungsgröße wie folgt aus.

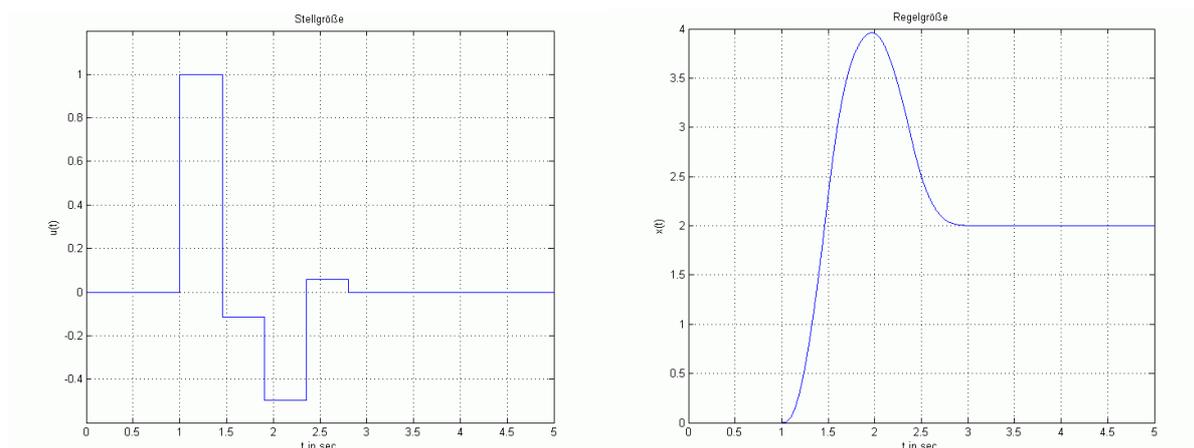


**Abbildung 5-65:** Stell- und Regelgrößenverlauf bei negativer Sollwertänderung mit Dead-Beat-Regler mit Begrenzung von  $\pm 1$

Der erste Sprung wird nur ansatzweise ausgeregelt. Der zweite Sollwert wird dagegen leichter erreicht.

### Stellgrößenbegrenzter Dead-Beat-Regler nach Strategie 1:

Wird das Regelverfahren der Abtastzeitenänderung gewählt, wird die Abtastzeit auf  $t_{neu} = 0.452$  verlängert. Der zweite Sprung erfolgt zum Zeitpunkt  $t = 1.904$  sec, also nach dem zweiten Abtastschritt. Da die Regelung noch nicht abgeschlossen ist und das System nicht in Ruhe ist, wird die Abtastzeit beibehalten. Da es nach der Sollwertänderung nicht zu einer weiteren Übersteuerung kommt, muss bei dem Kombinationsregler nicht noch die Strategie 2 gefahren werden, so dass die Regelung mit der Abtastzeitenverlängerung und die Regelung mit dem **Kombinationsregler** in diesem Fall identisch aussehen.

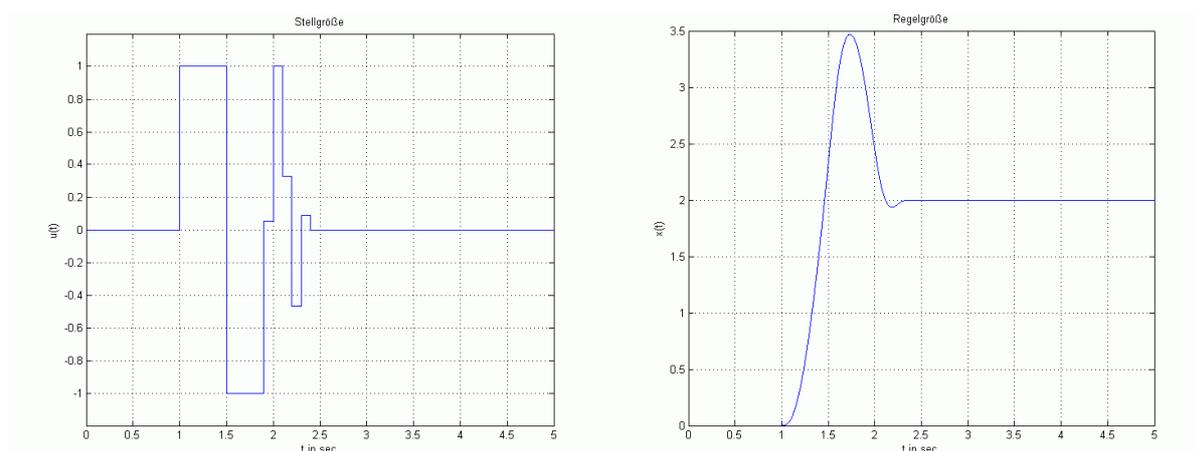


**Abbildung 5-66: Stell- und Regelgrößenverlauf bei negativer Sollwertänderung mit Regler nach Strategie 1 mit Begrenzung von  $\pm 1$**

Zu erkennen ist, dass nach der Sollwertänderung der Regler nicht, wie zu erwarten drei neue Stellgrößen benötigt, sondern nur zwei. Das ist jedoch nur zufällig bedingt. Wird der Regelgrößenverlauf betrachtet ist das System tatsächlich erst nach der Sollwertänderung in drei Abtastschritten ausgeregelt.

### Stellgrößenbegrenzter Dead-Beat-Regler nach Strategie 2:

Wird die Abtastzeit nicht verlängert, sondern nur der Sollwert entsprechend korrigiert, ergeben sich folgende Stell- und Regelgrößenverläufe.



**Abbildung 5-67: Stell- und Regelgrößenverlauf bei negativer Sollwertänderung mit Regler nach Strategie 2 mit Begrenzung von  $\pm 1$**

Eine Sollwertänderung wird im Regler sofort registriert und der Regler kann dementsprechend schnell reagieren. Allerdings gibt es aufgrund der starken Begrenzung der

negativen Stellamplitude, einen kleiner Überschwinger. Das System wird aber in endlicher Einstellzeit ausgeregelt.

### 5.3.3 Fall 3: Vorzeichenwechsel des Sollwertes während einer Regelung

Zunächst erfolgt aus der Ruhelage ein positiver Sollwertsprung von 0 auf 4 zum Zeitpunkt  $t = 1.0$  sec. Zum Zeitpunkt  $t = 1.5$  sec erfolgt ein Sprung der Höhe -8, so dass der Sollwert sein Vorzeichen ändert.

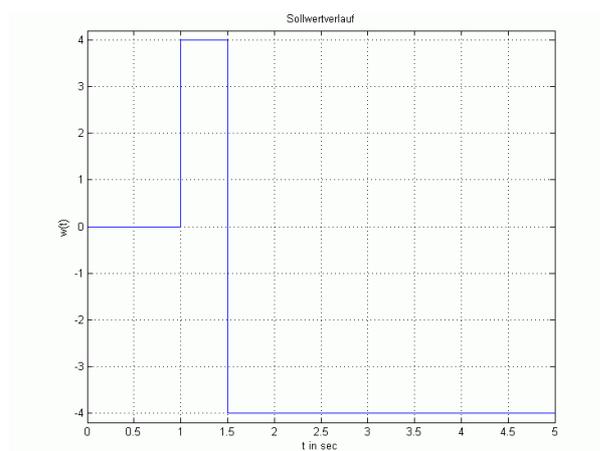


Abbildung 5-68: Vorzeichenwechsel des Sollwertes von 4 auf -4

Ist der Regler nicht begrenzt, wird der erste Sprung so schnell ausgeregelt, dass der zweite Sprung während einer Ruhelage stattfindet. Es erfolgen zwei Überführungsvorgänge, wobei das System von einer Ruhelage in eine andere Ruhelage überführt wird.

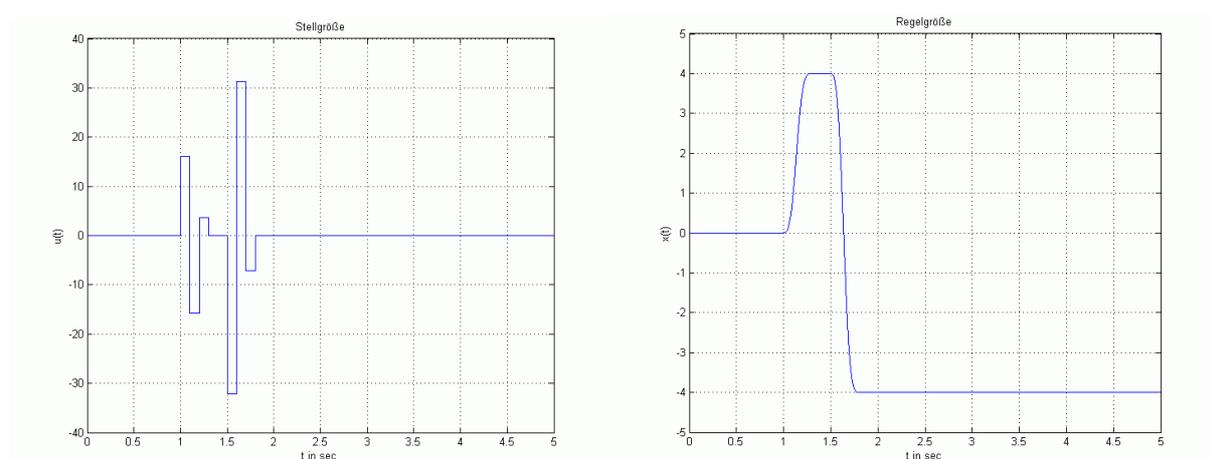
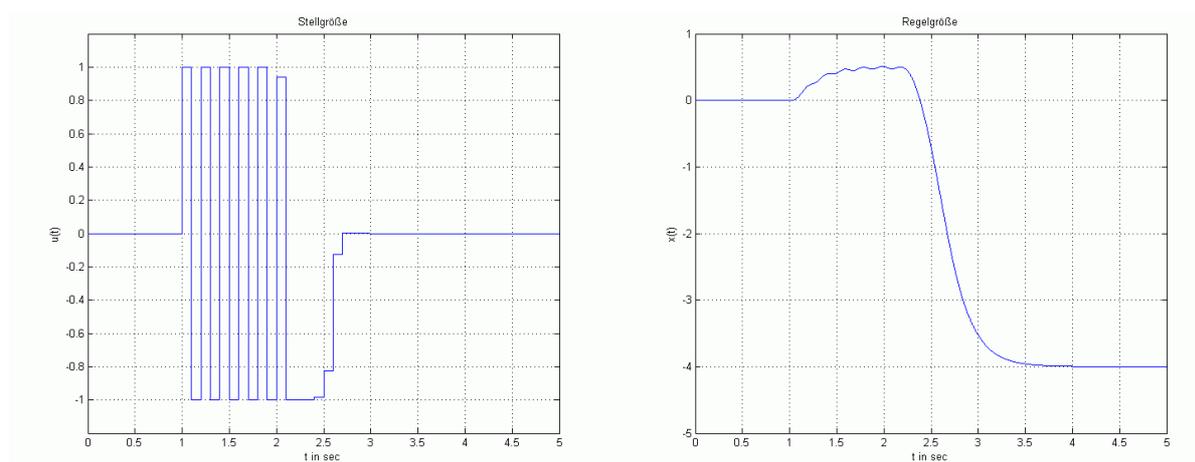


Abbildung 5-69: Stell- und Regelgrößenverlauf bei Vorzeichenwechsel des Sollwertes mit Dead-Beat-Regler ohne Begrenzung

Ist der Regler auf  $\pm 1$  begrenzt sehen die Verläufe der stell- und Führungsgröße wie folgt aus.

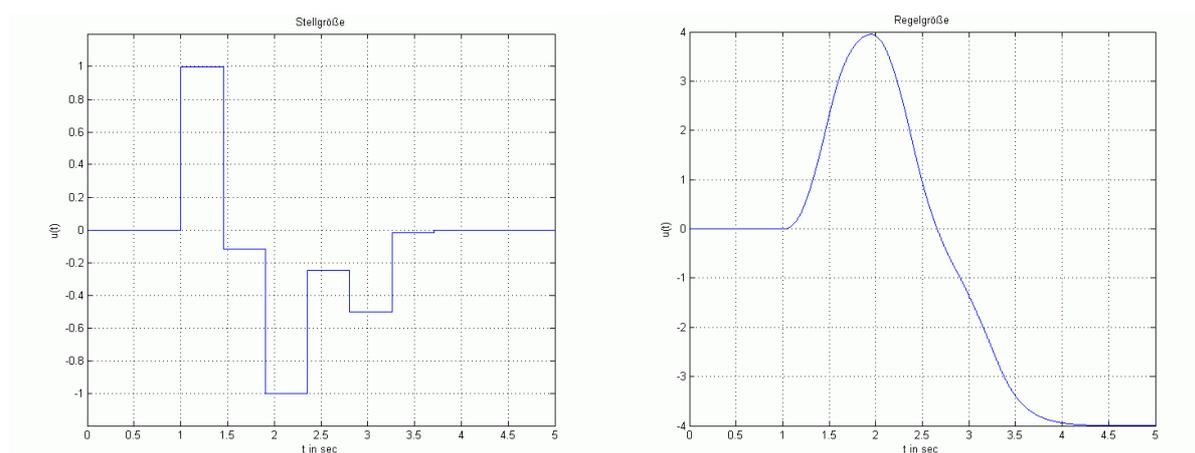


**Abbildung 5-70: Stell- und Regelgrößenverlauf bei Vorzeichenwechsel des Sollwertes mit Dead-Beat-Regler mit Begrenzung von  $\pm 1$**

Der positive Sprung kann nur ansatzweise geregelt werden. Die Sollwertänderung kann dagegen „glatter“ geregelt werden.

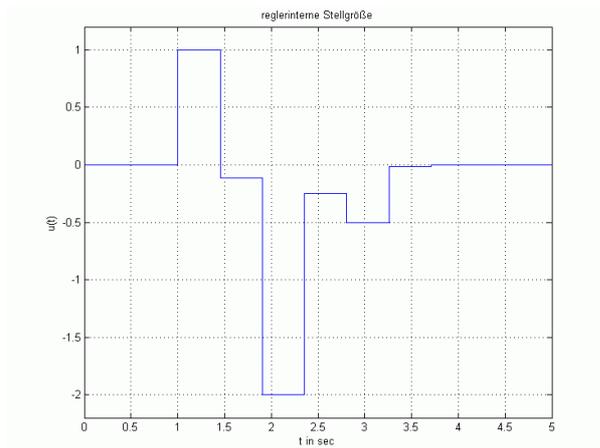
### Stellgrößenbegrenzter Dead-Beat-Regler nach Strategie 1:

Wird das Regelverfahren der Abtastzeitenänderung gewählt, wird die Abtastzeit auf  $t_{neu} = 0.452$  verlängert. Der zweite Sprung erfolgt erst zum Zeitpunkt  $t = 1.904$  sec. Die Regelung ist noch nicht abgeschlossen und die verlängerte Abtastzeit wird beibehalten.



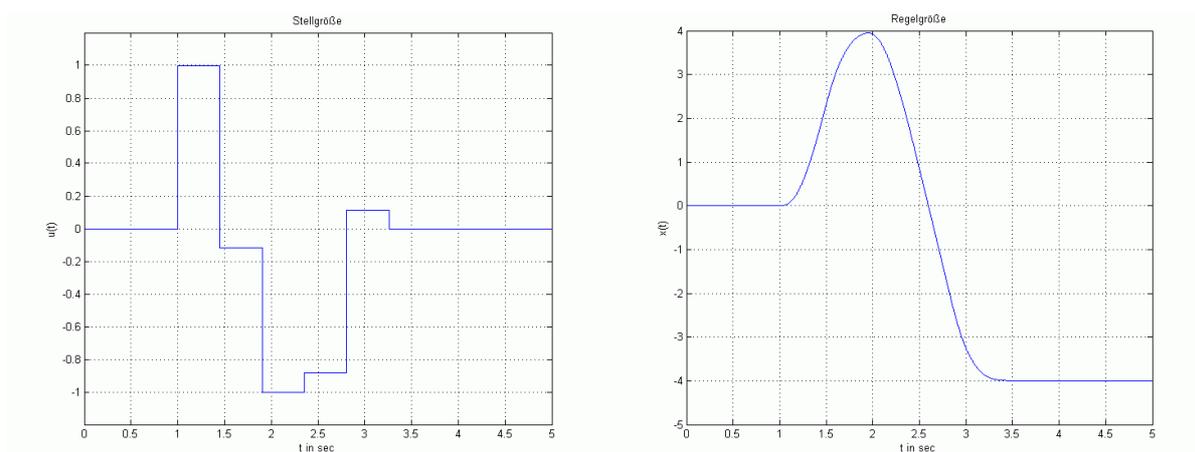
**Abbildung 5-71: Stell- und Regelgrößenverlauf bei Vorzeichenwechsel des Sollwertes mit Regler nach Strategie 1 mit Begrenzung von  $\pm 1$**

Nach der Sollwertänderung kommt es zu einer neuen Übersteuerung wie anhand des regelinternen Regelverlaufes zu erkennen ist.



**Abbildung 5-72: Reglerinterner Stellgrößenverlauf bei Vorzeichenwechsel des Sollwertes mit Regler nach Strategie 1 mit Begrenzung von  $\pm 1$**

Da sich das System nicht in Ruhe befand, kann die Abtastzeit nicht noch mal verlängert werden. Das System kann nicht mit endlicher Einstellzeit ausgeregelt werden. Um dieses Übersteuern zu vermeiden, arbeitet der **Kombinationsregler** bei einer zu großen Stellgröße, nachdem bereits die Abtastzeit verlängert wurde, mit der Sollwertkorrektur.

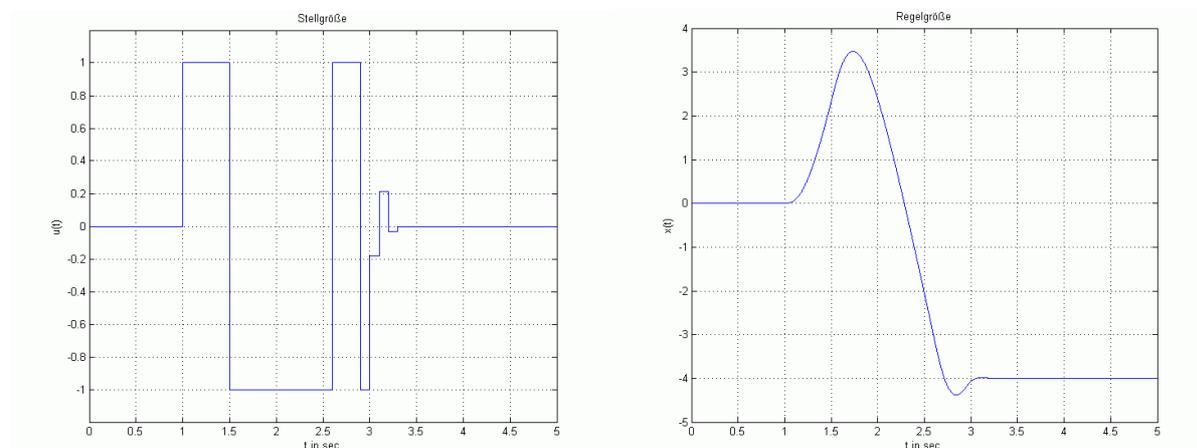


**Abbildung 5-73: Stell- und Regelgrößenverlauf bei Vorzeichenwechsel des Sollwertes mit Kombinationsregler mit Begrenzung von  $\pm 1$**

Durch die zusätzliche Sollwertkorrektur kann das System insgesamt schwingungsfrei ausgeregelt werden. Das Regelsystem weist Dead-Beat-Verhalten auf.

### Stellgrößenbegrenzter Dead-Beat-Regler nach Strategie 2:

Arbeitet der Regler nur mit der Sollwertkorrektur wird die Sollwertkorrektur sofort registriert. Der Regler kann schneller auf den zweiten Sprung reagieren.



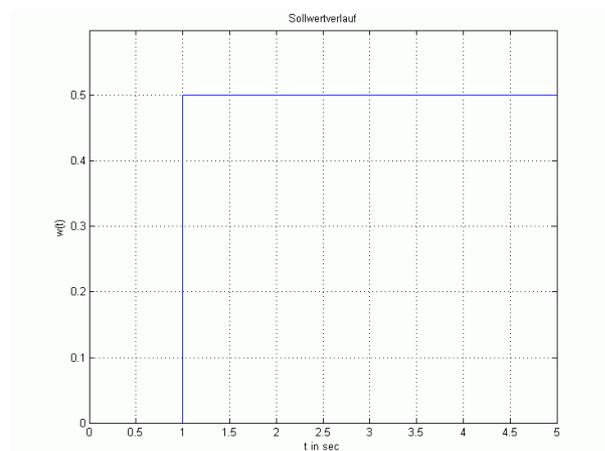
**Abbildung 5-74:** Stell- und Regelgrößenverlauf bei Vorzeichenwechsel des Sollwertes mit Regler nach Strategie 2 mit Begrenzung von  $\pm 1$

Hierbei kommt es zu zwei Überschwingern, wobei der zweite sehr klein ist. Das Regelsystem kann nicht schwingungsfrei aber in endlicher Einstellzeit ausgeregelt werden.

### 5.4 Vergleich der Regelgüte eines System mit einer $IT_2$ -Strecke anhand des Führungsverhalten für verschiedene feste Führungsgrößen

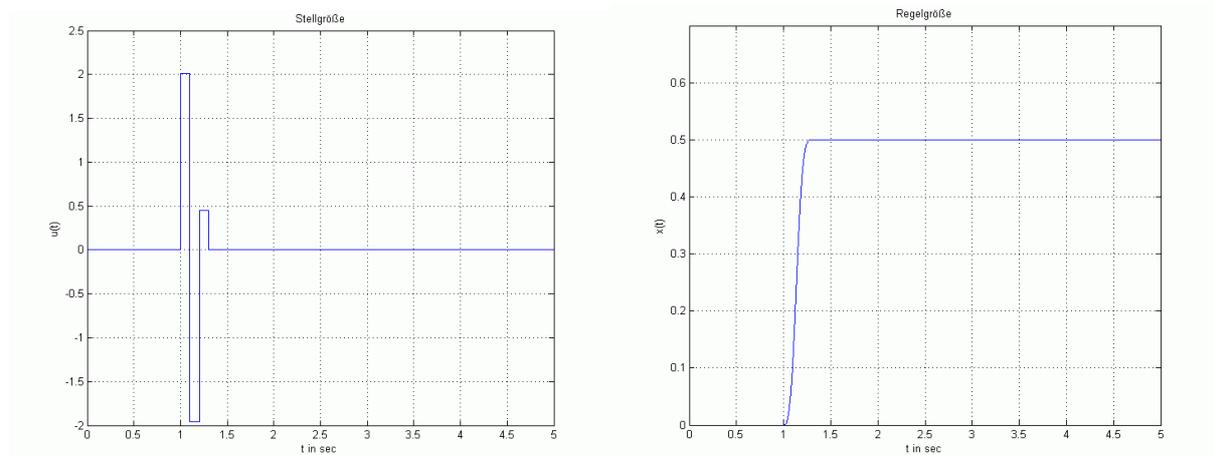
Es werden für vier Führungssprunghöhen die Regelgüten der Regelverfahren ermittelt und diese direkt in einem Diagramm über die Simulationszeit aufgezeigt.

Zum Zeitpunkt  $t = 1.0$  sec wird ein Sprung der Höhe 0.5 auf das System gegeben.



**Abbildung 5-75:** Einfacher Sprung von 0 auf 0.5

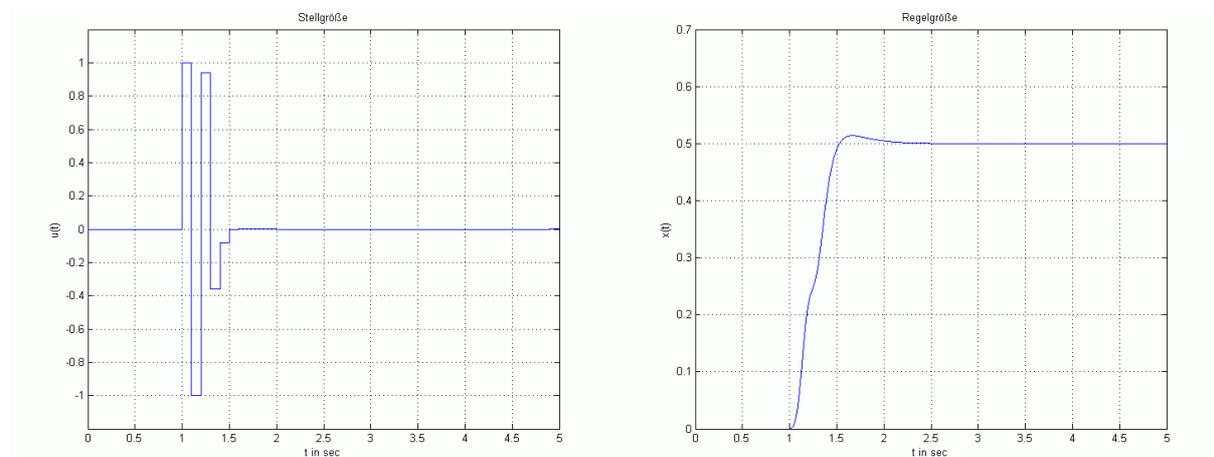
Für einen Dead-Beat-Regler für Führungsgrößen ohne begrenzte Stellgröße ergibt sich folgender Stell- und Regelgrößenverlauf.



**Abbildung 5-76:** Stell- und Regelgrößenverlauf mit Dead-Beat-Regler ohne Begrenzung bei einem Sprung der Höhe 0.5

Die erste Stellamplitude beträgt 2.010. Für diese Sprunghöhe ist die Begrenzung von  $\pm 1$  schwach.

### Begrenzter Dead-Beat-Regler:

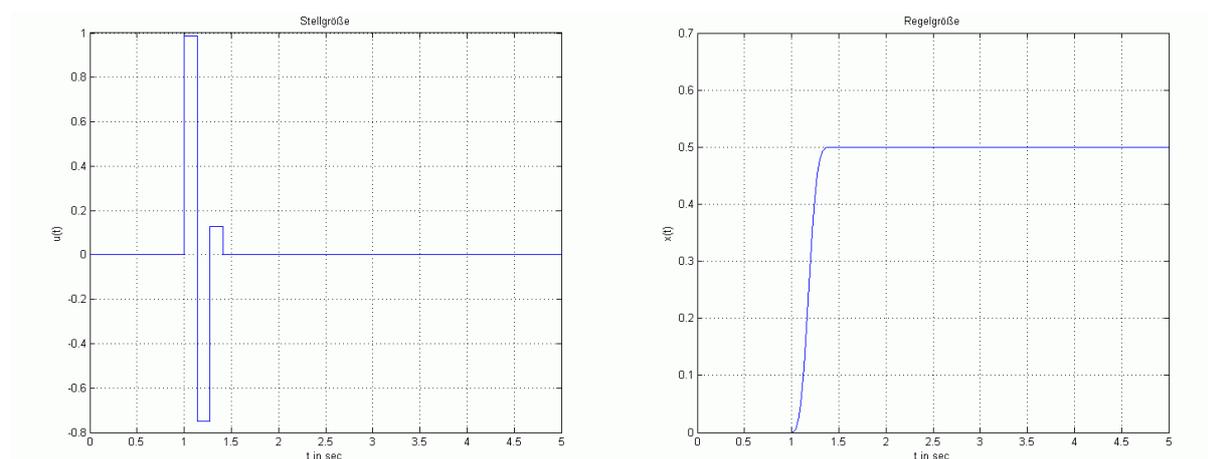


**Abbildung 5-77:** Stell- und Regelgrößenverlauf mit Dead-Beat-Regler mit Begrenzung von  $\pm 1$  bei einem Sprung der Höhe 0.5

Es kommt zu einem Überschwingler, der mit der Eigendynamik ausgeregelt

### Stellgrößenbegrenzter Dead-Beat-Regler nach Strategie 1:

Arbeitet der Regler nach Strategie 1 verlängert sich die Abtastzeit auf  $t_{neu} = 0.137$ , um die Stellamplitude innerhalb der Begrenzung zu halten. Der Regelverlauf des Kombinationsreglers und des Reglers nach Strategie 1 entsprechen einander.

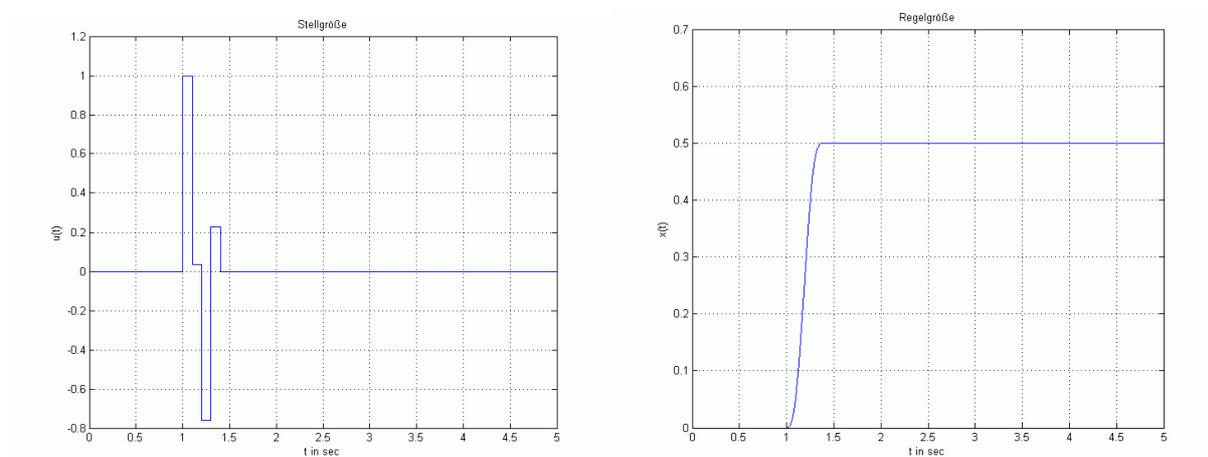


**Abbildung 5-78:** Stell- und Regelgrößenverlauf mit Regler nach Strategie 1 mit Begrenzung von  $\pm 1$  bei einem Sprung der Höhe 0.5

Die Regeldifferenz kann innerhalb von drei verlängerten Abtastschritten beseitigt werden. Der Sollwert ist nach 0.411 sec erreicht.

### Stellgrößenbegrenzter Dead-Beat-Regler nach Strategie 2:

Da es sich um eine schwache Begrenzung handelt, wird die Regelung um einen Abtastschritt verlängert, so dass die Regelung nach 0.4 sec abgeschlossen ist.



**Abbildung 5-79:** Stell- und Regelgrößenverlauf mit Regler nach Strategie 2 mit Begrenzung von  $\pm 1$  bei einem Sprung der Höhe 0.5

Insgesamt weist die Zustandsüberführung Dead-Beat-Verhalten auf.

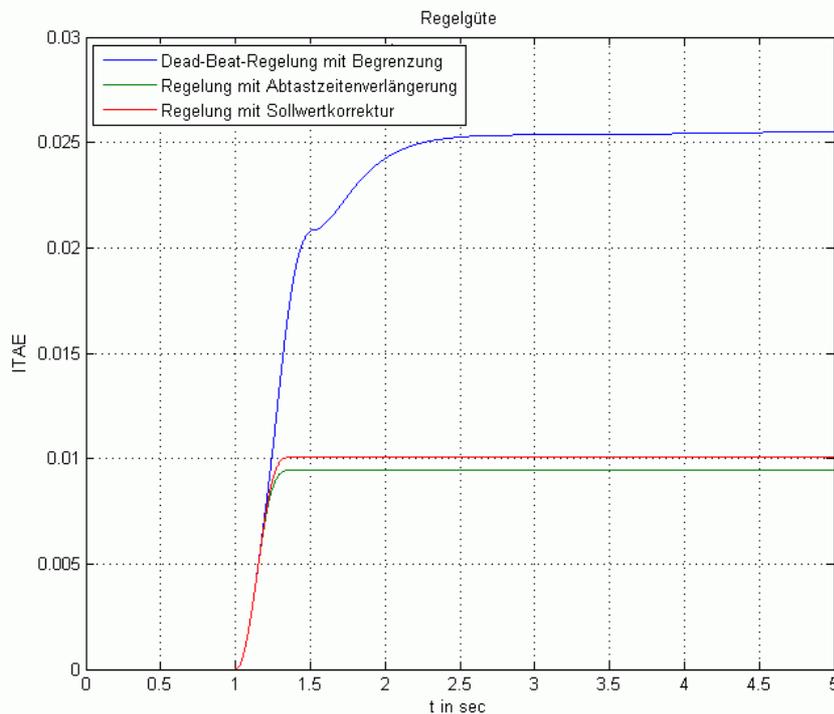


Abbildung 5-80: Vergleich der Regelgüten nach dem ITAE-Kriterium bei einem Sprung von 0 auf 0.5

Der Wert des ITAE ist für diese Sprunghöhe und dieser Begrenzung für die begrenzte Dead-Beat-Regelung am größten. Die Regelung mit Abtastzeitenkorrektur ist ein wenig optimaler als die Regelung mit Sollwertkorrektur.

Zum Zeitpunkt  $t = 1.0$  sec wird ein Sprung der Höhe 1.0 auf das System gegeben.

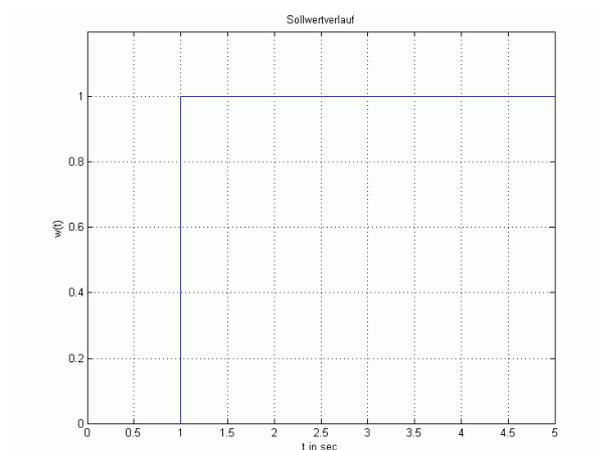
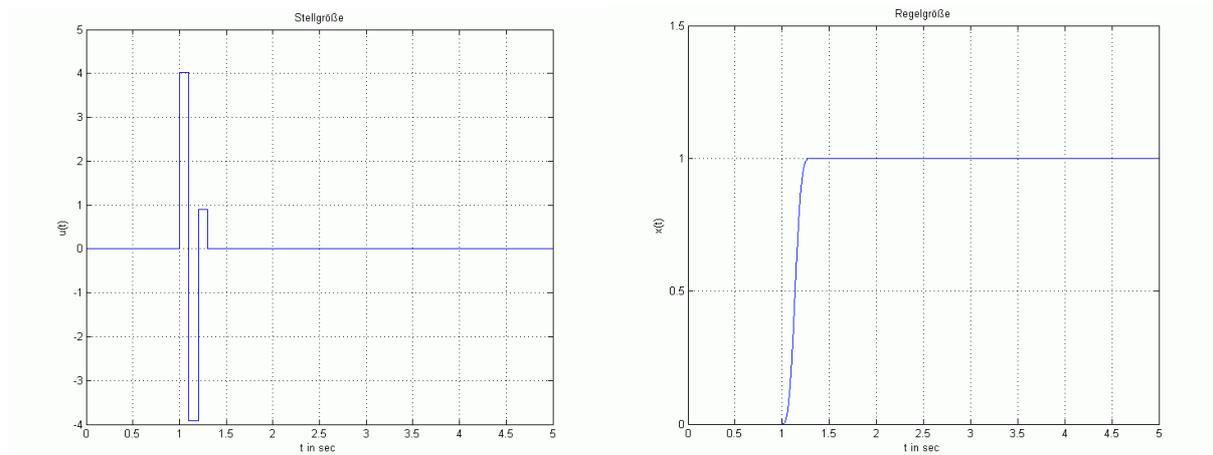


Abbildung 5-81: Einfacher Sprung von 0 auf 1

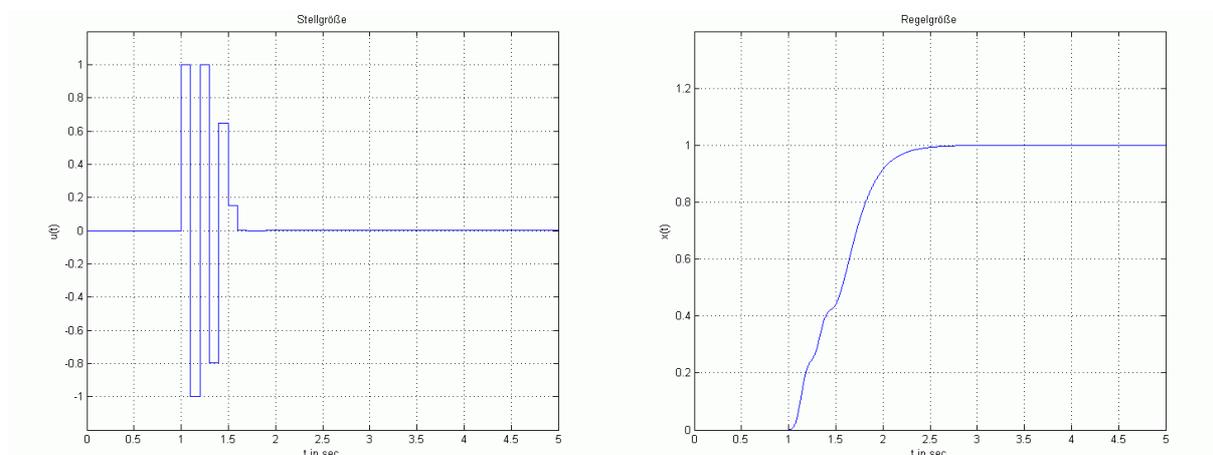
Für einen Dead-Beat-Regler für Führungsgrößen ohne begrenzte Stellgröße ergibt sich folgender Stell- und Regelgrößenverlauf.



**Abbildung 5-82:** Stell- und Regelgrößenverlauf mit Dead-Beat-Regler ohne Begrenzung bei einem Sprung der Höhe 1

Die erste Stellamplitude beträgt 4.021. Für diese Sprunghöhe handelt es sich bei einer Begrenzung von  $\pm 1$  um eine mittlere Begrenzung.

### Begrenzter Dead-Beat-Regler:

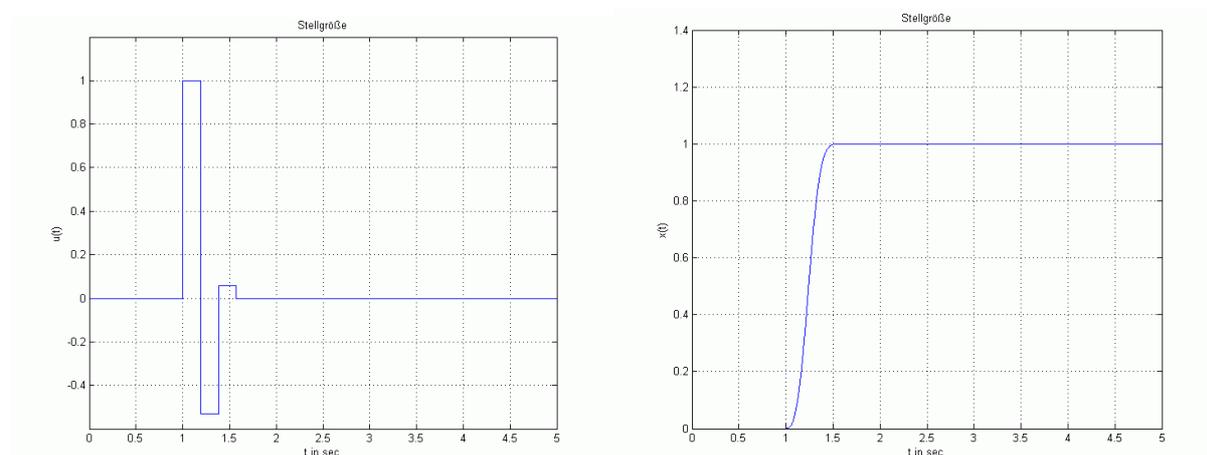


**Abbildung 5-83:** Stell- und Regelgrößenverlauf mit Dead-Beat-Regler mit Begrenzung von  $\pm 1$  bei einem Sprung der Höhe 1

Es kommt zu keinem Überschwingen, aber das System wird nur langsam ausgeregelt.

### Stellgrößenbegrenzter Dead-Beat-Regler nach Strategie 1:

Arbeitet der Regler nach Strategie 1 verlängert sich die Abtastzeit auf  $t_{neu} = 0.191 \text{ sec}$ , um die Stellamplitude innerhalb der Begrenzung zu halten. Der Regelverlauf des Kombinationsreglers und des Reglers nach Strategie 1 entsprechen einander.

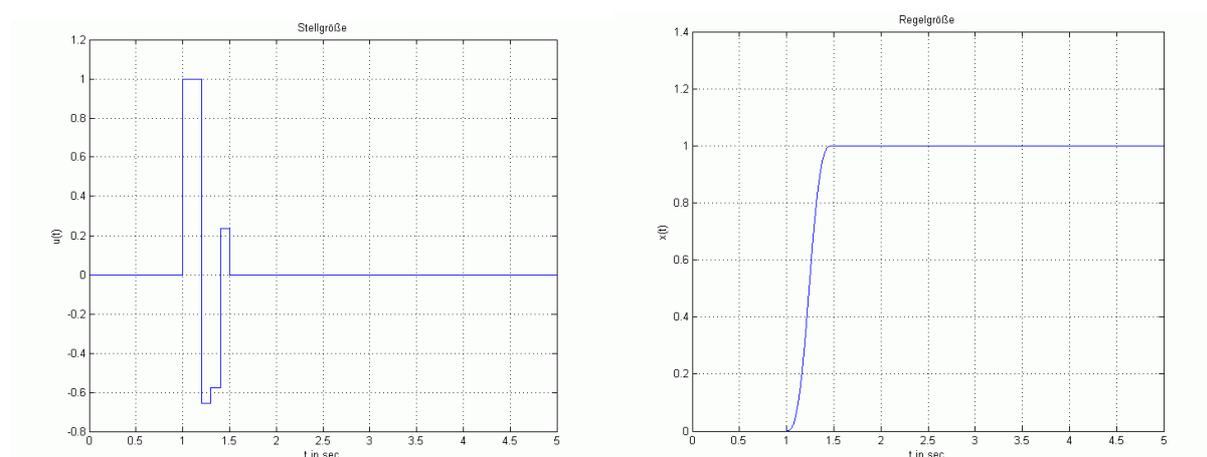


**Abbildung 5-84:** Stell- und Regelgrößenverlauf mit Regler nach Strategie 1 mit Begrenzung von  $\pm 1$  bei einem Sprung der Höhe 1

Der Sollwert ist nach 0.573 sec erreicht.

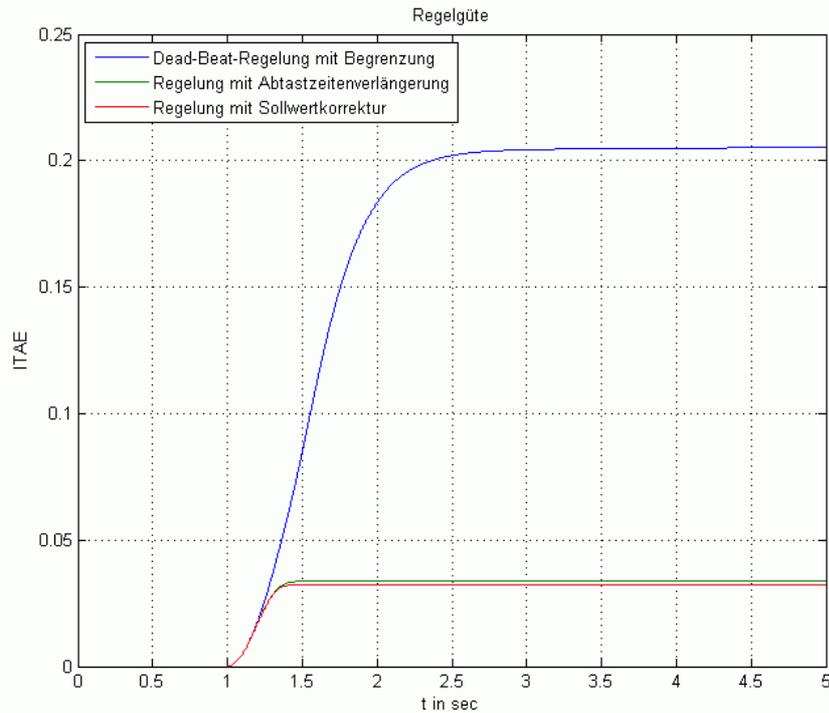
### Stellgrößenbegrenzter Dead-Beat-Regler nach Strategie 2:

Da es sich um eine mittlere Begrenzung handelt, wird die Regelung um zwei Abtastschritte verlängert, so dass die Regelung nach 0.5 sec abgeschlossen ist.



**Abbildung 5-85:** Stell- und Regelgrößenverlauf mit Regler nach Strategie 2 mit Begrenzung von  $\pm 1$  bei einem Sprung der Höhe 1

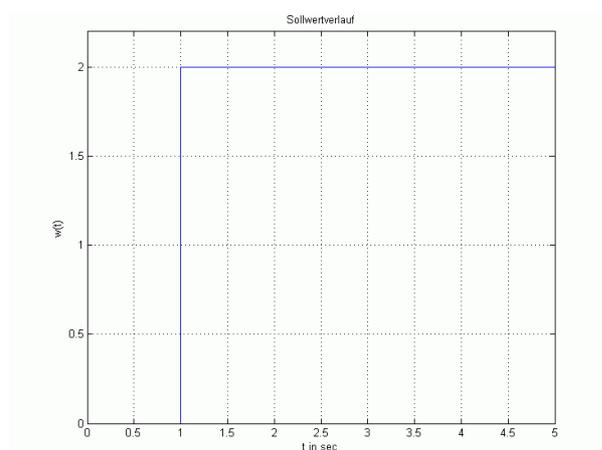
Das System wird schwingungsfrei ausgeregelt und weist Dead-Beat-Verhalten auf.



**Abbildung 5-86: Vergleich der Regelgüten nach dem ITAE-Kriterium bei einem Sprung von 0 auf 1**

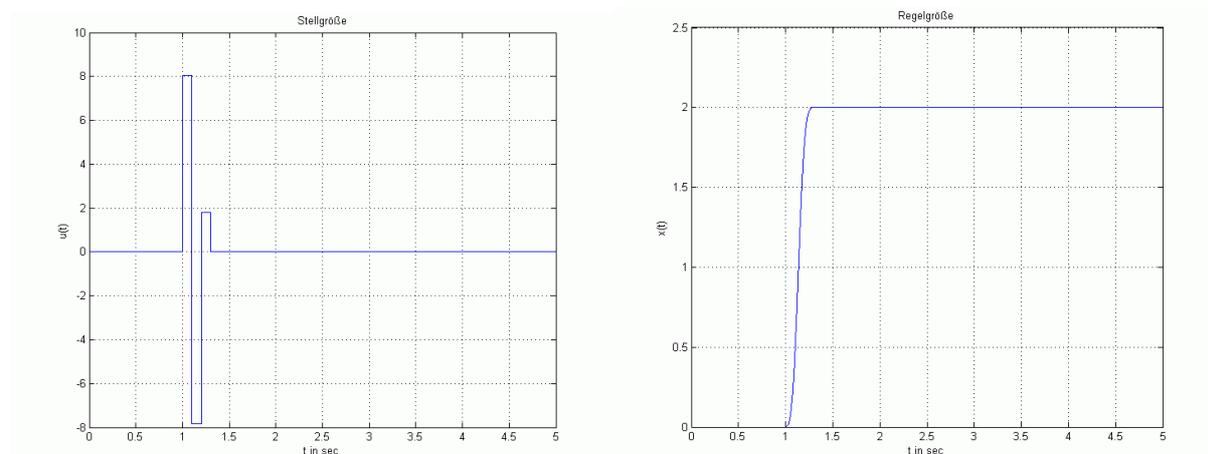
Wie zu erwarten, steigt der Wert des ITAE der begrenzten Dead-Beat-Regelung stark an, da der Sprung nur langsam ausgeregelt wird. Die Regelung mit Sollwertkorrektur und Abtastzeitenverlängerung sind fast gleichwertig. Die Regelung mit Sollwertkorrektur ist in diesem Fall ein wenig optimaler.

Zum Zeitpunkt  $t = 1.0$  sec wird ein Sprung der Höhe 2 auf das System gegeben.



**Abbildung 5-87: Einfacher Sprung von 0 auf 2**

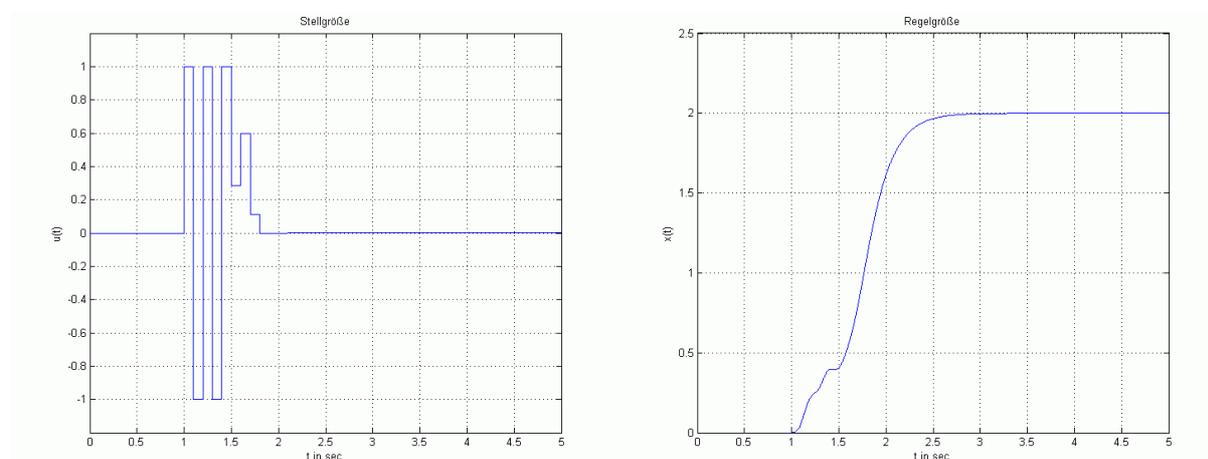
Für einen Dead-Beat-Regler für Führungsgrößen ohne begrenzte Stellgröße ergibt sich folgender Stell- und Regelgrößenverlauf.



**Abbildung 5-88:** Stell- und Regelgrößenverlauf mit Dead-Beat-Regler ohne Begrenzung bei einem Sprung der Höhe 2

Die erste Stellamplitude beträgt 8.041. Für diese Sprunghöhe handelt es sich bei einer Begrenzung von  $\pm 1$  um eine starke Begrenzung.

### Begrenzter Dead-Beat-Regler:

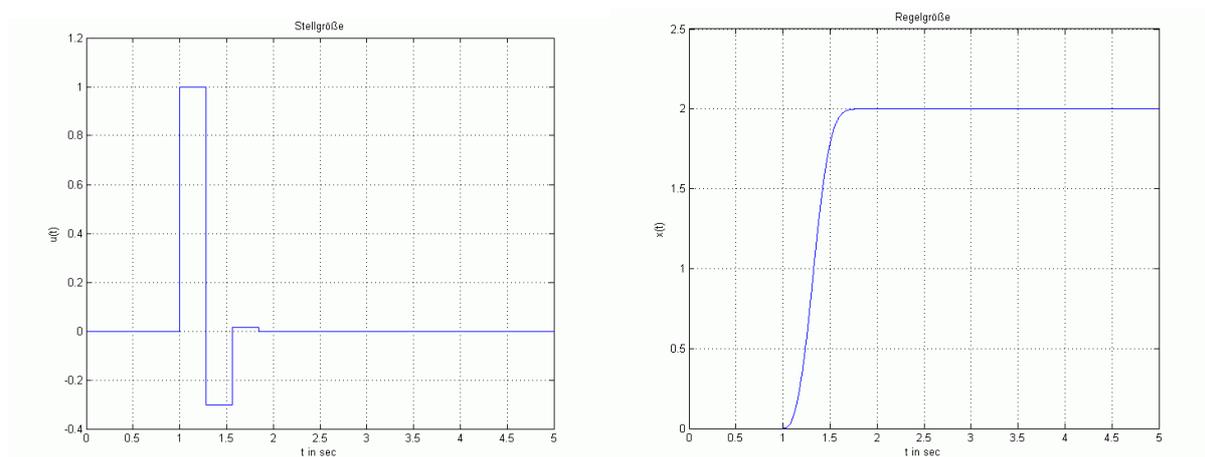


**Abbildung 5-89:** Stell- und Regelgrößenverlauf mit Dead-Beat-Regler mit Begrenzung von  $\pm 1$  bei einem Sprung der Höhe 2

Zu Beginn der Regelung verläuft der Regelgrößenverlauf wellig. Das System schwingt nicht über und der Sprung wird langsam ausgeregelt.

### Stellgrößenbegrenzter Dead-Beat-Regler nach Strategie 1:

Arbeitet der Regler nach Strategie 1 verlängert sich die Abtastzeit auf mehr als das doppelte  $t_{neu} = 0.282\text{sec}$ , um die Stellamplitude innerhalb der Begrenzung zu halten. Der Regelverlauf des Kombinationsreglers und des Reglers nach Strategie 1 entsprechen einander.

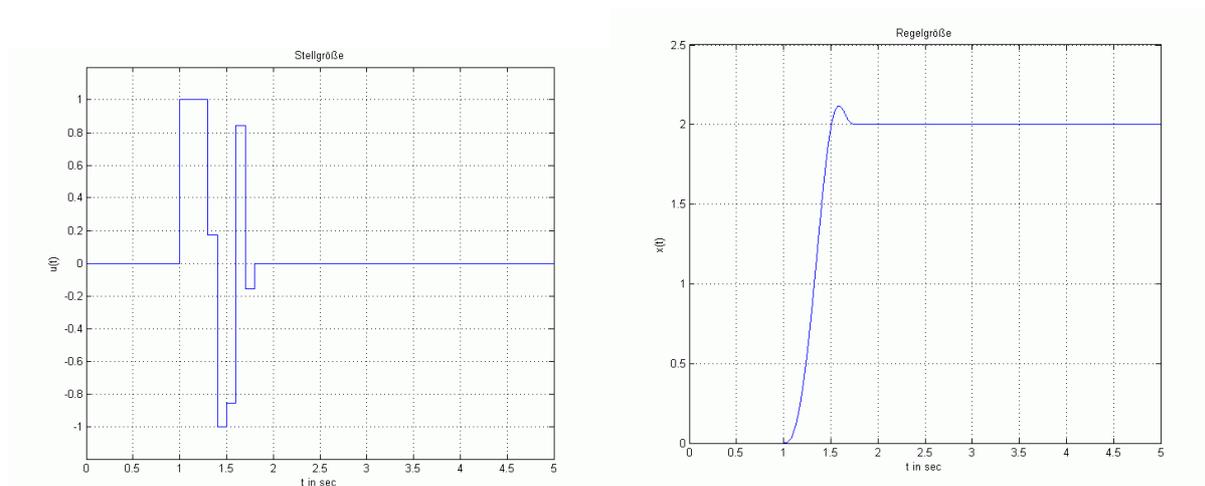


**Abbildung 5-90:** Stell- und Regelgrößenverlauf mit Regler nach Strategie 1 mit Begrenzung von  $\pm 1$  bei einem Sprung der Höhe 2

Der Sollwert ist nach 0.846 sec erreicht.

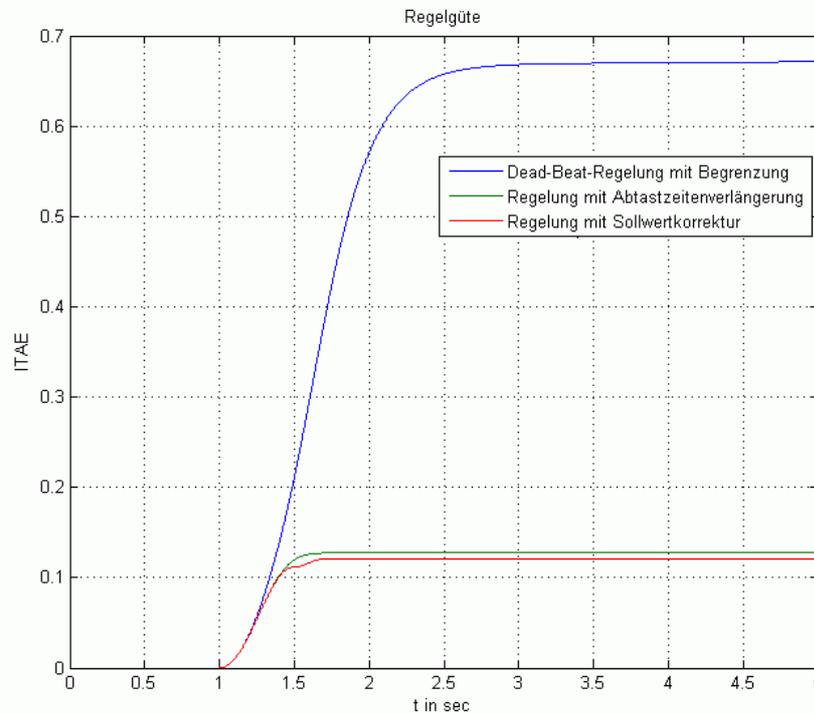
### Stellgrößenbegrenzter Dead-Beat-Regler nach Strategie 2:

Der Regler vergrößert die Schrittzahl. Insgesamt wird für die Gesamtregelung eine längere Einstellzeit zugelassen. Das Regelsystem benötigt 8 Abtastschritte, um den Sollwert zu erreichen.



**Abbildung 5-91:** Stell- und Regelgrößenverlauf mit Regler nach Strategie 2 mit Begrenzung von  $\pm 1$  bei einem Sprung der Höhe 2

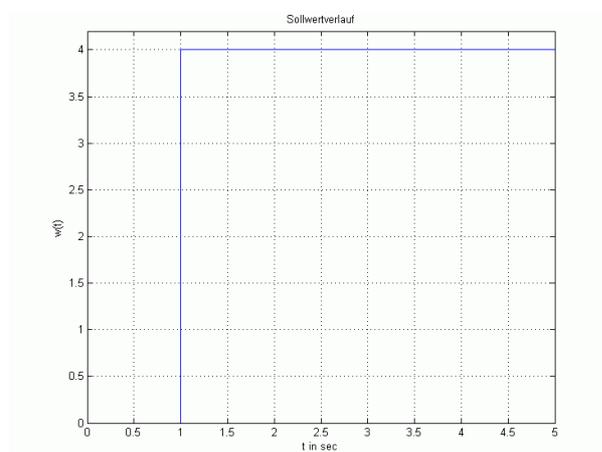
Da die negative Stellgrößenamplitude begrenzt ist, kann das System nicht mit der benötigten Amplitude abgebremst werden. Die Regelgröße schwingt einmal über. Das System wird aber mit endlicher Einstellzeit ausgeregelt.



**Abbildung 5-92: Vergleich der Regelgüten nach dem ITAE-Kriterium bei einem Sprung von 0 auf 2**

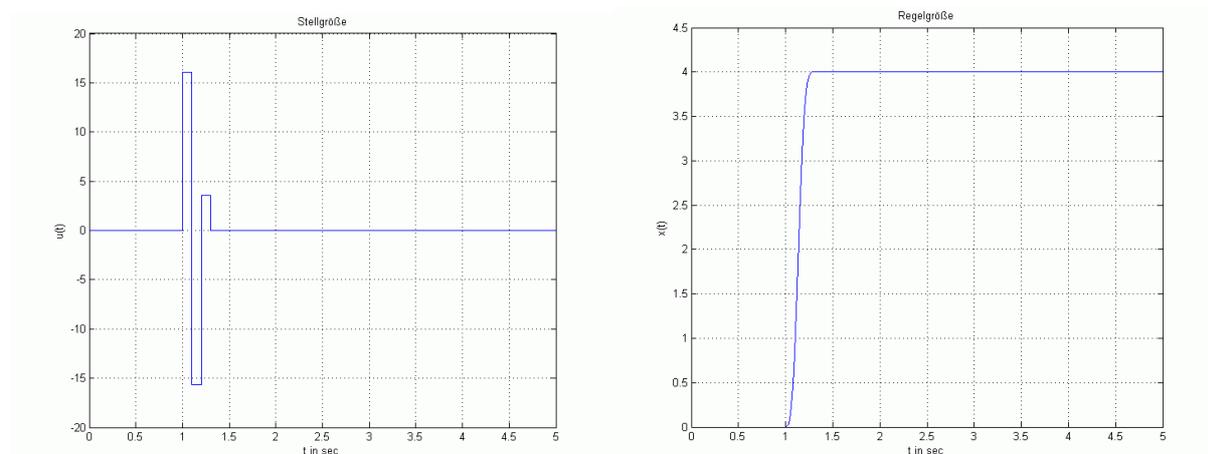
Die Dead-Beat-Regelung mit Begrenzung erweist sich wieder nach dem ITAE-Kriterium als schlechteste. Trotz des Überschingers ist die Regelung mit Sollwertkorrektur nach diesem Kriterium optimaler als die Regelung mit Abtastzeitenkorrektur, da diese den Sollwert etwas langsamer ausgeregelt.

Zum Zeitpunkt  $t = 1.0$  sec wird ein Sprung der Höhe 4.0 auf das System gegeben.



**Abbildung 5-93: Einfacher Sprung von 0 auf 4**

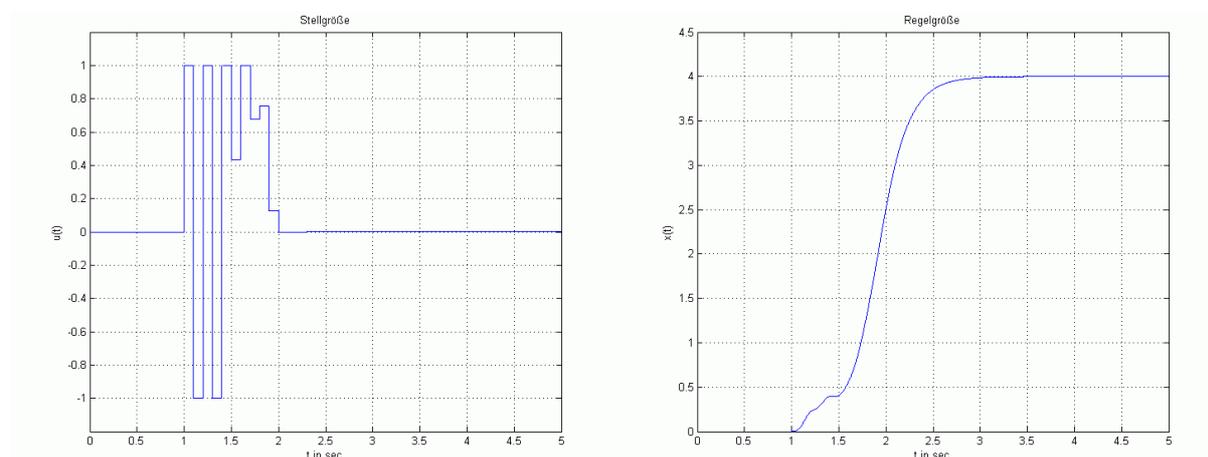
Für einen Dead-Beat-Regler für Führungsgrößen ohne begrenzte Stellgröße ergibt sich folgender Stell- und Regelgrößenverlauf.



**Abbildung 5-94:** Stell- und Regelgrößenverlauf mit Dead-Beat-Regler ohne Begrenzung bei einem Sprung der Höhe 4

Bei einer Abtastzeit von 0.1 sec werden die Stellgrößen sehr groß. Die erste Stellamplitude beträgt 16.082. Das Regelsystem wird, wie bei einem System 3. Ordnung zu erwarten ist, in drei Schritten exakt und schwingungsfrei ausgeregelt.

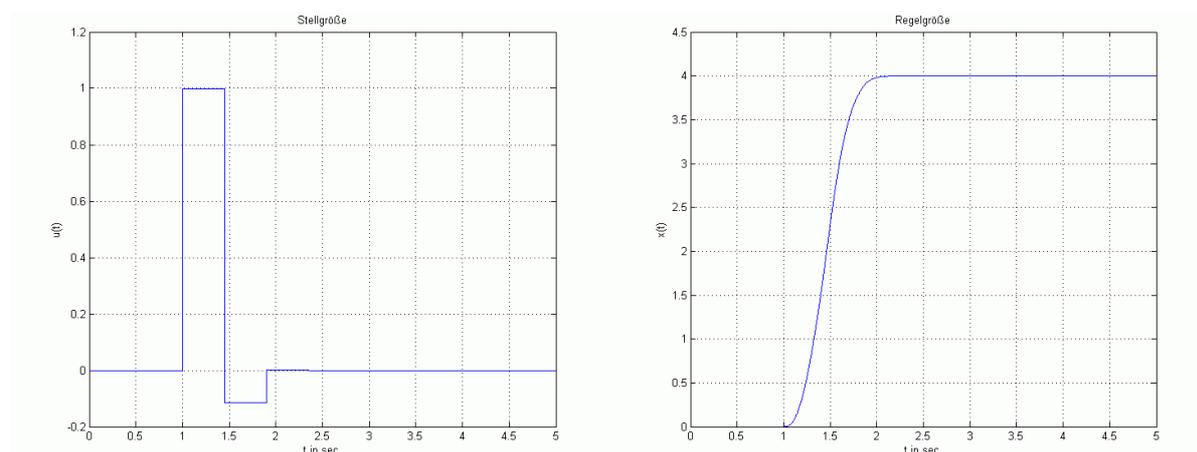
Eine Begrenzung von  $\pm 1$  ist eine sehr starke Begrenzung. Die Dead-Beat-Regelung für Führungsgrößen sieht bei dieser Begrenzung wie folgt aus.



**Abbildung 5-95:** Stell- und Regelgrößenverlauf mit Dead-Beat-Regler mit Begrenzung von  $\pm 1$  bei einem Sprung der Höhe 4

### Stellgrößenbegrenzter Dead-Beat-Regler nach Strategie 1:

Arbeitet der Regler nach Strategie 1 verlängert sich die Abtastzeit auf  $t_{neu} = 0.452$ , um die Stellamplitude innerhalb der Begrenzung zu halten. Da es während der Regelung nicht zu einer weiteren Übersteuerung kommt, arbeitet der Kombinationsregler genauso. Die Stell- und Regelgrößenverläufe sind bei beiden Reglern identisch.

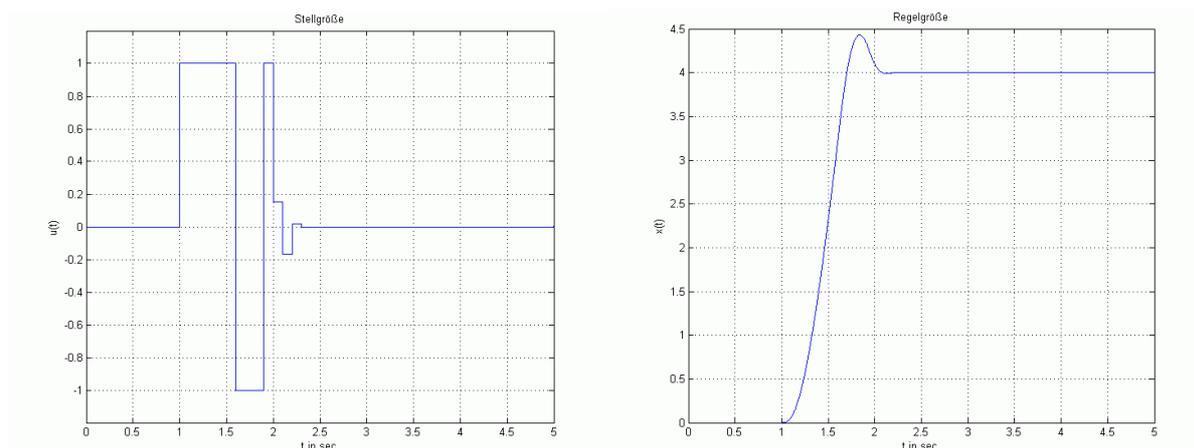


**Abbildung 5-96: Stell- und Regelgrößenverlauf mit Regler nach Strategie 1 mit Begrenzung von  $\pm 1$  bei einem Sprung der Höhe 4**

Das System kann in drei vergrößerten Abtastschritten endgültig ausgeregelt werden, so dass der Sollwert nach 1.356 sec erreicht ist.

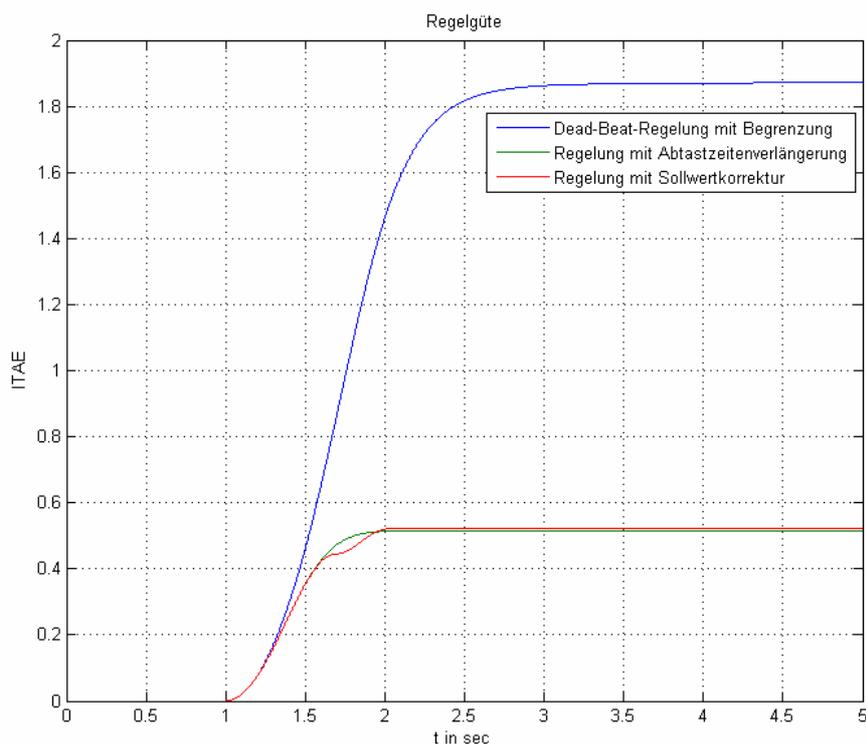
### Stellgrößenbegrenzter Dead-Beat-Regler nach Strategie 2:

Der Regler vergrößert die Schrittzahl. Insgesamt wird für die Gesamregelung eine längere Einstellzeit zugelassen. Das Regelsystem benötigt 13 Abtastschritte, um den Sollwert zu erreichen.



**Abbildung 5-97: Stell- und Regelgrößenverlauf mit Regler nach Strategie 2 mit Begrenzung von  $\pm 1$  bei einem Sprung der Höhe 4**

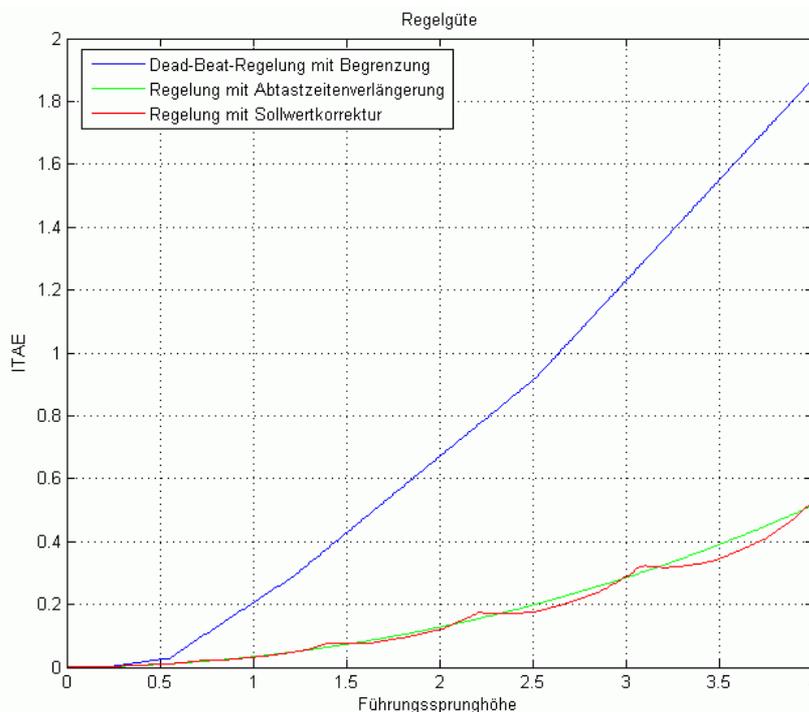
Es gibt zwei Überschwinger, wobei der zweite Überschwinger kaum sichtbar ist. Insgesamt weist die Regelung zwar kein Dead-Beat-Verhalten auf, allerdings wird das System in endlicher Einstellzeit ausgeregelt.



**Abbildung 5-98: Vergleich der Regelgüten nach dem ITAE-Kriterium bei einem Sprung von 0 auf 4**

Die Dead-Beat-Regelung mit Begrenzung weist nach dem ITAE-Kriterium die schlechteste Regelgüte auf. Durch den zweiten Überschwinger, der zwar sehr klein ist, steigt durch die zeitliche Gewichtung des Kriteriums der Wert des ITAE an. Nach dem ITAE-Kriterium ist die Regelung nach Strategie 1 ein wenig besser.

Folgend sind die Regelgüten nach einer Simulationszeit von 5 sec in Abhängigkeit der Sprunghöhe dargestellt. Die Führungssprunghöhe wird als Maß der Stärke der Begrenzung erfasst.



**Abbildung 5-99:** Regelgüte nach einer Simulationsdauer von 5 sec in Abhängigkeit der Führungssprunghöhe

Bei kleinen Führungssprüngen kommt es noch nicht zur Begrenzung. Daher sind die Regelgüten bei einer Führungssprunghöhe bis ca. 0.25 bei allen Regelungen gleich. Die Regelgütenverläufe der Regelung mit Abtastzeitenverlängerung und Regelung mit Sollwertkorrektur sind etwa gleichwertig. Durch die Sollwertkorrektur kann eine bestimmte Bandbreite von Führungssprüngen mit der gleichen Anzahl von Schritten ausgeregelt werden, während bei der Abtastzeitenverlängerung die Abtastzeit und somit die Ausregelzeit ziemlich genau auf eine Begrenzung angepasst wird. Das ITAE der Regelung mit Abtastzeitenverlängerung steigt daher, im Gegensatz zum ITAE der Regelung mit Sollwertkorrektur, gleichmäßiger, fast linear an. Daher fällt die Regelung mit Sollwertkorrektur meistens günstiger aus. Bei großen Führungssprüngen bzw. starker Begrenzung fällt die Regelung durch Sollwertkorrektur zum Teil wesentlich besser aus. Allerdings weist der Regelgütenverlauf der Regelung mit Sollwertkorrektur eine leichte Welligkeit auf. Dies liegt daran, dass es in Abhängigkeit der Führungssprunghöhe vorkommen kann, dass eine negative Stellgrößenamplitude so begrenzt wird, dass der Sollwert nach oben korrigiert werden muss und es zu unterschiedlich großen Überschwingern kommt. Da es sich um eine zeitgewichtete Regelgüte handelt, steigt das ITAE der Regelung

mit Sollwertkorrektur relativ stark an. In einigen Fällen fällt daher die Regelgüte der Regelung mit Abtastzeitenverlängerung günstiger aus, obwohl die Regelung mit der verlängerten Abtastzeit länger dauert. Im Vergleich zu diesen beiden Regelverfahren fällt die Dead-Beat-Regelung mit begrenzter Störgröße sehr ungünstig aus.

## 6 Zusammenfassung

Da bei einer Dead-Beat-Regelung, die für Führungssprünge ausgelegt ist, durch eine Regelausgangsbegrenzung das System nicht mehr in endlicher Einstellzeit ausregelt werden kann, wurde in dieser Diplomarbeit auf den Dead-Beat-Regelalgorithmus basierende Strategien entwickelt, um Regelstrecken trotz begrenzter Stellgröße in endlicher Einstellzeit auszuregeln.

Insgesamt wurden drei Strategien entwickelt: Abtastzeitenverlängerung, Sollwertkorrektur und Dead-Beat-Regelung für Störgrößen mit Korrekturglied. Da während eines dynamischen Zustandes die Abtastzeit nicht geändert werden kann, wurde außerdem ein aus Abtastzeitenverlängerung und Sollwertkorrektur kombinierter Regler entwickelt.

Zur Untersuchung und zum Vergleich wurden diese Strategien in MATLAB/ Simulink mit einer Embedded MATLAB Function realisiert und simuliert. Um die Regelverfahren direkt miteinander vergleichen zu können, wurde die Regelgüte nach dem ITAE-Kriterium ermittelt.

Der Dead-Beat-Regelung für Störgrößen mit Korrekturglied sind von vornherein Grenzen gesetzt, da auch dieser Dead-Beat-Regler ein strukturoptimierter Regler ist. In Abhängigkeit der Streckenparameter kann es dazukommen, dass der passende Regler instabil ist und somit nicht verwendbar ist, wie es auch in dieser Diplomarbeit für die  $IT_2$ -Strecke vorkam.

Obwohl bei der Dead-Beat-Regelung für Störgrößen mit Korrekturglied die Regelung nach endlichen Schritten beendet werden kann, weist diese jedoch aufgrund der zum Teil sehr hohen Schwingungen eine sehr schlechte Regelgüte auf. Die Stärke und Anzahl der Schwingen lässt sich schwer abschätzen, d. h. es lässt sich nicht voraussagen, in welcher Abhängigkeit diese zur Führungssprunghöhe stehen. Trotz der zum Teil anscheinend sogar schlechteren Regelgüte, als die der Dead-Beat-Regelung für Führungssprünge, bietet die Dead-Beat-Regelung für Störgrößen mit Korrekturglied gegenüber der Dead-Beat-Regelung für Führungssprünge Vorteile, da die Regelung nach endlichen Schritten abgeschlossen ist, so dass das ITAE zum Ende der Simulationszeit von 5sec einen endlichen Wert annimmt, während bei der Dead-Beat-Regelung für Führungsgrößen das ITAE zum Ende der Simulationszeit noch keinen Endwert angenommen hat.

Die Regelung nur mit Abtastzeitenverlängerung hat gegenüber der Regelung mit Sollwertkorrektur den Nachteil, dass es bei dynamischem Sollwertverlauf trotzdem zur Übersteuerung kommen kann, so dass der Regler zusätzlich mit einer Sollwertkorrektur arbeiten sollte (Kombinationsregler). Ein weiterer Nachteil ist außerdem der relativ hohe Rechenaufwand bei starker Begrenzung, der durch die Programmschleife zur sukzessiven Ermittlung der passenden Abtastzeit verursacht wird.

Nach den Regelgüten zu urteilen lässt sich nicht absolut aussagen, welches Regelverfahren am besten arbeitet. Mit zunehmender Begrenzung werden alle Regelverfahren allerdings schlechter. Die Regelung mit Abtastzeitenverlängerung und die Regelung mit Sollwertkorrektur sind etwa gleichwertig. Bei dem System 2. Ordnung mit PT<sub>2</sub>-Strecke zeigt die Regelung mit Sollwertkorrektur mit steigender Führungssprunghöhe eine etwas bessere Regelgüte, wobei bei dem System 3. Ordnung mit der IT<sub>2</sub>-Strecke sich keine klare Zuordnung und Abhängigkeit aussagen lässt. Es lässt sich also zusammenfassend sagen, dass es je nach Strecke zu untersuchen und zu entscheiden ist, welche Regelung eine besserer Regelgüte aufweist.

## 7 Literaturverzeichnis

- *Angerman, Anne; Beuschel, Michael; Rau, Martin; Wohlfarth, Ulrich*: „Matlab – Simulink – Stateflow: Grundlagen, Toolboxen, Beispiele“, 3., überarbeitete Auflage Oldenbourg Verlag München Wien 2004
- *Büttner Winfried*: „Digitale Regelungssysteme: Grundlagen zum Systementwurf“, 2., verbesserte Auflage. Friedr. Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH, Braunschweig 1991
- *Günther, Manfred*: „Zeitdiskrete Steuerungssysteme“, 2., bearbeitete Auflage. VEB Verlag Technik Berlin 1988
- *Junglas, Peter*: „Simulink – Eine multimediale Einführung“. <http://www.tu-harburg.de/rzt/tuinfo/software/numsoft/matlab/kurs/simulink/HTML> (01.07.2007)
- *Klinger, Hans-Gottfried*: Studienskript „Digitale Regelungstechnik“. HAW Hamburg Fachbereich E/I
- *Lutz, Holger und Wendt, Wolfgang*: „Taschenbuch der Regelungstechnik“, 2., überarbeitete und erweiterte Auflage. Thun und Frankfurt am Main; Verlag Harri Deutsch 1998
- *Webseite des Unternehmens*: „The MathWorks“ . <http://www.mathworks.com> (11.07.07)
- *Wikipedia*: „MATLAB“ <http://de.wikipedia.org/wiki/MATLAB> (01.07.2007)

## 8 Anhang

### 8.1 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1:	Regelkreis mit digitalem Regler .....	2
Abbildung 2-2:	Stell- und Regelgrößenverlauf bei unbegrenzter Stellgröße einer $PT_2$ -Strecke .....	7
Abbildung 2-3:	Stell- und Regelgrößenverlauf bei unbegrenzter Stellgröße einer $IT_2$ -Strecke .....	11
Abbildung 2-4:	Digitaler Regler .....	11
Abbildung 2-5:	Stell- und Regelgrößenverlauf bei begrenzter Stellgröße $u_{\max/\min} = \pm 3$ einer $PT_2$ -Strecke.....	12
Abbildung 2-6:	Stell- und Regelgrößenverlauf bei begrenzter Stellgröße $u_{\max/\min} = \pm 2$ einer $PT_2$ -Strecke.....	13
Abbildung 2-7:	Stell- und Regelgrößenverlauf bei begrenzter Stellgröße $u_{\max/\min} = \pm 0.5$ einer $PT_2$ -Strecke.....	13
Abbildung 2-8:	Stell- und Regelgrößenverlauf bei begrenzter Stellgröße $u_{\max/\min} = \pm 3$ einer $IT_2$ -Strecke.....	14
Abbildung 2-9:	Stell- und Regelgrößenverlauf bei begrenzter Stellgröße $u_{\max/\min} = \pm 2$ einer $IT_2$ -Strecke.....	14
Abbildung 2-10:	Stell- und Regelgrößenverlauf bei begrenzter Stellgröße $u_{\max/\min} = \pm 0.5$ einer $IT_2$ -Strecke.....	14
Abbildung 3-1:	Stell- und Regelgrößenverlauf bei begrenzter Stellgröße $u_{\max/\min} = \pm 3$ eines Dead-Beat-Reglers nach Strategie 1 für eine $PT_2$ -Strecke .....	17
Abbildung 3-2:	Stell- und Regelgrößenverlauf bei begrenzter Stellgröße $u_{\max/\min} = \pm 2$ eines Dead-Beat-Reglers nach Strategie 1 für eine $PT_2$ -Strecke .....	18
Abbildung 3-3:	Stell- und Regelgrößenverlauf bei begrenzter Stellgröße $u_{\max/\min} = \pm 0.5$ eines Dead-Beat-Reglers nach Strategie 1 für eine $PT_2$ -Strecke .....	19
Abbildung 3-4:	Stell- und Regelgrößenverlauf bei begrenzter Stellgröße $u_{\max/\min} = \pm 3$ eines Dead-Beat-Reglers nach Strategie 1 für eine $IT_2$ -Strecke .....	20
Abbildung 3-5:	Stell- und Regelgrößenverlauf bei begrenzter Stellgröße $u_{\max/\min} = \pm 2$ eines Dead-Beat-Reglers nach Strategie 1 für eine $IT_2$ -Strecke .....	20
Abbildung 3-6:	Stell- und Regelgrößenverlauf bei begrenzter Stellgröße $u_{\max/\min} = \pm 0.5$ eines Dead-Beat-Reglers nach Strategie 1 für eine $IT_2$ -Strecke .....	21
Abbildung 3-7:	Stell- und Regelgrößenverlauf bei begrenzter Stellgröße $u_{\max/\min} = \pm 3$ eines Dead-Beat-Reglers nach Strategie 2 für eine $PT_2$ -Strecke .....	24
Abbildung 3-8:	Stell- und Regelgrößenverlauf bei begrenzter Stellgröße $u_{\max/\min} = \pm 2$ eines Dead-Beat-Reglers nach Strategie 2 für eine $PT_2$ -Strecke .....	25

Abbildung 3-9:	Stell- und Regelgrößenverlauf bei begrenzter Stellgröße $u_{\max/\min} = \pm 0.5$ eines Dead-Beat-Reglers nach Strategie 2 für eine $PT_2$ -Strecke .....	26
Abbildung 3-10:	Stell- und Regelgrößenverlauf bei begrenzter Stellgröße $u_{\max/\min} = \pm 3$ eines Dead-Beat-Reglers nach Strategie 2 für eine $IT_2$ -Strecke .....	27
Abbildung 3-11:	Stell- und Regelgrößenverlauf bei begrenzter Stellgröße $u_{\max/\min} = \pm 2$ eines Dead-Beat-Reglers nach Strategie 2 für eine $IT_2$ -Strecke .....	28
Abbildung 3-12:	Stell- und Regelgrößenverlauf bei begrenzter Stellgröße $u_{\max/\min} = \pm 0.5$ eines Dead-Beat-Reglers nach Strategie 2 für eine $IT_2$ -Strecke .....	29
Abbildung 3-13:	Regelkreis mit digitalem Regler und Störung .....	31
Abbildung 3-14:	Digitaler Regelkreis mit Dead-Beat-Regler für Störgrößen und Korrekturglied .....	32
Abbildung 3-15:	Stell- und Regelgrößenverlauf bei unbegrenzter Stellgröße eines Dead-Beat-Reglers für Störgrößen zur Regelung einer $PT_2$ -Strecke .....	33
Abbildung 3-16:	Stell- und Regelgrößenverlauf bei begrenzter Stellgröße $u_{\max/\min} = \pm 3$ eines Dead-Beat-Reglers für Störgrößen zur Regelung einer $PT_2$ -Strecke .....	34
Abbildung 3-17:	Stell- und Regelgrößenverlauf bei begrenzter Stellgröße $u_{\max/\min} = \pm 2$ eines Dead-Beat-Reglers für Störgrößen zur Regelung einer $PT_2$ -Strecke .....	34
Abbildung 3-18:	Stell- und Regelgrößenverlauf bei begrenzter Stellgröße $u_{\max/\min} = \pm 0.5$ eines Dead-Beat-Reglers für Störgrößen zur Regelung einer $PT_2$ -Strecke .....	35
Abbildung 3-19:	Stell- und Regelgrößenverlauf bei unbegrenzter Stellgröße eines Dead-Beat-Reglers für Störgrößen zur Regelung einer $IT_2$ -Strecke .....	36
Abbildung 4-1:	Dialogfenster zur Parametrierung des Reglers .....	38
Abbildung 4-2:	Dialogfenster zum Einstellen der Abtastzeit .....	38
Abbildung 4-3:	Simulationsmodell des Regelkreises mit Dead-Beat-Regler für eine $PT_2$ -Strecke .....	39
Abbildung 4-4:	Simulationsmodell des Regelkreises mit Dead-Beat-Regler für eine $IT_2$ -Strecke .....	39
Abbildung 4-5:	Reglerblock in der ersten Ebene.....	39
Abbildung 4-6:	Reglerblock in der zweiten Ebene .....	40
Abbildung 4-7:	Aufbau des Triggers .....	40
Abbildung 4-8:	Triggersignal .....	41
Abbildung 4-9:	Aufbau des Speichers .....	42
Abbildung 4-10:	Aufbau des Subsystems zur Parameterübergabe.....	42
Abbildung 4-11:	Dialogfenster zur Eingabe des Konstantenwertes.....	42
Abbildung 4-12:	Simulationsmodell zur Regelung einer $PT_2$ -Strecke mit dem Regler nach Strategie 1	43
Abbildung 4-13:	Eingabemaske des Subsystems zur Regelung einer $PT_2$ -Strecke nach Strategie 1 .....	43
Abbildung 4-14:	Simulationsmodell zur Regelung einer $IT_2$ -Strecke mit dem Regler nach Strategie 1	44
Abbildung 4-15:	Eingabemaske des Subsystems zur Regelung einer $IT_2$ -Strecke nach Strategie 1 .....	44
Abbildung 4-16:	Simulationsmodell zur Regelung einer $PT_2$ -Strecke mit dem Regler nach Strategie 2	45
Abbildung 4-17:	Eingabemaske des Subsystems zur Regelung einer $PT_2$ -Strecke nach Strategie 2 .....	46
Abbildung 4-18:	Simulationsmodell zur Regelung einer $IT_2$ -Strecke mit dem Regler nach Strategie 2	46
Abbildung 4-19:	Eingabemaske des Subsystems zur Regelung einer $IT_2$ -Strecke nach Strategie 2 .....	47

Abbildung 4-20:	Regelkreis mit Dead-Beat-Regler für Störgrößen und Korrekturglied zur Regelung einer $PT_2$ -Strecke.....	47
Abbildung 4-21	Simulationsmodell zur Regelung einer $PT_2$ -Strecke mit dem Kombinationsregler ....	48
Abbildung 4-22:	Eingabemaske des Subsystems zur Regelung einer $PT_2$ -Strecke mit Kombinationsregler .....	49
Abbildung 4-23:	Simulationsmodell zur Regelung einer $IT_2$ -Strecke mit dem Kombinationsregler .....	49
Abbildung 4-24:	Eingabemaske des Subsystems zur Regelung einer $IT_2$ -Strecke mit Kombinationsregler .....	50
Abbildung 5-1:	Aufbau zur Ermittlung des ITAE .....	51
Abbildung 5-2:	Positive Sollwertänderung von 1 auf 2.....	52
Abbildung 5-3:	Stell- und Regelgrößenverlauf bei positiver Sollwertänderung mit Dead-Beat-Regler ohne Begrenzung .....	53
Abbildung 5-4:	Stell- und Regelgrößenverlauf bei positiver Sollwertänderung mit Dead-Beat-Regler mit Begrenzung von $\pm 1$ .....	53
Abbildung 5-5:	Stell- und Regelgrößenverlauf bei positiver Sollwertänderung mit Dead-Beat-Regler für Störgrößen mit Begrenzung von $\pm 1$ .....	54
Abbildung 5-6:	Stell- und Regelgrößenverlauf bei positiver Sollwertänderung mit Regler nach Strategie 1 mit Begrenzung von $\pm 1$ .....	54
Abbildung 5-7:	Reglerinterner Stellgrößenverlauf bei positiver Sollwertänderung mit Regler nach Strategie 1 mit einer Begrenzung von $\pm 1$ .....	55
Abbildung 5-8:	Stell- und Regelgrößenverlauf bei positiver Sollwertänderung mit Kombinationsregler mit Begrenzung von $\pm 1$ .....	55
Abbildung 5-9:	Stell- und Regelgrößenverlauf bei positiver Sollwertänderung mit Regler nach Strategie 2 mit Begrenzung von $\pm 1$ .....	56
Abbildung 5-10:	Negative Sollwertänderung von 2 auf 1 .....	56
Abbildung 5-11:	Stell- und Regelgrößenverlauf bei negativer Sollwertänderung mit Dead-Beat-Regler ohne Begrenzung .....	57
Abbildung 5-12:	Stell- und Regelgrößenverlauf bei negativer Sollwertänderung mit Dead-Beat-Regler mit Begrenzung von $\pm 1$ .....	57
Abbildung 5-13:	Stell- und Regelgrößenverlauf bei negativer Sollwertänderung mit Dead-Beat-Regler für Störgrößen mit Begrenzung von $\pm 1$ .....	58
Abbildung 5-14:	Stell- und Regelgrößenverlauf bei negativer Sollwertänderung mit Regler nach Strategie 1 mit Begrenzung von $\pm 1$ .....	58
Abbildung 5-15:	Stell- und Regelgrößenverlauf bei negativer Sollwertänderung mit Regler nach Strategie 2 mit Begrenzung von $\pm 1$ .....	59
Abbildung 5-16:	Vorzeichenwechsel des Sollwertes von 1 auf -1 .....	59
Abbildung 5-17:	Stell- und Regelgrößenverlauf bei Vorzeichenwechsel des Sollwertes mit Dead-Beat-Regler ohne Begrenzung .....	60
Abbildung 5-18:	Stell- und Regelgrößenverlauf bei Vorzeichenwechsel des Sollwertes mit Dead-Beat-Regler mit Begrenzung von $\pm 1$ .....	60

Abbildung 5-19:	Stell- und Regelgrößenverlauf bei Vorzeichenwechsel des Sollwertes mit Dead-Beat-Regler für Störgrößen mit Begrenzung von $\pm 1$ .....	61
Abbildung 5-20:	Stell- und Regelgrößenverlauf bei Vorzeichenwechsel des Sollwertes mit Regler nach Strategie 1 mit Begrenzung von $\pm 1$ .....	61
Abbildung 5-21:	Reglerinterner Stellgrößenverlauf bei Vorzeichenwechsel des Sollwertes mit Regler nach Strategie 1 mit Begrenzung von $\pm 1$ .....	62
Abbildung 5-22:	Stell- und Regelgrößenverlauf bei Vorzeichenwechsel des Sollwertes mit Kombinationsregler mit Begrenzung von $\pm 1$ .....	62
Abbildung 5-23:	Stell- und Regelgrößenverlauf bei Vorzeichenwechsel des Sollwertes mit Regler nach Strategie 2 mit Begrenzung von $\pm 1$ .....	63
Abbildung 5-24:	Einfacher Sprung von 0 auf 0.5 .....	63
Abbildung 5-25:	Stell- und Regelgrößenverlauf mit Dead-Beat-Regler ohne Begrenzung bei einem Sprung der Höhe 0.5.....	64
Abbildung 5-26:	Stell- und Regelgrößenverlauf mit Dead-Beat-Regler mit Begrenzung von $\pm 1$ bei einem Sprung der Höhe 0.5.....	64
Abbildung 5-27:	Stell- und Regelgrößenverlauf mit Regler nach Strategie 1 mit Begrenzung von $\pm 1$ bei einem Sprung der Höhe 0.5.....	65
Abbildung 5-28:	Stell- und Regelgrößenverlauf mit Regler nach Strategie 2 mit Begrenzung von $\pm 1$ bei einem Sprung der Höhe 0.5.....	65
Abbildung 5-29:	Stell- und Regelgrößenverlauf mit Dead-Beat-Regler für Störgrößen mit Begrenzung von $\pm 1$ bei einem Sprung der Höhe 0.5 .....	66
Abbildung 5-30:	Vergleich der Regelgüten nach dem ITAE-Kriterium bei einem Sprung von 0 auf 0.5 .....	67
Abbildung 5-31:	Einfacher Sprung von 0 auf 1 .....	67
Abbildung 5-32:	Stell- und Regelgrößenverlauf mit Dead-Beat-Regler ohne Begrenzung bei einem Sprung der Höhe 1.....	68
Abbildung 5-33:	Stell- und Regelgrößenverlauf mit Dead-Beat-Regler mit Begrenzung von $\pm 1$ bei einem Sprung der Höhe 1.....	68
Abbildung 5-34:	Stell- und Regelgrößenverlauf mit Regler nach Strategie 1 mit Begrenzung von $\pm 1$ bei einem Sprung der Höhe 1.....	69
Abbildung 5-35:	Stell- und Regelgrößenverlauf mit Regler nach Strategie 2 mit Begrenzung von $\pm 1$ bei einem Sprung der Höhe 1.....	69
Abbildung 5-36:	Stell- und Regelgrößenverlauf mit Dead-Beat-Regler für Störgrößen mit Begrenzung von $\pm 1$ bei einem Sprung der Höhe 1 .....	70
Abbildung 5-37:	Vergleich der Regelgüten nach dem ITAE-Kriterium bei einem Sprung von 0 auf 1. 71	71
Abbildung 5-38:	Einfacher Sprung von 0 auf 1.5 .....	71
Abbildung 5-39:	Stell- und Regelgrößenverlauf mit Dead-Beat-Regler ohne Begrenzung bei einem Sprung der Höhe 1.5.....	72
Abbildung 5-40:	Stell- und Regelgrößenverlauf mit Dead-Beat-Regler mit Begrenzung von $\pm 1$ bei einem Sprung der Höhe 1.5.....	72

Abbildung 5-41:	Stell- und Regelgrößenverlauf mit Regler nach Strategie 1 mit Begrenzung von $\pm 1$ bei einem Sprung der Höhe 1.5.....	73
Abbildung 5-42:	Stell- und Regelgrößenverlauf mit Regler nach Strategie 2 mit Begrenzung von $\pm 1$ bei einem Sprung der Höhe 1.5.....	73
Abbildung 5-43:	Stell- und Regelgrößenverlauf mit Dead-Beat-Regler für Störgrößen mit Begrenzung von $\pm 1$ bei einem Sprung der Höhe 1.5 .....	74
Abbildung 5-44:	Vergleich der Regelgüten nach dem ITAE-Kriterium bei einem Sprung von 0 auf 1.5 .....	75
Abbildung 5-45:	Einfacher Sprung von 0 auf 2 .....	75
Abbildung 5-46:	Stell- und Regelgrößenverlauf mit Dead-Beat-Regler ohne Begrenzung bei einem Sprung der Höhe 2.....	76
Abbildung 5-47:	Stell- und Regelgrößenverlauf mit Dead-Beat-Regler mit Begrenzung von $\pm 1$ bei einem Sprung der Höhe 2.....	76
Abbildung 5-48:	Stell- und Regelgrößenverlauf mit Regler nach Strategie 1 mit Begrenzung von $\pm 1$ bei einem Sprung der Höhe 2.....	77
Abbildung 5-49:	Stell- und Regelgrößenverlauf mit Regler nach Strategie 2 mit Begrenzung von $\pm 1$ bei einem Sprung der Höhe 2.....	78
Abbildung 5-50:	Stell- und Regelgrößenverlauf mit Dead-Beat-Regler für Störgrößen mit Begrenzung von $\pm 1$ bei einem Sprung der Höhe 2 .....	78
Abbildung 5-51:	Vergleich der Regelgüten nach dem ITAE-Kriterium bei einem Sprung von 0 auf 2. 79	
Abbildung 5-52:	Regelgüte nach einer Simulationsdauer von 5 sec in Abhängigkeit der Führungssprunghöhe .....	80
Abbildung 5-53:	Stellgrößenverlauf des Reglers mit Sollwertkorrektur.....	81
Abbildung 5-54:	Stellgrößenverlauf des Reglers mit Abtastzeitenverlängerung.....	81
Abbildung 5-55:	Regelgrößenverlauf bei einem Führungssprung von 0 auf 0.5 .....	82
Abbildung 5-56:	Regelgrößenverlauf bei einem Führungssprung von 0 auf 1 .....	82
Abbildung 5-57:	Regelgrößenverlauf bei einem Führungssprung von 0 auf 1.5 .....	82
Abbildung 5-58:	Positive Sollwertänderung von 4 auf 6.....	83
Abbildung 5-59:	Stell- und Regelgrößenverlauf bei positiver Sollwertänderung mit Dead-Beat-Regler ohne Begrenzung .....	84
Abbildung 5-60:	Stell- und Regelgrößenverlauf bei positiver Sollwertänderung mit Dead-Beat-Regler mit Begrenzung von $\pm 1$ .....	84
Abbildung 5-61:	Stell- und Regelgrößenverlauf bei positiver Sollwertänderung mit Regler nach Strategie 1 mit Begrenzung von $\pm 1$ .....	85
Abbildung 5-62:	Stell- und Regelgrößenverlauf bei positiver Sollwertänderung mit Regler nach Strategie 2 mit Begrenzung von $\pm 1$ .....	85
Abbildung 5-63:	Negative Sollwertänderung von 4 auf 2 .....	86
Abbildung 5-64:	Stell- und Regelgrößenverlauf bei negativer Sollwertänderung mit Dead-Beat-Regler ohne Begrenzung .....	86
Abbildung 5-65:	Stell- und Regelgrößenverlauf bei negativer Sollwertänderung mit Dead-Beat-Regler mit Begrenzung von $\pm 1$ .....	87

Abbildung 5-66:	Stell- und Regelgrößenverlauf bei negativer Sollwertänderung mit Regler nach Strategie 1 mit Begrenzung von $\pm 1$ .....	88
Abbildung 5-67:	Stell- und Regelgrößenverlauf bei negativer Sollwertänderung mit Regler nach Strategie 2 mit Begrenzung von $\pm 1$ .....	88
Abbildung 5-68:	Vorzeichenwechsel des Sollwertes von 4 auf -4 .....	89
Abbildung 5-69:	Stell- und Regelgrößenverlauf bei Vorzeichenwechsel des Sollwertes mit Dead-Beat-Regler ohne Begrenzung .....	89
Abbildung 5-70:	Stell- und Regelgrößenverlauf bei Vorzeichenwechsel des Sollwertes mit Dead-Beat-Regler mit Begrenzung von $\pm 1$ .....	90
Abbildung 5-71:	Stell- und Regelgrößenverlauf bei Vorzeichenwechsel des Sollwertes mit Regler nach Strategie 1 mit Begrenzung von $\pm 1$ .....	90
Abbildung 5-72:	Reglerinterner Stellgrößenverlauf bei Vorzeichenwechsel des Sollwertes mit Regler nach Strategie 1 mit Begrenzung von $\pm 1$ .....	91
Abbildung 5-73:	Stell- und Regelgrößenverlauf bei Vorzeichenwechsel des Sollwertes mit Kombinationsregler mit Begrenzung von $\pm 1$ .....	91
Abbildung 5-74:	Stell- und Regelgrößenverlauf bei Vorzeichenwechsel des Sollwertes mit Regler nach Strategie 2 mit Begrenzung von $\pm 1$ .....	92
Abbildung 5-75:	Einfacher Sprung von 0 auf 0.5 .....	92
Abbildung 5-76:	Stell- und Regelgrößenverlauf mit Dead-Beat-Regler ohne Begrenzung bei einem Sprung der Höhe 0.5 .....	93
Abbildung 5-77:	Stell- und Regelgrößenverlauf mit Dead-Beat-Regler mit Begrenzung von $\pm 1$ bei einem Sprung der Höhe 0.5 .....	93
Abbildung 5-78:	Stell- und Regelgrößenverlauf mit Regler nach Strategie 1 mit Begrenzung von $\pm 1$ bei einem Sprung der Höhe 0.5 .....	94
Abbildung 5-79:	Stell- und Regelgrößenverlauf mit Regler nach Strategie 2 mit Begrenzung von $\pm 1$ bei einem Sprung der Höhe 0.5 .....	94
Abbildung 5-80:	Vergleich der Regelgüten nach dem ITAE-Kriterium bei einem Sprung von 0 auf 0.5 .....	95
Abbildung 5-81:	Einfacher Sprung von 0 auf 1 .....	95
Abbildung 5-82:	Stell- und Regelgrößenverlauf mit Dead-Beat-Regler ohne Begrenzung bei einem Sprung der Höhe 1 .....	96
Abbildung 5-83:	Stell- und Regelgrößenverlauf mit Dead-Beat-Regler mit Begrenzung von $\pm 1$ bei einem Sprung der Höhe 1 .....	96
Abbildung 5-84:	Stell- und Regelgrößenverlauf mit Regler nach Strategie 1 mit Begrenzung von $\pm 1$ bei einem Sprung der Höhe 1 .....	97
Abbildung 5-85:	Stell- und Regelgrößenverlauf mit Regler nach Strategie 2 mit Begrenzung von $\pm 1$ bei einem Sprung der Höhe 1 .....	97
Abbildung 5-86:	Vergleich der Regelgüten nach dem ITAE-Kriterium bei einem Sprung von 0 auf 1 .....	98
Abbildung 5-87:	Einfacher Sprung von 0 auf 2 .....	98
Abbildung 5-88:	Stell- und Regelgrößenverlauf mit Dead-Beat-Regler ohne Begrenzung bei einem Sprung der Höhe 2 .....	99

---

<b>Abbildung 5-89:</b>	<b>Stell- und Regelgrößenverlauf mit Dead-Beat-Regler mit Begrenzung von <math>\pm 1</math> bei einem Sprung der Höhe 2.....</b>	<b>99</b>
<b>Abbildung 5-90:</b>	<b>Stell- und Regelgrößenverlauf mit Regler nach Strategie 1 mit Begrenzung von <math>\pm 1</math> bei einem Sprung der Höhe 2.....</b>	<b>100</b>
<b>Abbildung 5-91:</b>	<b>Stell- und Regelgrößenverlauf mit Regler nach Strategie 2 mit Begrenzung von <math>\pm 1</math> bei einem Sprung der Höhe 2.....</b>	<b>100</b>
<b>Abbildung 5-92:</b>	<b>Vergleich der Regelgüten nach dem ITAE-Kriterium bei einem Sprung von 0 auf 2 .....</b>	<b>101</b>
<b>Abbildung 5-93:</b>	<b>Einfacher Sprung von 0 auf 4 .....</b>	<b>101</b>
<b>Abbildung 5-94:</b>	<b>Stell- und Regelgrößenverlauf mit Dead-Beat-Regler ohne Begrenzung bei einem Sprung der Höhe 4.....</b>	<b>102</b>
<b>Abbildung 5-95:</b>	<b>Stell- und Regelgrößenverlauf mit Dead-Beat-Regler mit Begrenzung von <math>\pm 1</math> bei einem Sprung der Höhe 4.....</b>	<b>102</b>
<b>Abbildung 5-96:</b>	<b>Stell- und Regelgrößenverlauf mit Regler nach Strategie 1 mit Begrenzung von <math>\pm 1</math> bei einem Sprung der Höhe 4.....</b>	<b>103</b>
<b>Abbildung 5-97:</b>	<b>Stell- und Regelgrößenverlauf mit Regler nach Strategie 2 mit Begrenzung von <math>\pm 1</math> bei einem Sprung der Höhe 4.....</b>	<b>104</b>
<b>Abbildung 5-98:</b>	<b>Vergleich der Regelgüten nach dem ITAE-Kriterium bei einem Sprung von 0 auf 4 .....</b>	<b>104</b>
<b>Abbildung 5-99:</b>	<b>Regelgüte nach einer Simulationsdauer von 5 sec in Abhängigkeit der Führungssprunghöhe .....</b>	<b>105</b>

## 8.2 Tabellenverzeichnis

<b>Tabelle 2-1:</b>	<b>Regelgröße, Regeldifferenz und Stellgröße zu den Abtastzeitpunkten bei unbegrenzter Stellgröße eines System mit einer <math>PT_2</math>-Strecke .....</b>	<b>7</b>
<b>Tabelle 2-2:</b>	<b>Regelgröße, Regeldifferenz und Stellgröße zu den Abtastzeitpunkten bei unbegrenzter Stellgröße eines System mit einer <math>IT_2</math>-Strecke .....</b>	<b>11</b>
<b>Tabelle 3-1:</b>	<b>Regelgröße, Regeldifferenz und Stellgröße zu den neuen Abtastzeitpunkten bei mit <math>\pm 3</math> begrenzter Stellgröße eines System mit einer <math>PT_2</math>-Strecke.....</b>	<b>17</b>
<b>Tabelle 3-2:</b>	<b>Regelgröße, Regeldifferenz und Stellgröße zu den neuen Abtastzeitpunkten bei mit <math>\pm 2</math> begrenzter Stellgröße eines System mit einer <math>PT_2</math>-Strecke .....</b>	<b>18</b>
<b>Tabelle 3-3:</b>	<b>Regelgröße, Regeldifferenz und Stellgröße zu den neuen Abtastzeitpunkten bei mit <math>\pm 0.5</math> begrenzter Stellgröße eines System mit einer <math>PT_2</math>-Strecke .....</b>	<b>18</b>
<b>Tabelle 3-4:</b>	<b>Regelgröße, Regeldifferenz und Stellgröße zu den neuen Abtastzeitpunkten bei mit <math>\pm 3</math> begrenzter Stellgröße eines System mit einer <math>IT_2</math>-Strecke.....</b>	<b>19</b>
<b>Tabelle 3-5:</b>	<b>Regelgröße, Regeldifferenz und Stellgröße zu den neuen Abtastzeitpunkten bei mit <math>\pm 2</math> begrenzter Stellgröße eines System mit einer <math>IT_2</math>-Strecke .....</b>	<b>20</b>
<b>Tabelle 3-6:</b>	<b>Regelgröße, Regeldifferenz und Stellgröße zu den neuen Abtastzeitpunkten bei mit <math>\pm 0.5</math> begrenzter Stellgröße eines System mit einer <math>IT_2</math>-Strecke .....</b>	<b>21</b>
<b>Tabelle 3-7:</b>	<b>Regelgröße, Regeldifferenz, Stellgröße und regelinterner Sollwert zu den Abtastzeitpunkten bei mit <math>\pm 3</math> begrenzter Stellgröße eines System mit einer <math>PT_2</math>-Strecke.....</b>	<b>23</b>
<b>Tabelle 3-8:</b>	<b>Regelgröße, Regeldifferenz, Stellgröße und regelinterner Sollwert zu den Abtastzeitpunkten bei mit <math>\pm 2</math> begrenzter Stellgröße eines System mit einer <math>PT_2</math>-Strecke .....</b>	<b>24</b>
<b>Tabelle 3-9:</b>	<b>Regelgröße, Regeldifferenz, Stellgröße und regelinterner Sollwert zu den Abtastzeitpunkten bei mit <math>\pm 0.5</math> begrenzter Stellgröße eines System mit einer <math>PT_2</math>-Strecke .....</b>	<b>26</b>
<b>Tabelle 3-10:</b>	<b>Regelgröße, Regeldifferenz, Stellgröße und regelinterner Sollwert zu den Abtastzeitpunkten bei mit <math>\pm 3</math> begrenzter Stellgröße eines System mit einer <math>IT_2</math>-Strecke.....</b>	<b>27</b>
<b>Tabelle 3-11:</b>	<b>Regelgröße, Regeldifferenz, Stellgröße und regelinterner Sollwert zu den Abtastzeitpunkten bei mit <math>\pm 2</math> begrenzter Stellgröße eines System mit einer <math>IT_2</math>-Strecke .....</b>	<b>28</b>
<b>Tabelle 3-12:</b>	<b>Regelgröße, Regeldifferenz, Stellgröße und regelinterner Sollwert zu den Abtastzeitpunkten bei mit <math>\pm 0.5</math> begrenzter Stellgröße eines System mit einer <math>IT_2</math>-Strecke .....</b>	<b>29</b>

### 8.3 Symbolverzeichnis

$a_i$	Koeffizienten des Nennerpolynoms der Strecke
$b_i$	Koeffizienten des Zählerpolynoms der Strecke
$G_s(s)$	Laplace- Streckenübertragungsfunktion
$G_s(z)$	z-transformierte Streckenübertragungsfunktion
$G_R(s)$	Laplace- Reglerübertragungsfunktion
$G_R(z)$	z-transformierte Reglerübertragungsfunktion
$G_w(z)$	z-transformierte Führungsübertragungsfunktion
$G_z(z)$	z-transformierte Störübertragungsfunktion
$G_e(z)$	z-transformierte Übertragungsfunktion der Regeldifferenz
$t$	Abtastzeit
$T_i$	Streckenzeitkonstante
$K_P$	Streckenverstärkung
$K_I$	Streckenverstärkung
$x(t)$	zeitkontinuierliche Regelgröße
$x(s)$	Laplace-transformierte Regelgröße
$x(z)$	z-transformierte Regelgröße
$x_k$	zeitdiskrete Regelgröße
$\dot{x}$	Steigung des Regelgrößenverlaufes
$\ddot{x}$	Drehsinn der Steigung des Regelgrößenverlaufes
$e(t)$	zeitkontinuierliche Regeldifferenz
$e(s)$	Laplace-transformierte Regeldifferenz
$e(z)$	z-transformierte Regeldifferenz
$e_k$	zeitdiskrete Regeldifferenz
$u(t)$	zeitkontinuierliche Stellgröße
$u(s)$	Laplace-transformierte Stellgröße
$u(z)$	z-transformierte Stellgröße
$u_k$	zeitdiskrete Stellgröße
$w(t)$	zeitkontinuierliche Führungsgröße
$w(s)$	Laplace-transformierte Führungsgröße
$w(z)$	z-transformierte Führungsgröße
$w_k$	zeitdiskrete Führungsgröße

$z(t)$	zeitkontinuierliche Störgröße
$z(s)$	Laplace-transformierte Störgröße
$z(z)$	z-transformierte Störgröße
$u_{\max}$	oberer Begrenzungswert
$u_{\min}$	unterer Begrenzungswert

## 8.4 MATLAB Quellcodes

### 8.4.1 Programmcode des Reglers nach Strategie 1 für eine PT<sub>2</sub>-Strecke

```

function [u, test,x_k, korr_e, D_tau] = fcn(e, w, w1, w2, K_p, t_1, t_2, u_kmax,
u_kmin,V_u1, V_u2,V_e1, V_e2,V_tau1,V_tau2)

% This block supports an embeddable subset of the MATLAB language.
% See the help menu for details.
ob=0;
Kp=K_p;
t1=t_1;
t2=t_2;
tau=0.1;
ukmax=u_kmax;
ukmin=u_kmin;
alpha1=-1.0*(tau/t1);
alpha2=-1.0*(tau/t2);
beta1=exp(alpha1);
beta2=exp(alpha2);
gross_b=(Kp*t2)/(t2-t1);
gross_a=(Kp*t1)/(t1-t2);

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Berechnung der Koeffizienten aus den Reglerparametern %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

b0=0.0;
b1= (gross_a*(1-beta1)+gross_b*(1-beta2));
b2= (-gross_a*beta2*(1-beta1)-gross_b*beta1*(1-beta2));
a0= 1.0;
a1= -1.0*(beta1+beta2);
a2= beta1*beta2;
gross_k=b1+b2;
tau_neu=tau;
tau_1=V_tau1;
tau_2=V_tau2;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Zuordnung der Vergangenheitswerte %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

ek=e;
ek_1=V_e1;
ek_2=V_e2;

wk=w;
wk_1=w1;
wk_2=w2;

xk=wk-ek;
xk_1=wk_1-ek_1;
xk_2=wk_2-ek_2;

uk_1=V_u1;
uk_2=V_u2;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Dead-Beat-Regelalgorithmus %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

uk=1/gross_k*ek+a1/gross_k*ek_1+a2/gross_k*ek_2+b1/gross_k*uk_1+b2/gross_k*uk_2;

```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Ermittlung der neuen Abtastzeit %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

if (uk>ukmax&&(ek_1>-0.001||ek_1<0.001)&&(ek_2>-0.001||ek_2<0.001))
    while (uk>ukmax)
        tau_neu=tau_neu+0.001;
        alpha1_neu=-1.0*(tau_neu/t1);
        alpha2_neu=-1.0*(tau_neu/t2);
        beta1_neu=exp(alpha1_neu);
        beta2_neu=exp(alpha2_neu);
        b_neu0=0.0;
        b_neu1= (gross_a*(1-beta1_neu)+gross_b*(1-beta2_neu));
        b_neu2= (-gross_a*beta2_neu*(1-beta1_neu)-gross_b*beta1_neu*(1-beta2_neu));
        a_neu0= 1.0;
        a_neu1= -1.0*(beta1_neu+beta2_neu);
        a_neu2= beta1_neu*beta2_neu;
        gross_k_neu=b_neu1+b_neu2;

uk=1/gross_k_neu*ek+a_neu1/gross_k_neu*ek_1+a_neu2/gross_k_neu*ek_2+b_neu1/gross_k_neu*uk_1+b_
neu2/gross_k_neu*uk_2;
        end
    end

if (uk<ukmin&&(ek_1>-0.001||ek_1<0.001)&&(ek_2>-0.001||ek_2<0.001))
    while (uk<ukmin)
        tau_neu=tau_neu+0.001;
        alpha1_neu=-1.0*(tau_neu/t1);
        alpha2_neu=-1.0*(tau_neu/t2);
        beta1_neu=exp(alpha1_neu);
        beta2_neu=exp(alpha2_neu);
        b_neu0=0.0;
        b_neu1= (gross_a*(1-beta1_neu)+gross_b*(1-beta2_neu));
        b_neu2= (-gross_a*beta2_neu*(1-beta1_neu)-gross_b*beta1_neu*(1-beta2_neu));
        a_neu0= 1.0;
        a_neu1= -1.0*(beta1_neu+beta2_neu);
        a_neu2= beta1_neu*beta2_neu;
        gross_k_neu=b_neu1+b_neu2;

uk=1/gross_k_neu*ek+a_neu1/gross_k_neu*ek_1+a_neu2/gross_k_neu*ek_2+b_neu1/gross_k_neu*uk_1+b_
neu2/gross_k_neu*uk_2;
        end
    end

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Solange die Regelung nicht abgeschlossen ist, wird die Abtastzeit gehalten %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

if(((ek_1<-0.001)||ek_1>0.001)||((ek_2<-0.001)||ek_2>0.001))
    tau_neu=tau_1+tau;
    alpha1_neu=-1.0*(tau_neu/t1);
    alpha2_neu=-1.0*(tau_neu/t2);
    beta1_neu=exp(alpha1_neu);
    beta2_neu=exp(alpha2_neu);
    b_neu0=0.0;
    b_neu1= (gross_a*(1-beta1_neu)+gross_b*(1-beta2_neu));
    b_neu2= (-gross_a*beta2_neu*(1-beta1_neu)-gross_b*beta1_neu*(1-beta2_neu));
    a_neu0= 1.0;
    a_neu1= -1.0*(beta1_neu+beta2_neu);
    a_neu2= beta1_neu*beta2_neu;
    gross_k_neu=b_neu1+b_neu2;

uk=1/gross_k_neu*ek+a_neu1/gross_k_neu*ek_1+a_neu2/gross_k_neu*ek_2+b_neu1/gross_k_neu*uk_1+b_
neu2/gross_k_neu*uk_2;
    end

if(((ek<-0.001)||ek>0.001)&&(tau_1>0))
    tau_neu=tau_1+tau;
end

```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Wenn Regelung abgeschlossen oder das System in Ruhelage ist %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

if((abs(ek_2)<0.001)&&(abs(ek_1)<0.001)&&(abs(ek)<0.001)&&(wk>0))
    uk=wk*(a0+a1+a2)/gross_k;
    tau_neu=tau;
end

if((abs(ek_2)<0.001)&&(abs(ek_1)<0.001)&&(abs(ek)<0.001)&&(wk<0))
    uk=wk*(a0+a1+a2)/gross_k;
    tau_neu=tau;
end

if((abs(ek_2)<0.001)&&(abs(ek_1)<0.001)&&(abs(ek)<0.001)&&(wk==0))
    uk=0;
end

x_k=xk;
korr_e=ek;
u = uk;
D_tau=tau_neu-tau;
test=ob;
```

## 8.4.2 Programmcode des Reglers nach Strategie 2 für eine $PT_2$ -Strecke

```

function [u, test,x_k, korr_w, korr_e, D_tau] = fcn(e, w, w1, w2, K_p, t_1, t_2, u_kmax,
u_kmin,V_u1, V_u2, V_e1, V_e2, V_tau1,V_tau2)

% This block supports an embeddable subset of the MATLAB language.
% See the help menu for details.
ob=0;
Kp=K_p;
t1=t_1;
t2=t_2;
tau=0.1;
ukmax=u_kmax;
ukmin=u_kmin;
alpha1=-1.0*(tau/t1);
alpha2=-1.0*(tau/t2);
beta1=exp(alpha1);
beta2=exp(alpha2);
gross_b=(Kp*t2)/(t2-t1);
gross_a=(Kp*t1)/(t1-t2);

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Berechnung der Koeffizienten aus den Reglerparametern %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

b0=0.0;
b1= (gross_a*(1-beta1)+gross_b*(1-beta2));
b2= (-gross_a*beta2*(1-beta1)-gross_b*beta1*(1-beta2));
a0= 1.0;
a1= -1.0*(beta1+beta2);
a2= beta1*beta2;
gross_k=b1+b2;

tau_neu=tau;
tau_1=V_tau1;
tau_2=V_tau2;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Zuordnung der Vergangenheitswerte %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

ek=e;
ek_1=V_e1;
ek_2=V_e2;

wk=w;
wk_1=w1;
wk_2=w2;

xk=wk-ek;
xk_1=wk_1-ek_1;
xk_2=wk_2-ek_2;

uk_1=V_u1;
uk_2=V_u2;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Dead-Beat-Regelalgorithmus %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

uk=1/gross_k*ek+a1/gross_k*ek_1+a2/gross_k*ek_2+b1/gross_k*uk_1+b2/gross_k*uk_2;

```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Sollwertkorrektur %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

if (uk>ukmax)
    ek=gross_k*ukmax-b1*uk_1-b2*uk_2-a1*ek_1-a2*ek_2;
    uk=ukmax;
    wk=xk+ek;
end

if (uk<ukmin)
    ek=gross_k*ukmin-b1*uk_1-b2*uk_2-a1*ek_1-a2*ek_2;
    uk=ukmin;
    wk=xk+ek;
end

korr_w=wk;
x_k=xk;
korr_e=ek;
u = uk;
D_tau=tau_neu-tau;
test=ob;
```

### 8.4.3 Programmcode des Kombinationsreglers für eine $PT_2$ -Strecke

```

function [u, test,x_k, korr_e, D_tau] = fcn(e, w, w1, w2, K_p, t_1,t_2,u_kmax,u_kmin,V_u1,
V_u2,V_e1, V_e2,V_tau1,V_tau2)
% This block supports an embeddable subset of the MATLAB language.
% See the help menu for details.
ob=0;
Kp=K_p;
t1=t_1;
t2=t_2;
tau=0.1;
ukmax=u_kmax;
ukmin=u_kmin;
alpha1=-1.0*(tau/t1);
alpha2=-1.0*(tau/t2);
beta1=exp(alpha1);
beta2=exp(alpha2);
gross_b=(Kp*t2)/(t2-t1);
gross_a=(Kp*t1)/(t1-t2);

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Berechnung der Koeffizienten aus den Reglerparametern %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

b0=0.0;
b1= (gross_a*(1-beta1)+gross_b*(1-beta2));
b2= (-gross_a*beta2*(1-beta1)-gross_b*beta1*(1-beta2));
a0= 1.0;
a1= -1.0*(beta1+beta2);
a2= beta1*beta2;
gross_k=b1+b2;
tau_neu=tau;
tau_1=V_tau1;
tau_2=V_tau2;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Zuordnung der Vergangenheitswerte %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

ek=e;
ek_1=V_e1;
ek_2=V_e2;

wk=w;
wk_1=w1;
wk_2=w2;

xk=wk-ek;
xk_1=wk_1-ek_1;
xk_2=wk_2-ek_2;

uk_1=V_u1;
uk_2=V_u2;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Dead-Beat-Regelalgorithmus %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

uk=1/gross_k*ek+a1/gross_k*ek_1+a2/gross_k*ek_2+b1/gross_k*uk_1+b2/gross_k*uk_2;

```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Abtastzeitenverlängerung %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

if (uk>ukmax&&(ek_1>-0.001||ek_1<0.001)&&(ek_2>-0.001||ek_2<0.001))
    while (uk>ukmax)
        tau_neu=tau_neu+0.001;
        alpha1_neu=-1.0*(tau_neu/t1);
        alpha2_neu=-1.0*(tau_neu/t2);
        beta1_neu=exp(alpha1_neu);
        beta2_neu=exp(alpha2_neu);
        b_neu0=0.0;
        b_neu1= (gross_a*(1-beta1_neu)+gross_b*(1-beta2_neu));
        b_neu2= (-gross_a*beta2_neu*(1-beta1_neu)-gross_b*beta1_neu*(1-beta2_neu));
        a_neu0= 1.0;
        a_neu1= -1.0*(beta1_neu+beta2_neu);
        a_neu2= beta1_neu*beta2_neu;
        gross_k_neu=b_neu1+b_neu2;

uk=1/gross_k_neu*ek+a_neu1/gross_k_neu*ek_1+a_neu2/gross_k_neu*ek_2+b_neu1/gross_k_neu*uk_1+b_
neu2/gross_k_neu*uk_2;
        end
    end

if (uk<ukmin&&(ek_1>-0.001||ek_1<0.001)&&(ek_2>-0.001||ek_2<0.001))
    while (uk<ukmin)
        tau_neu=tau_neu+0.001;
        alpha1_neu=-1.0*(tau_neu/t1);
        alpha2_neu=-1.0*(tau_neu/t2);
        beta1_neu=exp(alpha1_neu);
        beta2_neu=exp(alpha2_neu);
        b_neu0=0.0;
        b_neu1= (gross_a*(1-beta1_neu)+gross_b*(1-beta2_neu));
        b_neu2= (-gross_a*beta2_neu*(1-beta1_neu)-gross_b*beta1_neu*(1-beta2_neu));
        a_neu0= 1.0;
        a_neu1= -1.0*(beta1_neu+beta2_neu);
        a_neu2= beta1_neu*beta2_neu;
        gross_k_neu=b_neu1+b_neu2;

uk=1/gross_k_neu*ek+a_neu1/gross_k_neu*ek_1+a_neu2/gross_k_neu*ek_2+b_neu1/gross_k_neu*uk_1+b_
neu2/gross_k_neu*uk_2;
        end
    end

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Sollwertkorrektur %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

if ((ek_1<-0.001||ek_1>0.001)|| (ek_2<-0.001||ek_2>0.001))
    tau_neu=tau_1+tau;
    alpha1_neu=-1.0*(tau_neu/t1);
    alpha2_neu=-1.0*(tau_neu/t2);
    beta1_neu=exp(alpha1_neu);
    beta2_neu=exp(alpha2_neu);
    b_neu0=0.0;
    b_neu1= (gross_a*(1-beta1_neu)+gross_b*(1-beta2_neu));
    b_neu2= (-gross_a*beta2_neu*(1-beta1_neu)-gross_b*beta1_neu*(1-beta2_neu));
    a_neu0= 1.0;
    a_neu1= -1.0*(beta1_neu+beta2_neu);
    a_neu2= beta1_neu*beta2_neu;
    gross_k_neu=b_neu1+b_neu2;

uk=1/gross_k_neu*ek+a_neu1/gross_k_neu*ek_1+a_neu2/gross_k_neu*ek_2+b_neu1/gross_k_neu*uk_1+b_
neu2/gross_k_neu*uk_2;
    if (uk<ukmin)
        uk=ukmin;
        ek=gross_k_neu*ukmin-b_neu1*uk_1-b_neu2*uk_2-a_neu1*ek_1-a_neu2*ek_2;
    end
    if(uk>ukmax)
        uk=ukmax;
        ek=gross_k_neu*ukmax-b_neu1*uk_1-b_neu2*uk_2-a_neu1*ek_1-a_neu2*ek_2;
    end
end
end

```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Wenn Regelung nicht abgeschlossen ist, wird die aktuelle Abtastzeit gehalten %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

if((ek<-0.001)||ek>0.001)&&(tau_1>0)
    tau_neu=tau_1+tau;
end

if(abs(ek_2)<0.001)&&(abs(ek_1)<0.001)&&(abs(ek)<0.001)&&(wk>0)
    uk=wk*(a0+a1+a2)/gross_k;
    tau_neu=tau;
end

if(abs(ek_2)<0.001)&&(abs(ek_1)<0.005)&&(abs(ek)<0.001)&&(wk<0)
    uk=wk*(a0+a1+a2)/gross_k;
    tau_neu=tau;
end

if((abs(ek)<0.001)&&(wk==0))
    uk=0;
end

x_k=xk;
korr_e=ek;
u = uk;
D_tau=tau_neu-tau;
test=ob;
```

## 8.4.4 Programmcode des Reglers nach Strategie 1 für eine IT<sub>2</sub>-Strecke

```

function [u, test,x_k, korr_e, D_tau] = fcn(e, w, w1, w2, w3, K_i, t_1, t_2, u_kmax,
u_kmin,V_u1, V_u2, V_u3, V_e1, V_e2, V_e3,V_tau1,V_tau2,V_tau3)

% This block supports an embeddable subset of the MATLAB language.
% See the help menu for details.
ob=0;
Ki=K_i;
t1=t_1;
t2=t_2;
tau=0.1;
ukmax=u_kmax;
ukmin=u_kmin;
gross_a=Ki;
gross_c=(Ki*t2*t2)/(t1-t2);
gross_b=(-1.0)*gross_c-Ki*(t1+t2);
alpha1=-1.0*(tau/t1);
beta1=exp(alpha1);
alpha2=-1.0*(tau/t2);
beta2=exp(alpha2);

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Berechnung der Koeffizienten aus den Reglerparametern %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

a0=1.0;
a1=-beta1-beta2-1,
a2=beta1*(beta2+1)+beta2;
a3=-1.0*beta1*beta2;
b1=gross_a*tau+(gross_b*(1-beta1))+(gross_c*(1-beta2));
b2=(-1.0)*(gross_a*tau*(beta1+beta2)+gross_b*(1-beta1)*(1+beta2)+gross_c*(1-beta2)*(1+beta1));
b3=gross_a*tau*beta1*beta2+gross_b*beta2*(1-beta1)+gross_c*beta1*(1-beta2);
gross_k=b1+b2+b3;
tau_neu=tau;
tau_1=V_tau1;
tau_2=V_tau2;
tau_3=V_tau3;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Zuordnung der Vergangenheitswerte %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

ek=e;
ek_1=V_e1;
ek_2=V_e2;
ek_3=V_e3;
wk=w;
wk_1=w1;
wk_2=w2;
wk_3=w3;
xk=wk-ek;
xk_1=wk_1-ek_1;
xk_2=wk_2-ek_2;
xk_3=wk_3-ek_3;
uk_1=V_u1;
uk_2=V_u2;
uk_3=V_u3;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Dead-Beat-Regelalgorithmus %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

uk=1/gross_k*ek+a1/gross_k*ek_1+a2/gross_k*ek_2+a3/gross_k*ek_3+b1/gross_k*uk_1+b2/gross_k*uk_
2+b3/gross_k*uk_3;

```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Ermittlung der neuen Abtastzeit %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

if (uk>ukmax&&(ek_1>-0.001 || ek_1<0.001)&&(ek_3>-0.001 || ek_3<0.001)&&(ek_3>-0.001 || ek_3<0.001))
    while (uk>ukmax)
        tau_neu=tau_neu+0.001;
        alpha1_neu=-1.0*(tau_neu/t1);
        beta1_neu=exp(alpha1_neu);
        alpha2_neu=-1.0*(tau_neu/t2);
        beta2_neu=exp(alpha2_neu);
        a_neu0=1.0;
        a_neu1=-beta1_neu-beta2_neu-1,
        a_neu2=beta1_neu*(beta2_neu+1)+beta2_neu;
        a_neu3=-1.0*beta1_neu*beta2_neu;
        b_neu1=gross_a*tau_neu+(gross_b*(1-beta1_neu))+(gross_c*(1-beta2_neu));
        b_neu2=(-1.0)*(gross_a*tau_neu*(beta1_neu+beta2_neu)+gross_b*(1-
beta1_neu)*(1+beta2_neu)+gross_c*(1-beta2_neu)*(1+beta1_neu));
        b_neu3=gross_a*tau_neu*beta1_neu*beta2_neu+gross_b*beta2_neu*(1-
beta1_neu)+gross_c*beta1_neu*(1-beta2_neu);
        gross_k_neu=b_neu1+b_neu2+b_neu3;

uk=1/gross_k_neu*ek+a_neu1/gross_k_neu*ek_1+a_neu2/gross_k_neu*ek_2+a_neu3/gross_k_neu*ek_3+b_
neu1/gross_k_neu*uk_1+b_neu2/gross_k_neu*uk_2+b_neu3/gross_k_neu*uk_3;
    end
end

if (uk<ukmin&&(ek_1>-0.001 || ek_1<0.001)&&(ek_2>-0.001 || ek_2<0.001)&&(ek_3>-0.001 || ek_3<0.001))
    while (uk<ukmin)
        tau_neu=tau_neu+0.001;
        alpha1_neu=-1.0*(tau_neu/t1);
        beta1_neu=exp(alpha1_neu);
        alpha2_neu=-1.0*(tau_neu/t2);
        beta2_neu=exp(alpha2_neu);
        a_neu0=1.0;
        a_neu1=-beta1_neu-beta2_neu-1,
        a_neu2=beta1_neu*(beta2_neu+1)+beta2_neu;
        a_neu3=-1.0*beta1_neu*beta2_neu;
        b_neu1=gross_a*tau_neu+(gross_b*(1-beta1_neu))+(gross_c*(1-beta2_neu));
        b_neu2=(-1.0)*(gross_a*tau_neu*(beta1_neu+beta2_neu)+gross_b*(1-
beta1_neu)*(1+beta2_neu)+gross_c*(1-beta2_neu)*(1+beta1_neu));
        b_neu3=gross_a*tau_neu*beta1_neu*beta2_neu+gross_b*beta2_neu*(1-
beta1_neu)+gross_c*beta1_neu*(1-beta2_neu);
        gross_k_neu=b_neu1+b_neu2+b_neu3;

uk=1/gross_k_neu*ek+a_neu1/gross_k_neu*ek_1+a_neu2/gross_k_neu*ek_2+a_neu3/gross_k_neu*ek_3+b_
neu1/gross_k_neu*uk_1+b_neu2/gross_k_neu*uk_2+b_neu3/gross_k_neu*uk_3;
    end
end

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Solange das System nicht in Ruhe ist, wird die Abtastzeit gehalten %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

if ((ek_1<-0.001 || ek_1>0.001) || (ek_2<-0.001 || ek_2>0.001) || (ek_3<-0.001 || ek_3>0.001))
    tau_neu=tau_1+tau;
    alpha1_neu=-1.0*(tau_neu/t1);
    beta1_neu=exp(alpha1_neu);
    alpha2_neu=-1.0*(tau_neu/t2);
    beta2_neu=exp(alpha2_neu);
    a_neu0=1.0;
    a_neu1=-beta1_neu-beta2_neu-1,
    a_neu2=beta1_neu*(beta2_neu+1)+beta2_neu;
    a_neu3=-1.0*beta1_neu*beta2_neu;
    b_neu1=gross_a*tau_neu+(gross_b*(1-beta1_neu))+(gross_c*(1-beta2_neu));
    b_neu2=(-1.0)*(gross_a*tau_neu*(beta1_neu+beta2_neu)+gross_b*(1-
beta1_neu)*(1+beta2_neu)+gross_c*(1-beta2_neu)*(1+beta1_neu));
    b_neu3=gross_a*tau_neu*beta1_neu*beta2_neu+gross_b*beta2_neu*(1-
beta1_neu)+gross_c*beta1_neu*(1-beta2_neu);
    gross_k_neu=b_neu1+b_neu2+b_neu3;

uk=1/gross_k_neu*ek+a_neu1/gross_k_neu*ek_1+a_neu2/gross_k_neu*ek_2+a_neu3/gross_k_neu*ek_3+b_
neu1/gross_k_neu*uk_1+b_neu2/gross_k_neu*uk_2+b_neu3/gross_k_neu*uk_3;
end

```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%  
% Wenn Regelung fertig, Sollwert erreicht mit eine Genauigkeit kleiner als 0.1 %  
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%  
  
if(abs(ek)<0.001)  
    uk=0;  
end  
  
x_k=xk;  
korr_e=ek;  
u = uk;  
D_tau=tau_neu-tau;  
test=ob;
```

## 8.4.5 Programmcode des Reglers nach Strategie 2 für eine IT<sub>2</sub>-Strecke

```

function [u, test,x_k, korr_w, korr_e, D_tau] = fcn(e, w, w1, w2, w3, K_i, t_1, t_2, u_kmax,
u_kmin, V_u1, V_u2, V_u3, V_e1, V_e2, V_e3,V_tau1,V_tau2,V_tau3)

% This block supports an embeddable subset of the MATLAB language.
% See the help menu for details.
ob=0;
Ki=K_i;
t1=t_1;
t2=t_2;
tau=0.1;
ukmax=u_kmax;
ukmin=u_kmin;
gross_a=Ki;
gross_c=(Ki*t2*t2)/(t1-t2);
gross_b=(-1.0)*gross_c-Ki*(t1+t2);
alpha1=-1.0*(tau/t1);
beta1=exp(alpha1);
alpha2=-1.0*(tau/t2);
beta2=exp(alpha2);

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Berechnung der Koeffizienten aus den Reglerparametern %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

a0=1.0;
a1=-beta1-beta2-1,
a2=beta1*(beta2+1)+beta2;
a3=-1.0*beta1*beta2;
b1=gross_a*tau+(gross_b*(1-beta1))+(gross_c*(1-beta2));
b2=(-1.0)*(gross_a*tau*(beta1+beta2)+gross_b*(1-beta1)*(1+beta2)+gross_c*(1-beta2)*(1+beta1));
b3=gross_a*tau*beta1*beta2+gross_b*beta2*(1-beta1)+gross_c*beta1*(1-beta2);
gross_k=b1+b2+b3;
tau_neu=tau;
tau_1=V_tau1;
tau_2=V_tau2;
tau_3=V_tau3;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Zuordnung der Vergangenheitswerte %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

ek=e;
ek_1=V_e1;
ek_2=V_e2;
ek_3=V_e3;
wk=w;
wk_1=w1;
wk_2=w2;
wk_3=w3;
xk=wk-ek;
xk_1=wk_1-ek_1;
xk_2=wk_2-ek_2;
xk_3=wk_3-ek_3;
uk_1=V_u1;
uk_2=V_u2;
uk_3=V_u3;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Dead-Beat-Algorithmus %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

uk=1/gross_k*ek+a1/gross_k*ek_1+a2/gross_k*ek_2+a3/gross_k*ek_3+b1/gross_k*uk_1+b2/gross_k*uk_
2+b3/gross_k*uk_3;

```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Sollwertkorrektur %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

if (uk>ukmax)
    ek=gross_k*ukmax-b1*uk_1-b2*uk_2-b3*uk_3-a1*ek_1-a2*ek_2-a3*ek_3;
    uk=ukmax;
    wk=xk+ek;
end

if (uk<ukmin)
    ek=gross_k*ukmin-b1*uk_1-b2*uk_2-b3*uk_3-a1*ek_1-a2*ek_2-a3*ek_3;
    uk=ukmin;
    wk=xk+ek;
end

korr_w=wk;
x_k=xk;
korr_e=ek;
u = uk;
D_tau=tau_neu-tau;
test=ob;
```

## 8.4.6 Programmcode des Kombinationsreglers für eine IT<sub>2</sub>-Strecke

```

function [u, test,x_k, korr_e, D_tau] = fcn(e, w, w1, w2, w3,K_i,t_1,t_2,u_kmax,u_kmin,V_u1,
V_u2, V_u3, V_e1, V_e2, V_e3,V_tau1,V_tau2,V_tau3)

% This block supports an embeddable subset of the MATLAB language.
% See the help menu for details.
ob=0;
Ki=K_i;
t1=t_1;
t2=t_2;
tau=0.1;
ukmax=u_kmax;
ukmin=u_kmin;
gross_a=Ki;
gross_c=(Ki*t2*t2)/(t1-t2);
gross_b=(-1.0)*gross_c-Ki*(t1+t2);
alpha1=-1.0*(tau/t1);
beta1=exp(alpha1);
alpha2=-1.0*(tau/t2);
beta2=exp(alpha2);

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Berechnung der Koeffizienten aus den Reglerparametern %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

a0=1.0;
a1=-beta1-beta2-1,
a2=beta1*(beta2+1)+beta2;
a3=-1.0*beta1*beta2;
b1=gross_a*tau+(gross_b*(1-beta1))+(gross_c*(1-beta2));
b2=(-1.0)*(gross_a*tau*(beta1+beta2)+gross_b*(1-beta1)*(1+beta2)+gross_c*(1-beta2)*(1+beta1));
b3=gross_a*tau*beta1*beta2+gross_b*beta2*(1-beta1)+gross_c*beta1*(1-beta2);
gross_k=b1+b2+b3;
tau_neu=tau;
tau_1=V_tau1;
tau_2=V_tau2;
tau_3=V_tau3;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Zuordnung der Vergangenheitswerte %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

ek=e;
ek_1=V_e1;
ek_2=V_e2;
ek_3=V_e3;
wk=w;
wk_1=w1;
wk_2=w2;
wk_3=w3;
xk=wk-ek;
xk_1=wk_1-ek_1;
xk_2=wk_2-ek_2;
xk_3=wk_3-ek_3;
uk_1=V_u1;
uk_2=V_u2;
uk_3=V_u3;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Dead-Beat-Regelalgorithmus %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

uk=1/gross_k*ek+a1/gross_k*ek_1+a2/gross_k*ek_2+a3/gross_k*ek_3+b1/gross_k*uk_1+b2/gross_k*uk_
2+b3/gross_k*uk_3;

```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Abtastzeitenverlängerung bei positiver Übersteuerung %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

if (uk>ukmax&&(ek_1>-0.001||ek_1<0.001)&&(ek_3>-0.001||ek_3<0.001)&&(ek_3>-0.001||ek_3<0.001))
    while (uk>ukmax)
        tau_neu=tau_neu+0.001;
        alpha1_neu=-1.0*(tau_neu/t1);
        beta1_neu=exp(alpha1_neu);
        alpha2_neu=-1.0*(tau_neu/t2);
        beta2_neu=exp(alpha2_neu);
        a_neu0=1.0;
        a_neu1=-beta1_neu-beta2_neu-1,
        a_neu2=beta1_neu*(beta2_neu+1)+beta2_neu;
        a_neu3=-1.0*beta1_neu*beta2_neu;
        b_neu1=gross_a*tau_neu+(gross_b*(1-beta1_neu))+(gross_c*(1-beta2_neu));
        b_neu2=(-1.0)*(gross_a*tau_neu*(beta1_neu+beta2_neu)+gross_b*(1-
beta1_neu)*(1+beta2_neu)+gross_c*(1-beta2_neu)*(1+beta1_neu));
        b_neu3=gross_a*tau_neu*beta1_neu*beta2_neu+gross_b*beta2_neu*(1-
beta1_neu)+gross_c*beta1_neu*(1-beta2_neu);
        gross_k_neu=b_neu1+b_neu2+b_neu3;

uk=1/gross_k_neu*ek+a_neu1/gross_k_neu*ek_1+a_neu2/gross_k_neu*ek_2+a_neu3/gross_k_neu*ek_3+b_
neu1/gross_k_neu*uk_1+b_neu2/gross_k_neu*uk_2+b_neu3/gross_k_neu*uk_3;
    end
end

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Sollwertkorrektur bei Übersteuerung und nich Ruhelage %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

if(((ek_1<-0.001)||ek_1>0.001)||((ek_2<-0.001)||ek_2>0.001)||((ek_3<-0.001)||ek_3>0.001))
    tau_neu=tau_1+tau;
    alpha1_neu=-1.0*(tau_neu/t1);
    beta1_neu=exp(alpha1_neu);
    alpha2_neu=-1.0*(tau_neu/t2);
    beta2_neu=exp(alpha2_neu);
    a_neu0=1.0;
    a_neu1=-beta1_neu-beta2_neu-1,
    a_neu2=beta1_neu*(beta2_neu+1)+beta2_neu;
    a_neu3=-1.0*beta1_neu*beta2_neu;
    b_neu1=gross_a*tau_neu+(gross_b*(1-beta1_neu))+(gross_c*(1-beta2_neu));
    b_neu2=(-1.0)*(gross_a*tau_neu*(beta1_neu+beta2_neu)+gross_b*(1-
beta1_neu)*(1+beta2_neu)+gross_c*(1-beta2_neu)*(1+beta1_neu));
    b_neu3=gross_a*tau_neu*beta1_neu*beta2_neu+gross_b*beta2_neu*(1-
beta1_neu)+gross_c*beta1_neu*(1-beta2_neu);
    gross_k_neu=b_neu1+b_neu2+b_neu3;

uk=1/gross_k_neu*ek+a_neu1/gross_k_neu*ek_1+a_neu2/gross_k_neu*ek_2+a_neu3/gross_k_neu*ek_3+b_
neu1/gross_k_neu*uk_1+b_neu2/gross_k_neu*uk_2+b_neu3/gross_k_neu*uk_3;
    if (uk>ukmax)
        uk=ukmax;
        ek=gross_k_neu*ukmax-b_neu1*uk_1-b_neu2*uk_2-b_neu3*uk_3-a_neu1*ek_1-a_neu2*ek_2-
a_neu3*ek_3;
    end
    if (uk<ukmin)
        uk=ukmin;
        ek=gross_k_neu*ukmin-b_neu1*uk_1-b_neu2*uk_2-b_neu3*uk_3-a_neu1*ek_1-a_neu2*ek_2-
a_neu3*ek_3;
    end
end
end

```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Abtastzeitenverlängerung bei negativer Übersteuerung %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

if (uk<ukmin&&(ek_1>-0.001||ek_1<0.001)&&(ek_2>-0.001||ek_2<0.001)&&(ek_3>-0.001||ek_3<0.001))
    while (uk<ukmin)
        tau_neu=tau_neu+0.001;
        alpha1_neu=-1.0*(tau_neu/t1);
        beta1_neu=exp(alpha1_neu);
        alpha2_neu=-1.0*(tau_neu/t2);
        beta2_neu=exp(alpha2_neu);
        a_neu0=1.0;
        a_neu1=-beta1_neu-beta2_neu-1,
        a_neu2=beta1_neu*(beta2_neu+1)+beta2_neu;
        a_neu3=-1.0*beta1_neu*beta2_neu;
        b_neu1=gross_a*tau_neu+(gross_b*(1-beta1_neu))+(gross_c*(1-beta2_neu));
        b_neu2=(-1.0)*(gross_a*tau_neu*(beta1_neu+beta2_neu)+gross_b*(1-
beta1_neu)*(1+beta2_neu)+gross_c*(1-beta2_neu)*(1+beta1_neu));
        b_neu3=gross_a*tau_neu*beta1_neu*beta2_neu+gross_b*beta2_neu*(1-
beta1_neu)+gross_c*beta1_neu*(1-beta2_neu);
        gross_k_neu=b_neu1+b_neu2+b_neu3;

uk=1/gross_k_neu*ek+a_neu1/gross_k_neu*ek_1+a_neu2/gross_k_neu*ek_2+a_neu3/gross_k_neu*ek_3+b_
neu1/gross_k_neu*uk_1+b_neu2/gross_k_neu*uk_2+b_neu3/gross_k_neu*uk_3;
    end
end

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Wenn Regelung fertig, Sollwert erreicht mit eine Genauigkeit kleiner als 0.1 %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

if(abs(ek)<0.001)
    uk=0;
end

x_k=xk;
korr_e=ek;
u = uk;
D_tau=tau_neu-tau;
test=ob;
```

## 8.5 CD-ROM

Auf der beiliegenden CD-ROM befinden sich die hier beschriebenen Simulationsmodelle. Da die Realisierung mit einer Embedded MATLAB Function erfolgte, ist jeweils der Programmcode direkt in das Simulationsmodell eingebunden worden, so dass direkt im Simulationsmodell der Programmcode eingesehen werden kann. Außerdem sind auf der CD-ROM die m-Files zur Ermittlung der Regelgüte in Abhängigkeit der Führungssprunghöhe zu finden.

## **9 Selbstständigkeitserklärung**

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit im Sinne der Prüfungsordnung nach §25(4) ohne fremde Hilfe selbständig verfasst und nur die angegebenen Hilfsmittel benutzt habe. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen habe ich unter Angabe der Quellen kenntlich gemacht.

Hamburg, 27. August 2007