

Prozessoptimierung ohne Reglerparameter Die F_{Rt} -Wurzelrekursion

Peter F. Orlowski

Prozessoptimierung ohne Reglerparameter

Der Regleralgorithmus F_{Rt} -Wurzelrekursion:

Der vorgelegte Regleralgorithmus ist hauptsächlich eine rekursive Wurzelfunktion, bei der **keine Reglerparameter erforderlich** sind. Der Regleralgorithmus passt sich selbständig den Prozessgrößen an und ist besonders in kritischen Fällen dem klassischen PID-Regler oder ähnlichen Reglern überlegen. Auf der Grundlage verschiedener gemessener Übergangsfunktionen von Strecken werden Führungs- und Störverhalten des Regleralgorithmus im Vergleich mit anderen Reglern dargestellt.

process optimization without controller parameters

The Controller-Algorithm F_{Rt} -root-recursion:

The shown Controller-Algorithm is a recursive root function **without controller parameters**. The algorithm is selftuning to the process variables and is especially superior in crucial cases the classical PID-Controller. Based of different plant step responses should be matched the command- and disturbance-action of the Controller-Algorithm to other controllers.

1. Adaptive bzw. selbstoptimierende Regelalgorithmen

Alle bekannten selbstanpassenden bzw. selbstoptimierenden Regleralgorithmen verwenden zur Realisierung des Algorithmus einen Parametersatz. Dieser wird auf verschiedenste Weise erstellt.

Zum einen werden die Parameter aus der Übertragungsfunktion der Strecke mit Hilfe der Laplace- bzw. z-Transformation abgeleitet oder als Zustandsraumregelung realisiert. Andere Verfahren gehen vom Übergangverhalten der Regelung und der selbsteinstellenden Beeinflussung der Regelgröße durch kontinuierliches Erfassen von Kennwerten aus [2], [3], [4].

Verfahren zur Verbesserung von PID-Reglern wie sie z.B. in [5] und [6] beschrieben sind, basieren auf der Umschaltung von Parametern (Override Control), der arbeitspunktabhängigen Parametersteuerung nichtlinearer Systeme mit (Gain-Scheduling) oder bei sehr großen Totzeiten auf einer Smith-Prädiktor-Regelung. Auch bei der Regelung entlang vorab optimierter Trajektorien [7], d.h. einem optimalen zeitlichen Stellwertverlauf mit dazu passendem Regelgrößenverlauf sind Einstellwerte erforderlich.

Beim inkrementalen PL-Regler (Profit Loop) zur Verbesserung des PID-Verhaltens errechnet man die Reglereinstellung nur mit Hilfe eines Parameters [8]. Dieser wird als Quotient aus der gewünschten Ausregelzeit und der Einschwingzeit der Regelstrecke gebildet. Dies stellt einen erheblichen Vorteil gegenüber anderen Prädiktivreglern dar, die mit mehreren Gewichtungen der Regeldifferenz und des „Stellaufwandes“ arbeiten.

Ein weiteres Verfahren zum Selftuning eines PID-Reglers basiert auf dem IAE-Kriterium unter Zuhilfenahme eines „Speed-Faktors“ als Quotient aus der Einschwingzeit $T_{95\%}$ der Strecke und der gewünschten Anregelzeit [9]. Auch dieses Verfahren kommt nicht ohne Einstellwerte aus.

Eine Patentrecherche bezüglich der Vergleichbarkeit der F_{Rt} -Wurzelrekursion mit anderen selbstoptimierenden Algorithmen ist in Abschnitt 6 aufgeführt. Sie erscheint sinnvoll, da diese Verfahren häufig direkt in die industrielle Anwendung finden. Die Besonderheit des vorgeschlagenen Algorithmus F_{Rt} -Wurzelrekursion ohne Parameter auszukommen, ist dort jedoch auch nicht gegeben.

2. Die F_{RT} -Wurzelrekursion (Offenlegung der Patentanmeldung EP2 400 356 A1)
 Der Algorithmus kann als digitaler Regler in jeder SPS oder einem Mikrocomputer bzw. Prozessrechner implementiert werden und hat folgende Form:

$$y(i+1) = n^g - k \cdot (w \cdot | y(i) \cdot K_s^z + h \cdot xd |)^m \quad (1)$$

Für $n=0$, $k=-1$, $z=-1$ und $m=1/2$ geht der Algorithmus in eine rekursive Wurzelfunktion über und ist in dieser Form für Strecken mit Ausgleich besonders geeignet.

Für $n=w$, $g=2$, $k=1$, $z=1$ und $m=1$ geht Gleichung 1 in eine rekursive Differenzfunktion über und ist hier besonders für Strecken ohne Ausgleich einsetzbar.

$$y(i+1) = \sqrt{w \cdot | y(i) / K_s + h \cdot xd |} \quad \text{für Strecken mit Ausgleich} \quad (2)$$

$$y(i+1) = w(w - | y(i) \cdot K_s + h \cdot xd |) \quad \text{für Strecken ohne Ausgleich} \quad (3)$$

w : Führungsgröße

y : Stellgröße

K_s : Streckengesamtverstärkung (**kann auch fest auf $K_s=1$ gesetzt werden**)

h : Gewichtung (**kann auch fest auf $h=0,001$ gesetzt werden**)

xd : Regeldifferenz (e)

Die Eingabe von Reglerparametern wie bei den klassischen Reglern PI-, PID usw. ist nicht erforderlich.

Der Algorithmus reagiert auf Schwankungen der Streckenverstärkung K_s im Gegensatz zum PID-Regler sehr robust, daher kann die Streckenverstärkung als einmaliger Festwert angenommen werden. Die Gewichtung h der Regeldifferenz xd wird einmalig als Festwert ($h=0,001 - 1$, empfohlen) eingegeben und stellt somit ebenfalls keinen Algorithmusparameter dar.

3. Simulation verschiedener Prozesse im Vergleich

Die Wirkung der F_{RT} -Wurzelrekursion auf die verschiedensten Regelstrecken bei Führungs- und Störverhalten wird im Vergleich mit dem klassischen PID-Regler untersucht und der Anspruch auf die Funktionsfähigkeit des Algorithmus an vier Beispielen aufgezeigt. Die Simulationen erfolgen mit SIMLER-PC [10], [11] und MATLAB Simulink [1].

3.1 Regelung einer schwach gedämpften Strecke vierter Ordnung mit Totzeit

Die Regelstrecke eines verfahrenstechnischen Prozesses sei als System vierter Ordnung mit einer großen Verzögerungszeitkonstanten $T_{11}=10s$, einer kleinen mit $T_{12}=2s$ sowie der PT2-Strecke mit $T_2=1,6 s$ und $d=0,3$ als auch der Totzeit von $T_t=0,2s$ gegeben. Die Gesamtverstärkung beträgt $K_s=1,1$. Der Prozess soll zunächst mit einem PID-Regler bei Führungs- und Störverhalten optimal eingestellt werden. Die Störung setzt nach $T_{st}=70s$ als Impuls der Amplitude $A_{st}=-0,1$ (entspricht -10% bezogen auf $w=100\%$) und der Impulsbreite $T_{sL}=10s$ ein. Bild 1 zeigt die Simulation mit SIMLER-PC.

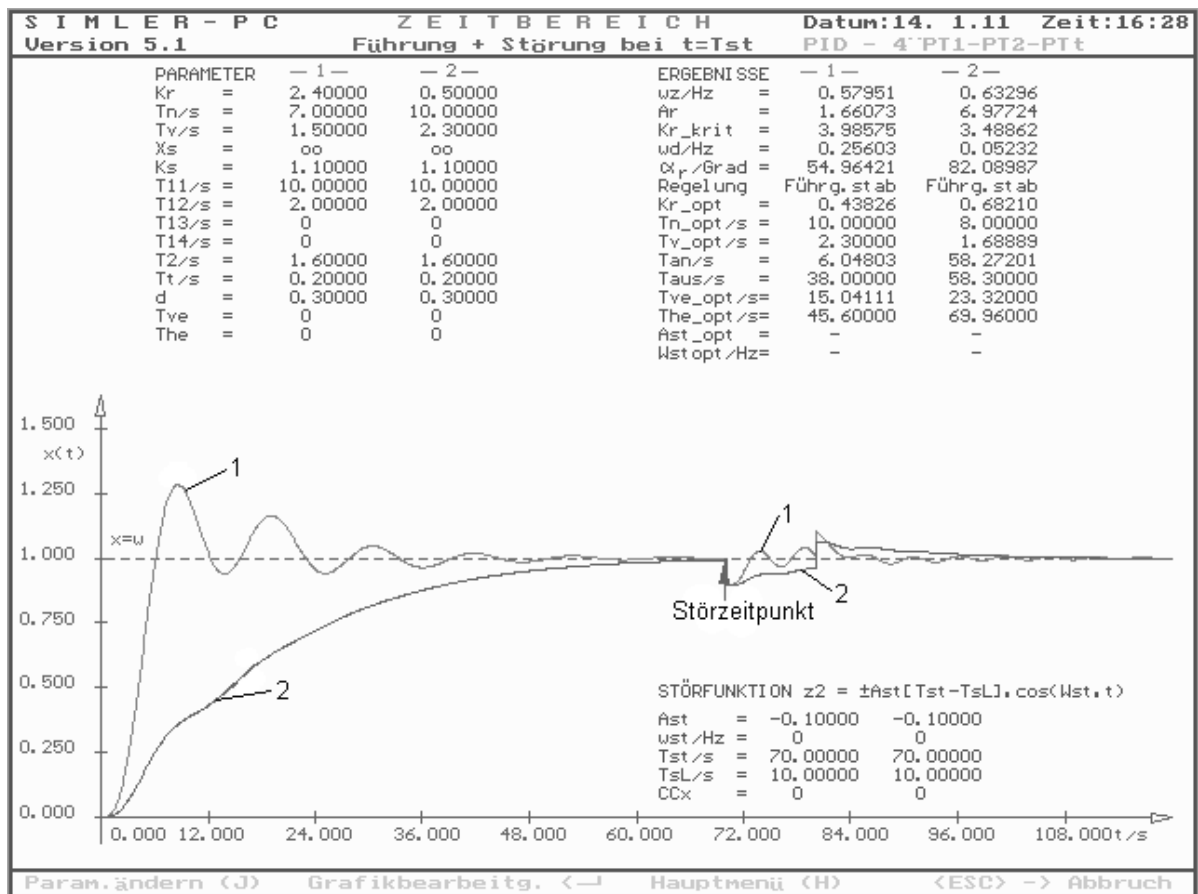


Bild 1 PID-Regler mit PT_4 -Strecke und Totzeit

In der ersten Simulation (Kurve 1) werden die Reglerparameter K_r , T_n und T_v frei gewählt. Die daraus resultierende Sprungantwort der Regelung ist bei Führungs- und Störverhalten stabil, schwingt jedoch erheblich über. Nimmt man für die zweite Simulation (Kurve 2) die Optimierungshinweise (K_{r_opt} , T_{n_opt} und T_{v_opt}) aus der Ergebnisliste von SIMLER-PC zu Hilfe, lässt sich der Regelkreis ohne nennenswertes Überschwingen einstellen. Die Anregelzeit T_{an} ist jedoch sehr groß, die Regelung des Prozesses verläuft zu langsam.

Das Führungs- und Störimpulsverhalten der F_{Rt} -Wurzelrekursion auf die gleiche Regelstrecke ist im Bild 2 dargestellt. Es ist dem optimierten Regelkreis mit PID-Regler bezüglich des Führungsverhaltens deutlich überlegen. Reglerparameter sind nicht erforderlich. Einziger Nachteil der F_{Rt} -Wurzelrekursion ist, dass die Störgröße am Ende der Strecke nicht ausgeglet wird. Sie muss durch messtechnische Maßnahmen eliminiert werden.

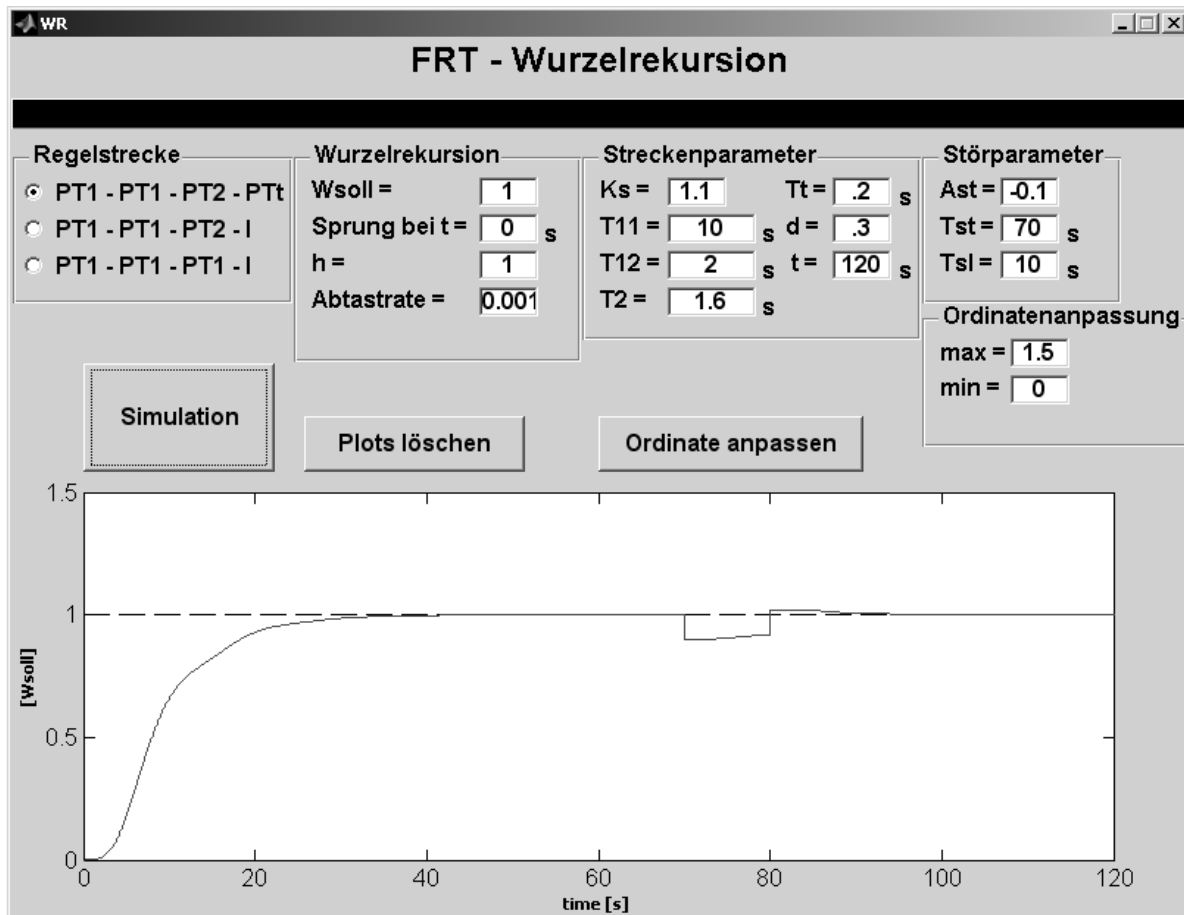


Bild 2 F_{Rt} -Wurzelrekursion mit PT_4 -Strecke und Totzeit

3.2 Regelung einer Strecke zweiter Ordnung mit großer Totzeit

Die Regelung von Prozessen mit großer Totzeit ist bekanntlich besonders problematisch. Hier soll nun eine Strecke zweiter Ordnung mit $T_{11}=0,02s$ und $T_{12}=0,07s$ auf Führungs- und Störverhalten untersucht werden, die eine Totzeit von $T_t=0,5s$ aufweist.

Zunächst soll die Strecke mit dem PID-Regler optimal eingestellt werden. Die Störung wird nach $T_{st}=15s$ in Form eines Impulses der Amplitude $A_{st}=0,15$ (15% bezogen auf die Führungsgröße $w=100\%$) und der Impulsbreite $T_{sl}=2s$ vorgegeben (Bild 3).

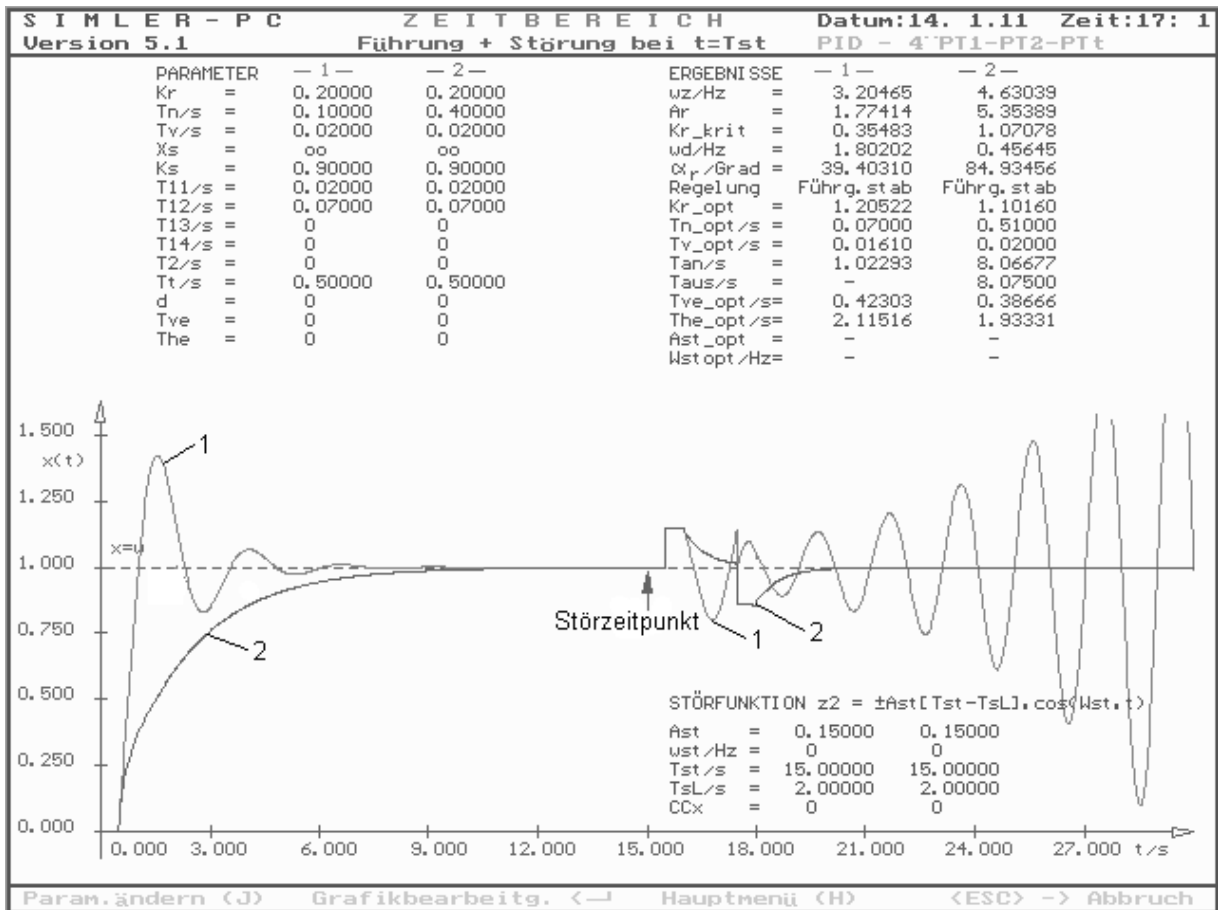


Bild 3 PID-Regler mit PT_2 -Strecke und großer Totzeit

In der ersten Simulation (Kurve 1) werden die Reglerparameter T_n und T_v annähernd in der Größe der Verzögerungszeiten T_{11} und T_{12} gewählt. Die Sprungantwort der Regelung schwingt allerdings sehr stark über. In der zweiten Simulation (Kurve 2) zeigt sich, dass Optimierungshinweise aus der Ergebnisliste von SIMLER-PC für die Nachstellzeit des Reglers offensichtlich dem Wert $T_n = T_t = 0,5$ s zustreben, während die Vorhaltzeit $T_v = 0,02$ s praktisch unverändert bleibt. Die Reglerverstärkung muss jedoch auch in der zweiten Simulation stark reduziert werden, um ein Überschwingen zu vermeiden. Damit wird das Führungsverhalten allerdings erheblich verlangsamt.

Auf die gleiche Regelstrecke und den gleichen Störimpuls am Streckenende reagiert die F_{RT} -Wurzelrekursion völlig problemlos (Bild 4). Die Regelung schwingt nicht über. An- und Ausregelzeit sind erheblich kleiner als bei der Simulation mit PID-Regler. Die F_{RT} -Wurzelrekursion regelt den Störimpuls am Ende der Strecke nicht aus, er muss auf messtechnische Weise beseitigt werden.

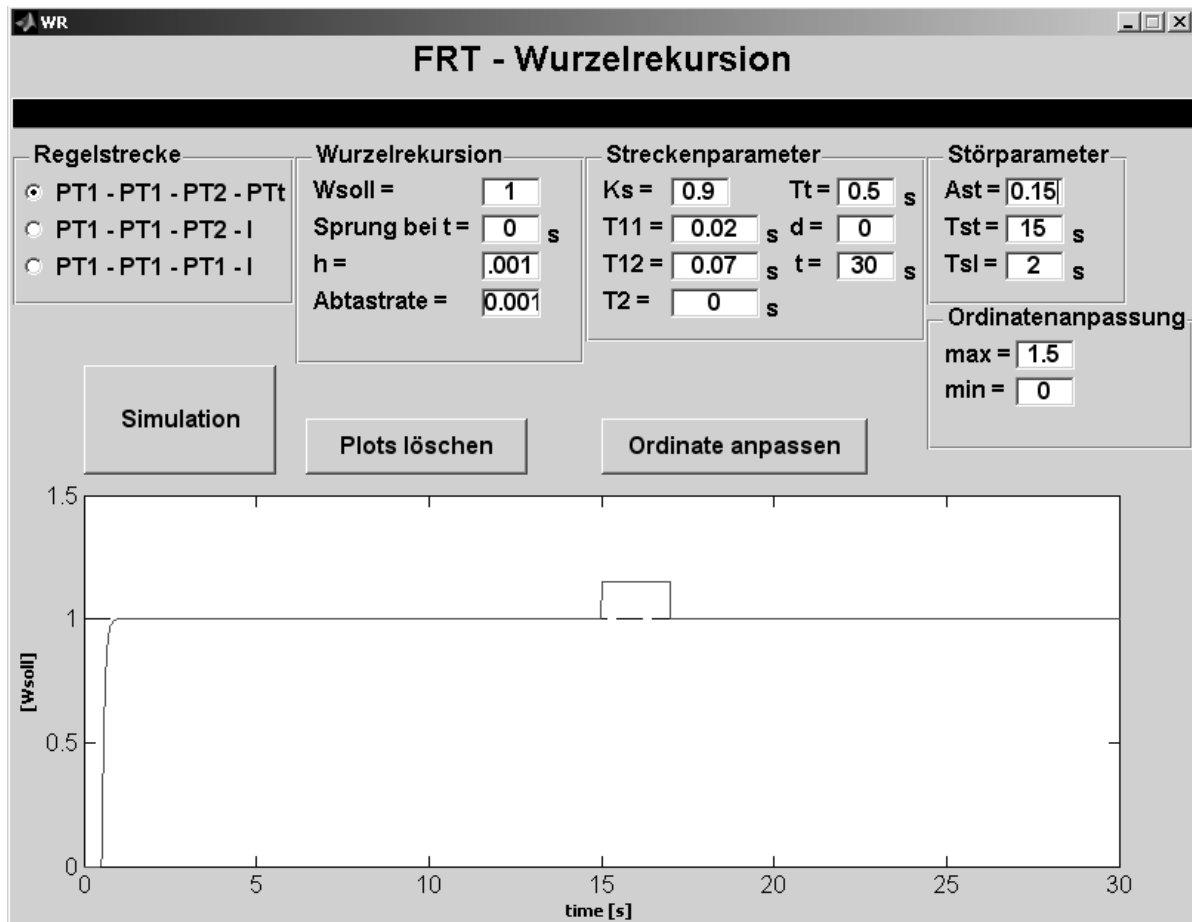


Bild 4 F_{Rt} -Wurzelrekursion mit PT_2 -Strecke und großer Totzeit

3.3 Regelung einer Strecke vierter Ordnung mit Integralglied

Für Strecken n-ter Ordnung mit Integralanteil wird die rekursiven Differenzfunktion (Gleichung 3) verwendet. Auch diese Gleichung benötigt keine Reglerparameter. Im folgenden Beispiel soll nun mit Hilfe des PID-Reglers und der F_{Rt} -Wurzelrekursion eine Positionsregelung der Antriebstechnik untersucht werden. Die Hochlaufzeit des Motors stellt dabei ein Integralglied dar. Nach 40s soll ein Sprung der Führungsgröße von $w=1$ auf $w=0,7$ erfolgen.

Die Sprungantwort der ersten Simulation (Bild 5) zeigt, dass die Reglereinstellung für Führungsverhalten nicht optimal ist, da bei einer Positionsregelung die Regelgröße aperiodisch auf den gewünschten Sollwert einlaufen muss. Auch weitere Versuche die Regelung mit Hilfe des PID-Reglers optimal einzustellen scheitern.

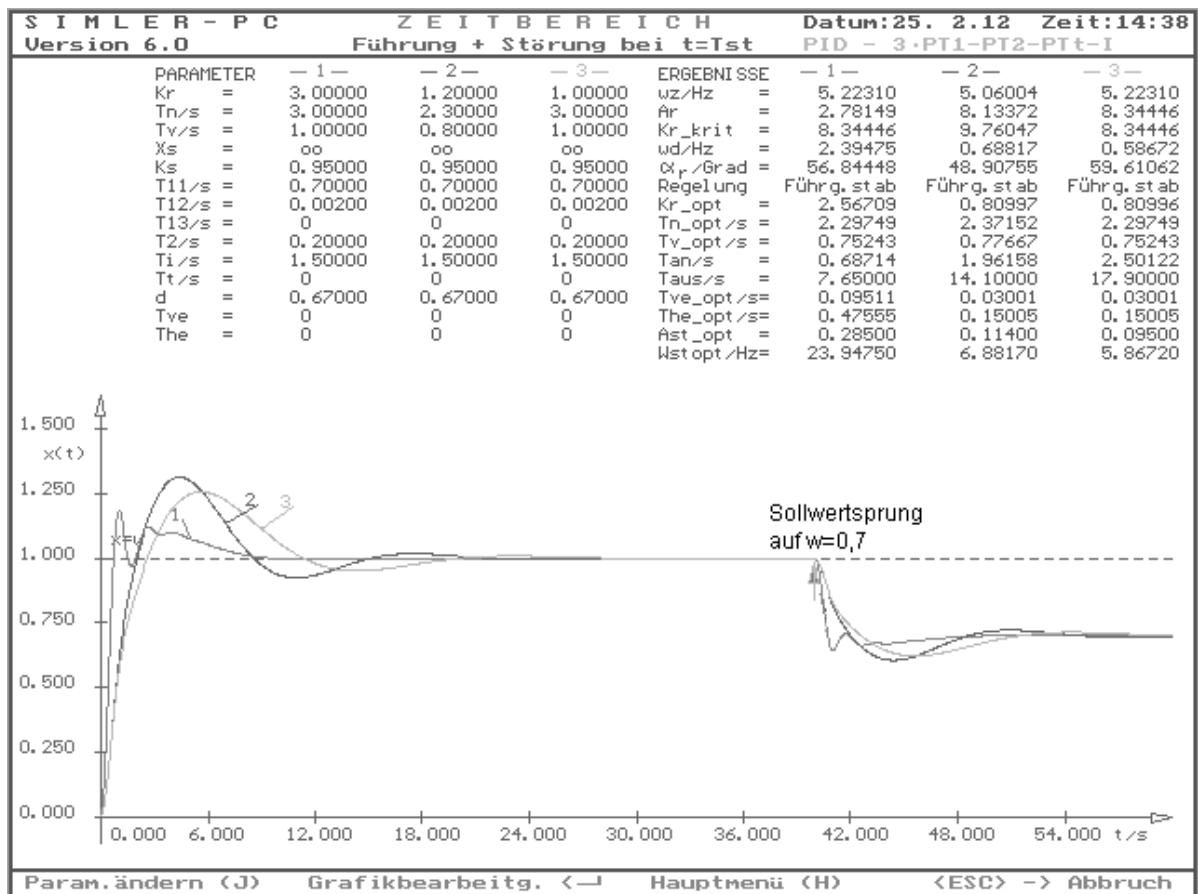


Bild 5 PID-Regler mit PT_4 -Strecke und Integralglied

Im Gegensatz zum PID-Regler stellt sich die F_{RT} -Wurzelrekursion (Gleichung 3) automatisch auf die Strecke ein (Bild 6). Es ergibt sich das gewünschte aperiodische Führungsverhalten. Anders als bei der Simulation mit dem PID-Regler erreicht die Regelgröße bereits nach etwa 12s den Sollwert $w=1$. Der Führungsgrößensprung auf $w=0,7$ wird ebenfalls problemlos ohne Überschwingen in kurzer Zeit ausgeführt.

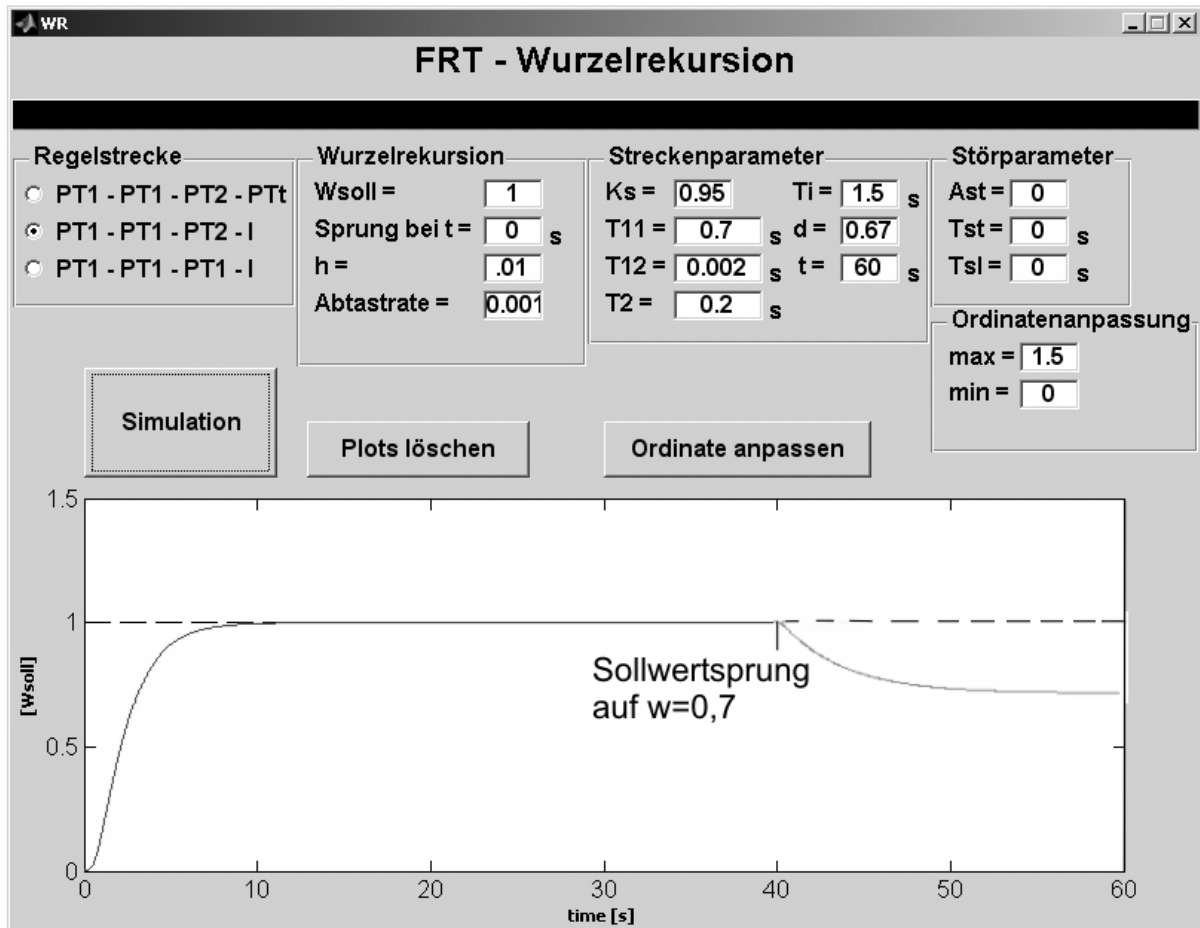


Bild 6 F_{Rt} -Wurzelrekursion mit PT_4 -Strecke und Integralglied

3.4 Strecke vierter Ordnung mit Integralglied bei Parameterschwankungen

In Bild 7 und Bild 8 wird der Einfluss von Parameterschwankungen einer schwingungsfähigen Strecke vierter Ordnung mit I-Anteil auf die Regelung bei Führungsverhalten dargestellt.

In der ersten Simulation wird die PT_2 -Strecke auf $T_2=0,6s$ bei einer Dämpfung von $d=0,6$ gesetzt. Die zweite Simulation zeigt die Veränderung bei $T_2=1s$ und einer schwachen Dämpfung von $d=0,1$. In der dritten Simulation wurde die Streckenzeitkonstante auf $T_2=1,8s$ vergrößert und die Dämpfung auf $d=0,8$ eingestellt.

Der in Bild 7 eingesetzte PD-Regler zeigt kein optimales Führungsverhalten bei den vorgenommenen Parameterschwankungen der PT_2 -Strecke. Die Reglerparameter müssten daher auf die veränderte Strecke jeweils neu eingestellt werden.

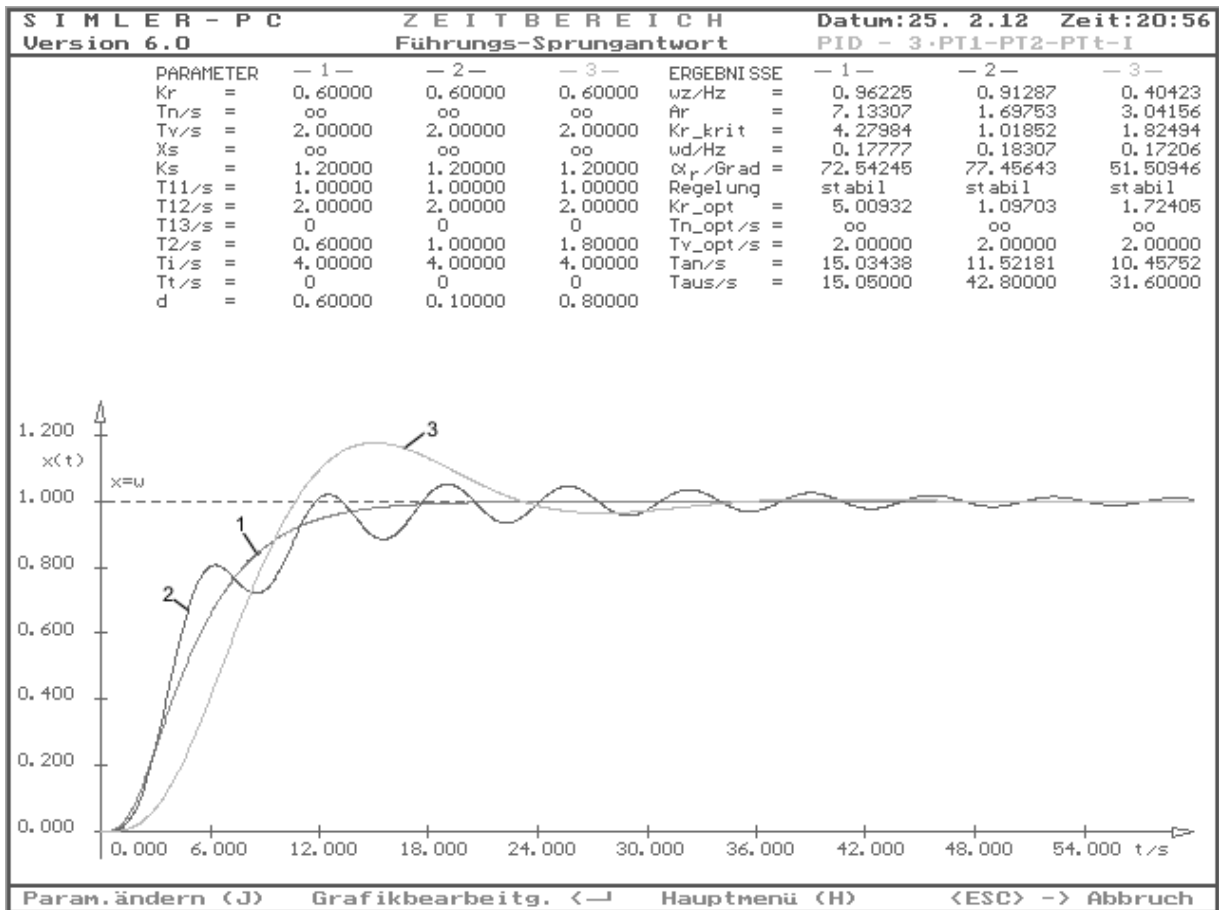


Bild 7 PD-Regler bei Parameterschwankungen

Bei Verwendung der F_{Rt} -Wurzelrekursion (Bild 8) macht sich der Einfluss von Parameterschwankungen der PT2-Strecke auf das Führungsverhalten kaum bemerkbar. Die Regelung ist diesbezüglich sehr robust.

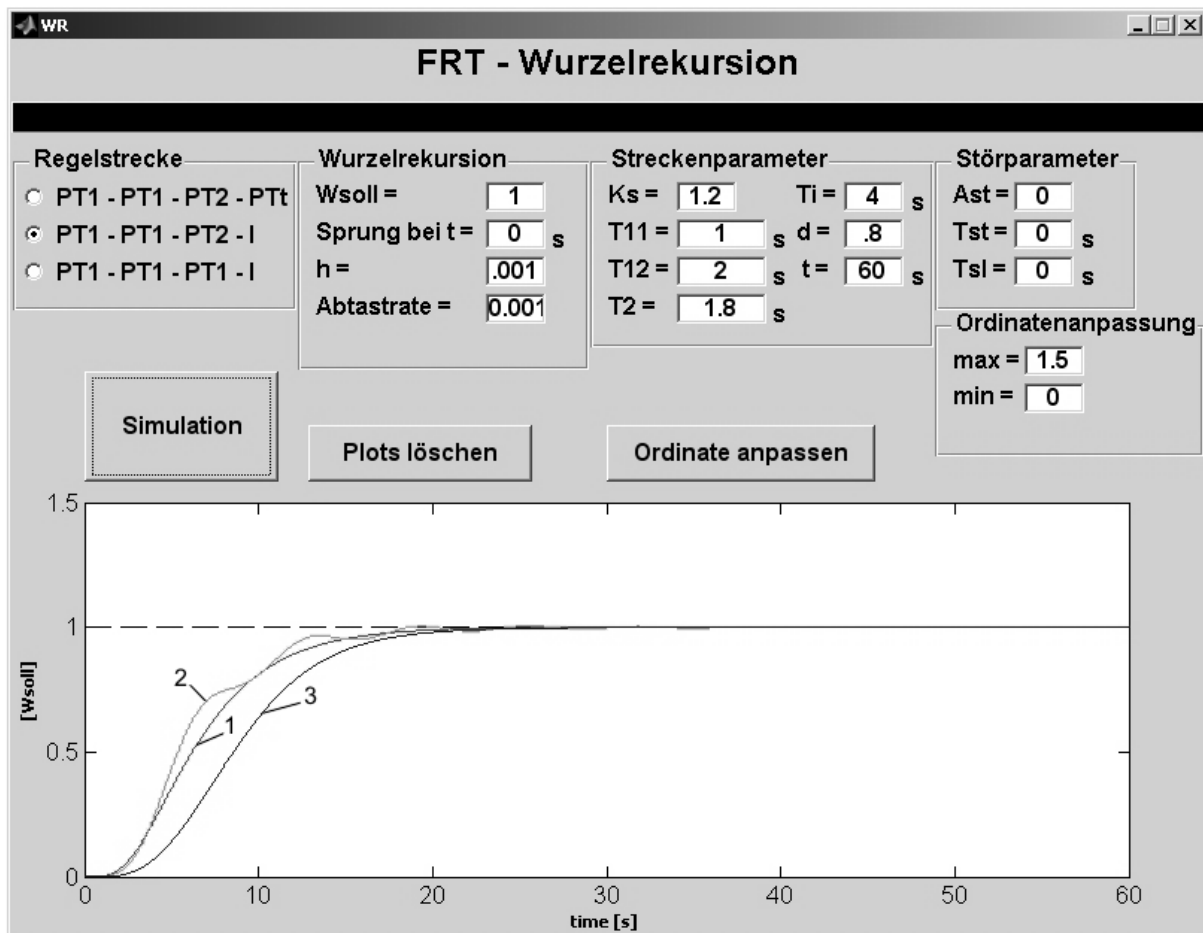


Bild 8 F_{RT} -Wurzelrekursion bei Parameterschwankungen

3.5 Strecke dritter Ordnung mit Totzeit bei schwankender Streckenverstärkung

In Bild 9 und Bild 10 wird der Einfluss von Schwankungen der Streckenverstärkung K_S einer schwingungsfähigen Strecke dritter Ordnung mit Totzeit bei Führungsverhalten untersucht.

Dabei zeigt Bild 9 den Einfluss von K_S unter Verwendung des PID-Reglers. Es ergibt sich eine erhebliche Verschlechterung des Führungsverhaltens bis hin zu Instabilität, wenn die Verstärkung im Bereich von $K_S=[0,3 \dots 2,0]$ verändert wird.

Im Gegensatz dazu zeigt die F_{RT} -Wurzelrekursion praktisch keine Veränderung des guten Führungsverhaltens (Bild 10) bei der gleichen Variation der Streckenverstärkung K_S .

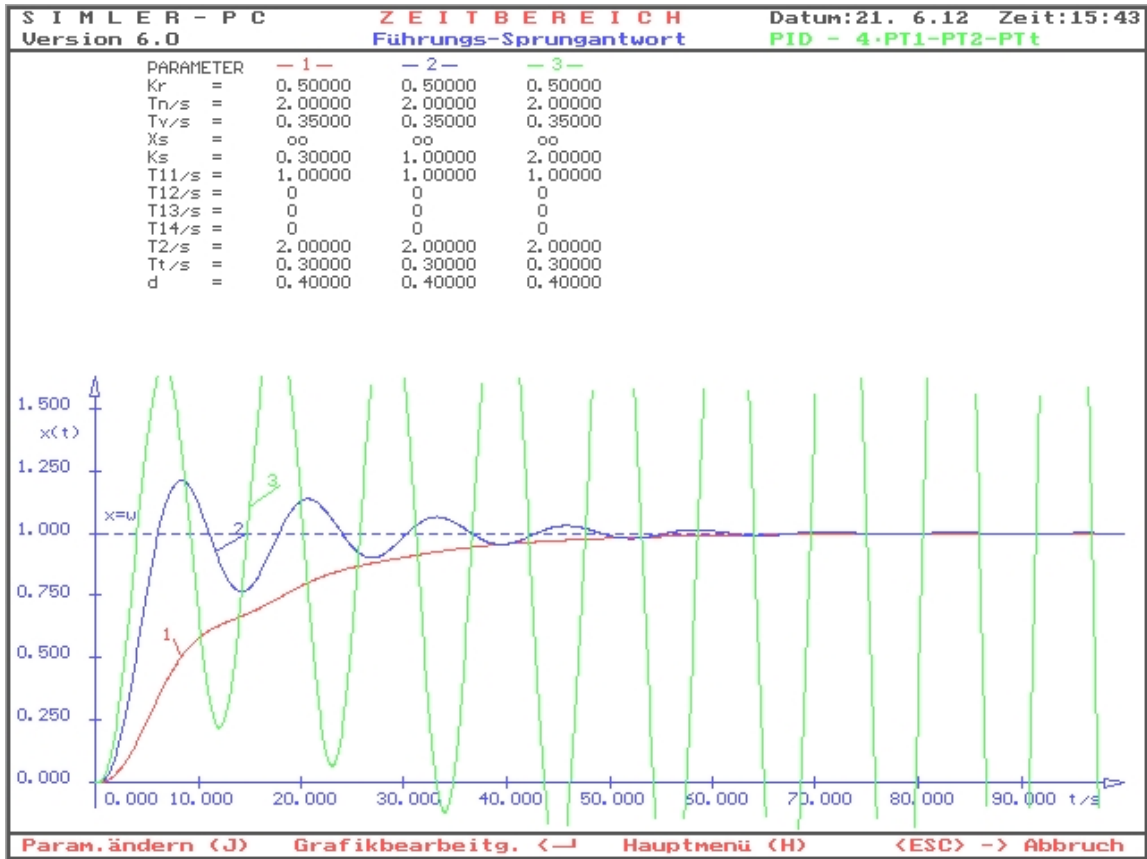


Bild 9 Einfluss von Schwankungen der Streckenverstärkung K_S bei PID-Regler

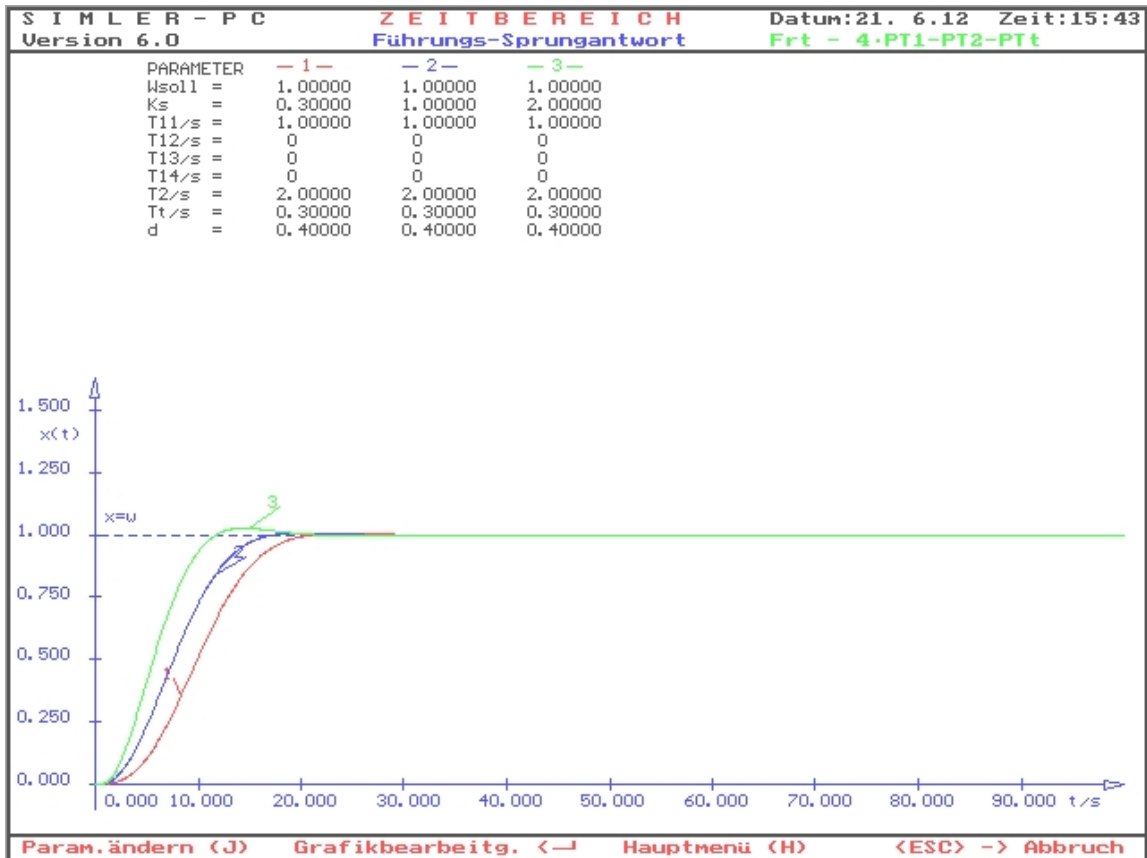


Bild 10 Schwankungen der Streckenverstärkung K_S bei F_{RT} -Wurzelrekursion

4. Zusammenfassung und Ausblick

Der Nachweis der Funktionsfähigkeit des Regleralgorithmus F_{Rt} -Wurzelrekursion nach Gleichung 1 ist mit den Programmen *SIMLER-PC* und *MATLAB Simulink* erfolgreich durchgeführt worden.

Schließt man den Fall aus, dass eine Regelung durch eine relevante, nicht durch messtechnische Maßnahmen zu beseitigende Sprungfunktion am Ende der Strecke gestört wird, stellt die F_{Rt} -Wurzelrekursion mit den Gleichungen (2) und (3) für Strecken höherer Ordnung mit/ohne Totzeit sowie mit/ohne Ausgleich durchaus ein regeltechnisches Universalwerkzeug dar.

Ohne Reglerparameter stellt sich praktisch jede Regelung mit Hilfe der F_{Rt} -Wurzelrekursion auf Führungs- und Störverhalten automatisch ein.

Eine Anpassung der Reglereinstellung infolge von Schwankungen der Streckenparameter muss nicht vorgenommen werden. Die Streckenparameter müssen, im Gegensatz zu den klassischen Verfahren der Regleroptimierung, nicht bekannt sein.

Regelalgorithmen in biologischen Systemen arbeiten bekanntlich ohne Parameter. Sie funktionieren, wenn auch häufig mehrfach gekoppelt, aus sich selbst. Dieses Verhalten zeigt auch die F_{Rt} -Wurzelrekursion nach Gleichung 2.

Nicht zuletzt hat diese Funktion in ihrer ursprünglichen Form auch einen religionsphilosophischen Grundwert [12].

5. Literatur

- [1] a) Grupp, Frieder und Florian: MATLAB 7 für Ingenieure. Grundlagen und Programmierbeispiele. Oldenbourg, München 2004.
b) Bayrak, G.; Wannagat, A.; Vogel-Heuser, B.: Automatische Modelltransformation zwischen MATLAB Simulink und der Steuerung. SPS/IPC DRIVES, Nürnberg 2007.
c) Orlowski, P. F.: MATLAB Simulink Simulationsoberfläche für die F_{Rt} -Wurzelrekursion.
- [2] Rusin, V.: Adaptive Regelung von Robotersystemen in Kontakt-Aufgaben. Diss. Otto-vonGuericke-Universität Magdeburg 2007.
- [3] Unbehauen, R.: Systemtheorie, Bd.2, Mehrdimensionale, adaptive und nichtlineare Systeme, 7. Aufl. Oldenbourg, München 1998.
- [4] Unbehauen, H.: Regelungstechnik II. Zustandsregelungen, digitale und nichtlineare Regelsysteme, 8. Aufl. Vieweg, Berlin 2000.
- [5] Pfeiffer, B-M.; Wieser, R.; Lorenz, O.: APC-Werkzeuge in Prozessleitsystemen. Teil 1, atp 4/2009, S. 36-44, Teil 2, atp 5/2009, S. 26-35.
- [6] Föllinger, O.: Regelungstechnik, 6.Aufl. Hüthig, Heidelberg, 1990.
- [7] Pfeiffer, B-M.: PID-Regelung von Batch-Prozessen entlang vorab optimierter Trajektorien.. atp 4/2003, S. 76-87.
- [8] Dittmar, R.: Prädiktivregler Profit Loop als Ergänzung zu PID. atp 6/2009, S. 22-25.
- [9] Dittmar, R.; Harmse, M.: Robuste Einstellung dezentraler PID-Regler in einer Mehrgrößenregelung. atp edition 12/2009, S. 68-78.
- [10] Orlowski, P. F.: Programmpaket SIMLER-PC 6.0 – Simulation und Optimierung von Regelkreisen im Zeit- und Frequenzbereich, sowie Regelstrecken-Identifikation (viersprachig). TH-Mittelhessen, Fachbereich ME 2012.
www.me.th-mittelhessen.de/personen/professoren/orlowski/simulation-regelungstechnik/
Datei [SIMLER PC 6.0 Setup\(zip\)](#)
- [11] Orlowski, P. F.: Praktische Regeltechnik. 9. Aufl. Springer, Berlin 2011.
- [12] Orlowski, P. F.: Wisse Vollendung nach den Wurzeln der Heilung. diagonal, Marburg 2007.

6. Patentrecherche *Algorithmen zur Lösung regeltechnischer Aufgaben*

Nr. Patentschrift veröffentlicht	Kurze Erläuterung, Einschätzung, Bewertung
1 DE10226670 B4 09.02.2004	Dieser adaptive Regler ist für Führungs- und Störverhalten geeignet. Zur zeitoptimalen Einstellung der Regelgröße sind jedoch erste Vorgabeparameter und, aus dem Verlauf der Regelgröße ermittelt, weitere Vorgabewerte notwendig, welche die Führungsgröße beeinflussen.
2 DE19620706 C1 24.07.1997	Ein für Positionsregelungen entworfener numerisch aufgebauter Regler, der lineare Regelstrecken voraussetzt. Als Parameter zur Berechnung der Stellgröße wird die Vorgabe der Ausregelzeit benötigt. Weitere Parameter scheinen nicht erforderlich zu sein.
3 DE69408034 T2 03.09.1998	Dieses digitale, numerische Verfahren, ist speziell für Strecken mit Totzeit konzipiert und benötigt zur interaktiven, selbsteinstellenden Beeinflussung der Regelgröße ein oder mehrere Messwerte (Parameter) , die mit Hilfe einer Periodenmesseinrichtung aus dem zeitlichen Verlauf der Regelgröße erfasst werden.
4 DE3786977 T2 25.11.1993	Diese Patentschrift ist so allgemein formuliert, dass es schwierig ist anzugeben wie viel Parameter für die Realisierung des gerade wirksamen Algorithmus zur Steuerung eines (auch nicht näher beschriebenen) Prozesses notwendig bzw. vorzugeben sind.
5 DE68919248 T2 23.03.1995	Das hier beschriebene Regelungssystem benötigt zu seiner Funktion allein vier Parameter und kommt daher als konkurrierendes Verfahren nicht in Betracht. Solche und ähnliche Verfahren sind heute bereits Allgemeingut.
6 DE69028054 T2 23.01.1997	Ein Verfahren zur Regelung der Geschwindigkeit von Flüssigkeitsströmen und deren Temperatur. Aus dem Text und auch Fig. 2 des Patentbeschlusses lässt sich nicht entnehmen wie viel Parameter zur adaptiven Einstellung bzw. Realisierung des Regelungs- und Adaptiv-Prozessors erforderlich sind. Wie z.B. die Parameter K_I und K_{peS2} (in Fig. 2) eingestellt werden, wird nicht erläutert. Von seinem komplexen Aufbau her steht dieses Verfahren sicher nicht in Konkurrenz zu dem von mir erfundenen.
7 DE69131505 T2 17.02.2000	Es handelt sich um einen Zustandsraumregler für die Positionierung eines Roboterarmes. Über Anzahl der Parameter der verwendeten Zustandsübergangsmatrix werden keine Aussagen gemacht. Das Führungs- und Störverhalten dieses Verfahrens werden ebenfalls nicht näher beschrieben.
8 DE69803577 T2 01.08.2001	Dieser adaptive Kaskadenregelalgorithmus benötigt ein Minimum und ein Maximum der Stellgröße , ansonsten sind keine zusätzlichen Parameter zu erkennen. Welche Prozesse mit diesem Algorithmus regelbar sind (Führungs- und Störverhalten), wird nicht beschrieben.
9 DE19581705 T1 08.10.1998	Das System enthält einen zeitabhängigen Systemausgang, wobei der Regelungsvorgang auf einer Polynomfunktion mit einer bestimmten, nicht näher genannten, Anzahl von Regelungskoeffizienten (Parametern) basiert, die durch eine Berechnungsvorrichtung laufend selbsttätig optimiert werden.
10 DE60007198 T2 14.10.2004	Eine Ventilregleinrichtung zur Regelung des Materialflusses technischer Prozesse. Es werden keine Angaben darüber gemacht wie das Einstellsystem (Fig. 6-8) die drei Parameter des eingesetzten PID-Regleralgorithmus optimiert.

7. Kurzbiographie des Autors

Prof. Dipl.-Ing. Peter F. Orłowski lehrt an der Technischen Hochschule Mittelhessen die Fächer *Regeltechnik*, *Angewandte Elektronik* und *Elektrische Antriebe*.

Hauptarbeitsfelder sind: Simulationssoftware zur Identifikation und Optimierung technischer Prozesse.

Adresse:

Technische Hochschule Mittelhessen, Wiesenstr. 14, D-35390 Gießen

Tel.(0641) 309-2221 / 2217,

Fax (0641) 309-2911,

Internet: www.me.th-mittelhessen.de/personen/professoren/orlowski/

E-mail: peter.orlowski@me.th-mittelhessen.de