



Prof. em., Dr.-Ing. S. Zacher

PFC: Predictive Functional Control

Umsetzung des *Richalet*-Verfahrens mittels Übertragungsfunktionen in Bildbereich
und Herleitung von neuen Algorithmen SPFC und Surf Control

“Die Idee der prädiktiven PFC-Regelung wurde in den 70er Jahren von *Jacques Richalet* für P-Strecken mit Verzögerung vorgeschlagen und in [103] weiter entwickelt. Die aktuelle Sprungantwort der Regelstrecke $x(t)$ wird an die Sprungantwort eines vorher gegebenen dynamischen Modells $x_m(t)$

$$T_M \frac{dx_M(t)}{dt} + x_M(t) = K_{PM} \hat{y}$$

angepasst.“

S. Zacher, M. Reuter: *Regelungstechnik für Ingenieure*,
Seite 361, Springer Vieweg Verlag, 15. Auflage, 2017

Abstract, Urheberrechts- und Haftungshinweis

Das von *J. Richalet* vorgeschlagene und entwickelte PFC-Konzept verspricht eine effektive Anpassung der laufenden Regelgröße $x(t)$ an Ausgang eines vorgegeben Modells $x_M(t)$ während der Regelung. Die gewünschte Ausregelzeit wird in mehrere Zeitabschnitte (Prädiktionshorizonte) aufgeteilt. Durch periodischen Vergleich der Regelgröße $x(t)$ mit dem gewünschten Wert $x_M(t)$ innerhalb jedes Horizonts wird die Stellgröße zum nächsten Prädiktionshorizont korrigiert.

Der Entwurf des PFC-Algorithmus erfolgt im Zeitbereich durch die Lösung von DGL (Differentialgleichungen). Dadurch ist der Zusammenhang zwischen Parametern der Strecke und des Modells nicht leicht nachvollziehbar. Bei Regelstrecken höherer Ordnungen $n > 2$ wird die Lösung von DGL und der Vergleich zwischen $x(t)$ und $x_M(t)$ aufwändig, wenn überhaupt möglich, was ein Hindernis für praktische Realisierbarkeit des Verfahrens darstellt.

Im vorliegenden *Automation-Letter*, wie auch in früheren Publikationen des Autors [3, 4, 5], wird das PFC-Verfahren in zwei Richtungen weiter entwickelt:

- Der Entwurf der PFC-Regelung wird im Bildbereich mittels Übertragungsfunktionen ermöglicht
- Die DGL-Lösung von *Richalet* wird mittels Übertragungsfunktionen in eine anschauliche PFC-Struktur umgesetzt, woraus die Einstellung des Regelkreises folgt. Diese Lösung wurde zu einem neuen Verfahren entwickelt und „Simplified PFC“, kurz SPFC, genannt. Die Besonderheit des SPFC-Verfahrens besteht darin, dass nicht allein die Strecke, sondern der gesamte Regelkreis samt Regler und Strecke an ein gewünschtes Modell nach dem PFC-Konzept angepasst wird.

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

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

Für die Anwendung der vorliegenden Publikation in der Industrie, im Laborbetrieb und in anderen praktischen Fällen sowie für eventuelle Schäden, die aus unvollständigen oder fehlerhaften Angaben über das dynamische Systeme ergeben können, übernimmt der Autor keine Haftung. **For the practical use of the results of this publication takes the author no responsibility.**

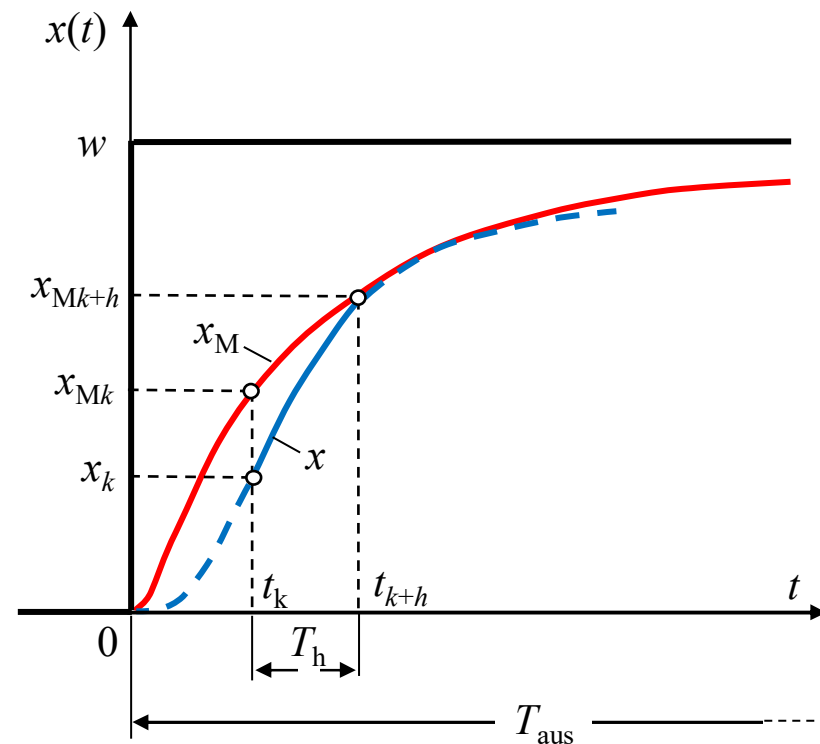
INHALT:

1. Einführung	Seite 4
2. Geschichte	Seite 7
3. PFC von <i>J. Richalet</i>	Seite 10
3.1 Referenztrajektorie und Prädiktionshorizont	Seite 10
3.2 Prädiktion für ein Horizont	Seite 11
3.3 Prädiktion für mehrere Horizonte	Seite 13
3.4 Beispiel einer Prädiktion für mehrere Horizonte	Seite 14
3.5 Umsetzung von Rekursionen mit MATLAB	Seite 16
4. Übergang von Rekursionen zu Übertragungsfunktionen	Seite 18
5. SPFC (simplified PFC)	Seite 22
6. Surf Control (Multiset DSM)	Seite 25
7. Literaturquellen	Seite 27

1 Einführung

„Modellbasierte prädiktive Regelungen (MPC) zeichnen sich als Regelungsverfahren dadurch aus, dass ein Modell für das dynamische Verhalten des Prozesses explizit im laufenden Betrieb des Reglers verwendet wird. Seit ihren Anfängen in den 70er Jahren des vorigen Jahrhunderts in der Petrochemie und der Wehrtechnik hat die modellprädiktive Regelungstechnik in den letzten Jahren insbesondere in die Verfahrenindustrie Einzug gehalten und wird seitdem erfolgreich für die Lösung anspruchsvoller Regelungsaufgaben eingesetzt. Bei dem hier betrachteten MPC-Verfahren handelt es sich um den *Predictive Functional Control* (PFC) Ansatz nach *Jacques Richalet*.“ [13]

Die Grundidee des PFC-Verfahrens besteht darin, dass die Sprungantwort $x(t)$ einer reellen Regelstrecke an die Sprungantwort $x_M(t)$ eines Modells bzw. an einer gewünschte Referenztrajektorie (Target) während der Regelung angepasst wird. Der Regelkreis wird mit der Abtastzeit T digitalisiert, woraus die Rekursionen der Stellgröße $y(n)$ hergeleitet werden. Die gesamte Ausregelzeit T_{aus} wird in so genannte Prädiktionshorizonte der Länge T_h aufgeteilt. Die aktuelle Stellgröße $y(n)$ wird Innerhalb jedes Horizonts so berechnet, damit die Regelgröße $x(t)$ ständig die vorher berechnete Referenztrajektorie erreicht.



1 Einführung

„Die Referenztrajektorie stellt den vorübergehenden Soll-Verlauf dar, dem gefolgt wird, um den gewünschten Sollwert zu erreichen. Folglich ist die Referenztrajektorie das gewünschte Verhalten der Regelgröße. Man kann sagen, dass Referenztrajektorie eine zeitabhängige Variable ist, die gegen den Sollwert konvergieren wird. Sie gibt vor, in welcher Form die Regelgröße dem Sollwert annähern soll. Normalerweise wird eine zukünftige Aktion gesucht, so dass die vorhergesagte zukünftige Antwort mit mehreren festen Punkten auf der Referenztrajektorie korrespondiert, diese werden als *Füguings-Punkte* (coincidence points) bezeichnet.“ [15]

Die Referenztrajektorie kann verschiedene Formen haben: sie kann aus Look-up Tabellen bestehen, analytisch berechnet oder abhängig von der Zeit sein, z.B. Rampe oder Exponentialfunktion. Die letzte Funktion widerspiegelt das Verhalten von natürlichen Prozessen und weist das gewünschte aperiodische Annäherungsverhalten ohne Überschwinger an Sollwertverlauf auf. Dadurch wird die e-Funktion am häufigsten in der chemische Technologie verwendet.

„Bei einem PID-Regler wird die Stellgröße aus dem Soll-/ Istwert-Vergleich bestimmt. Bei dem PFC-Regler wird mit Hilfe der Referenztrajektorie und dem Prädiktionshorizont (der angibt, wie weit in die Zukunft geschaut wird) zu jedem Abtastzyklus n festgelegt, wie stark der Regler eingreifen muss, um den Wert auf der Referenztrajektorie zum bestimmten Zeitpunkt zu erreichen.

Ein gutes Regelverhalten wird erreicht, wenn der Prädiktionshorizont so gewählt wird, dass die Modellreaktion auf eine Stellgrößenänderung am größten ist.

Bei einem Modell 1. Ordnung entspricht der Prädiktionshorizont einem Abtastschritt, da die e-Funktion genau in diesem Punkt die größte Steigung besitzt.

Bei einem Modell 2. Ordnung liegt der optimale Prädiktionshorizont im Wendepunkt.“ [13]

1 Einführung

Der Vorteil des PFC-Verfahrens besteht darin, dass die Regelgröße $x(t)$ nicht nur an den gegebenen Sollwert w ausgeregelt, sondern auch an die Referenztrajektorie $x_M(t)$ angepasst wird. Für aperiodische Strecken 1. und 2. Ordnung mit Verzögerung (P-T1-Strecken) oder mit Totzeit (P-Tt-Strecken) funktioniert das Verfahren bei Führungsverhalten und bei einigen Fällen von Störverhalten einwandfrei. Jedoch beginnt die Anwendung dieses Verfahren problematisch werden, wenn es sich um die Regelstrecken höheren Ordnungen, besonders um die schwingungsfähigen Strecken handelt, weil die PFC-Algorithmen aus Differentialgleichungen hergeleitet werden.

Die vorliegende Publikation besteht aus drei Teilen:

1. Das PFC-Verfahren wird nach [3] kurz beschrieben und an Beispielen [13 -15] untersucht.
2. Der PFC-Algorithmus wird im Bildbereich mittels Übertragungsfunktionen umgesetzt und vereinfacht. Damit wird es ermöglicht, die Simulation des PFC-Regelkreises mit MATLAB/Simulink durchzuführen, was einige Vorteile gegenüber MATLAB-Skripte nachweist, nämlich: Einfachheit, Anschaulichkeit und die direkte C Code Generierung aus analogen Modellen mit *Simulink Coder* oder *PLC Coder* anstelle der aufwändiger z-Transformation.
3. Aus dem PFC-Algorithmus wird ein vereinfachter Algorithmus nach [16-18] hergeleitet, der zu einem neuen Verfahren, dem so genannten SPFC (simplified PFC), entwickelt wird. Das SPFC-Verfahren hat gegenüber PFC einige Vorteile. Damit kann man die Regelalgorithmen für komplizierte Strecken viel einfacher erstellen und die C Code direkt aus analogen Simulink-Modell generieren, wie oben bereits erwähnt wurde.

2 Geschichte

RICHALET Jacques

13th July 1936 VERSAILLES

Diploma

- Aeronautics Engineer - Paris 1960 (ENSAé)
- Master of sciences - Electrical Engineering - Berkeley (USA) 1961 (Prof.Zadeh)
- PHD in Applied Mathematics, Paris 1965

Position

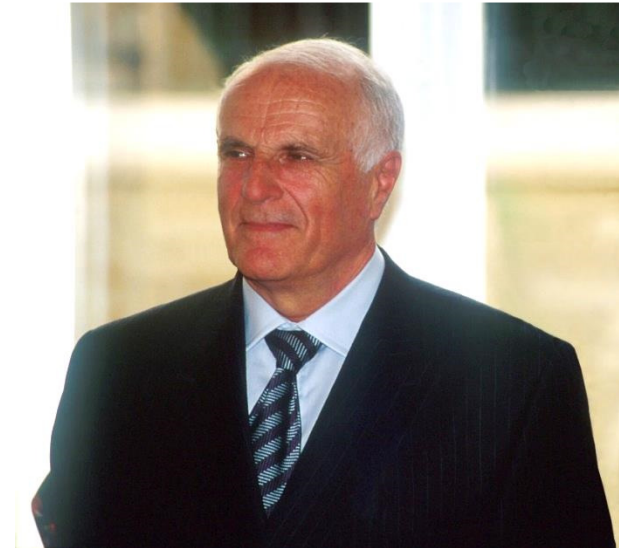
- Founder (1968) and manager of ADERSA till 2001 (3.2 M€/Year - 45 pers.)
- Today: Consultant : training and consulting in Modelling and Predictive Control

Publications

- More than 50 papers in Control Journals
- Recent books : "Pratique de l'identification" Hermès 1991
. "Pratique de la Commande Prédictive" 1993.
« La commande prédictive » Eyrolles 2004

Titles

- Past President of the National Committee of Automatic Control
- Past Chairman of EEC Interest Group "CIDIC"
- Chevalier de l'Ordre National du Mérite



“ *Grand father of Predictive Control* “

Quelle: http://homepages.lboro.ac.uk/~cgzkn/nmpc-sofap07/CV_anglais.htm

Jaques Richalet was born in Versailles, France, in 1936. He studied aeronautical engineering at ENSAE in Paris and graduated in 1960. He then went to Berkeley, USA, where he obtained his MSc degree under the guidance of Prof. Zadeh. Back in Paris he worked in the field of applied mathematics and received his PhD in 1965. his interest in model based predictive control started as early as 1968. In the same year he founded the process engineering consulting company ADERSA with a major breakthrough being the first commissioned application of model based predictive control to a binary distillation column in 1973. Since then he has been active in the areas of process identification, modelling and diagnosis methods such as predictive maintenance. Applications range from petro-chemical and food industry to faster systems as encountered in the automotive and defense sector. He was a manager of ADERSA till 2001 and is still working as a consultant for modelling and predictive control. In his academic career he published more than fifty articles as well as three books on identification and predictive control. He has been president of the National Committee of Automatic Control and chairman of EEC Interest Group "CIDIC". For his achievements he was awarded the status as Chevalier de l'Ordre National du Merite and many researchers would probably agree to call him the "grandfather of predicted control". [Biography of J Richalet](#)

Quelle: http://homepages.lboro.ac.uk/~cgzkn/nmpc-sofap07/keynote_lectures.htm

2 Geschichte

Nach der ersten Publikation des PFC-Verfahrens von *J. Richalet* im Jahr 1973 folgten seine weitere Publikationen und Präsentationen, z.B. [1, 2, 3], die das Verfahren weltweit bekannt machten.

Die wichtigste Rolle bei der Popularisierung, Weiterentwicklung und dem industriellen Einsatz des PFC-Verfahrens hat Prof. Dr. *Robert Haber* von TH Köln mit seinen Publikationen, Vorträgen, Seminaren und Unterrichtskursen gespielt, z.B. [4, 5, 6, 7].

Prof. Dr. Robert Haber

- » Fakultät für Anlagen, Energie- und Maschinensysteme
- » Institut für Anlagen- und Verfahrenstechnik (IAV)



<https://www.th-koeln.de/personen/robert.haber/>



24.09.2012

Vorausschauende Regelungstechnik: Pariser Pionier zu Gast in Köln

Die Arbeitsgruppe von Prof. Dr.-Ing. Robert Haber, Leiter des Labors für Prozessleittechnik am Institut für Anlagen und Verfahrenstechnik der Fachhochschule Köln, hat zum zweiten Mal ein Seminar über prädiktive Regelung mittels „Predictive Functional Control“ (PFC) organisiert.

Als Dozent für den PFC-Workshop konnte Dr. Jacques Richalet aus Paris gewonnen werden, der ein Pionier des Fachgebiets ist und zahlreiche Anwendungen bei verfahrenstechnischen Anlagen implementiert hat. Rund zwanzig Teilnehmer aus ganz Deutschland waren der Einladung gefolgt: Zu Gast waren Professoren der Fachhochschulen Aachen, Amberg-Weiden, Lübeck und Westküste mit ihren Mitarbeitern.



https://www.verwaltung.th-koeln.de/aktuelles/2012/09/verw_msg_05259.html

2 Geschichte

In relativ kurzer Zeit seit dem Entstehen in den 70er Jahren hat das PFC-Verfahren internationale Anerkennung gewonnen. Meist wurde PFC in chemischer Industrie, wie [8, 9], aber auch in anderen Branchen, wie z.B. Robotertechnik [10, 11], eingesetzt.

Dr Anthony Rossiter

Reader in Control Engineering
Lecturer, Final Year Project Supervisor

Teaching activity


- Year one: Modeling, Analysis and Control (ACS124).
- Year two: Control Systems Analysis for Continuous and Discrete Systems (ACS2214).

Research interests

- Predictive control, with a focus on modifying basic algorithms to optimise computational efficiency and simplicity.

Key achievements

- Developed early results in how to stabilise predictive control laws; these are now mainstream in the community.
- Created main paradigm for guaranteeing constraint satisfaction for systems subject to unknown disturbances.



<http://controleducation.group.shef.ac.uk/htmlformpc/pfc.html>

Für meine PFC-Beiträge (kurz in [16-18] beschrieben) bin ich Herrn *Dr. Martin Altebockwinkel*, Firma *evonik Rhöm*, dankbar. Er hat 2005 das Thema PFC für Projekt- und Diplomarbeit von *Thomas Hamm* [13,14] angeboten, die wir gemeinsam betreuten. Als letztes aber nicht am geringsten gilt meinen besten Dank der Projektgruppe *Heim/Koller/Staub* des Fernmaster Studiengangs der Hochschule Darmstadt für wesentlichen Beitrag [15] zur vorliegenden Publikation.



Dr. Martin Altebockwinkel,
Leiter EMR/PLT-Anlagentechnik,
Evonik Industries AD, Essen

www.chemietechnik.de/alarmmanagement-in-der-prozessindustrie/

Von zahlreichen Autoren mit PFC-Einsätzen sind unten nur zwei Autoren vorgestellt. Neben dem bereits erwähnten Prof. Dr. *Robert Haber* sind das *Dr. Anthony Rossiter* [12] von University of Sheffield mit seinem 8-teiligen YouTube Video-Kurs über PFC und *Satoru Hashizume* [8] von der Firma Sumitomo Chemical mit seiner didaktisch geschickt gestalteten Publikation.



Satoru HASHIZUME

Sumitomo Chemical Co., Ltd.
Production & Safety Fundamental Technology Center
Researcher

www.sumitomo-chem.co.jp/english/rd/report/theses/docs/2015E_4.pdf



Jürgen Staub, Sebastian Heim, Alexander Koller
Fernmaster Studiengang der Hochschule Darmstadt

3 PFC von J. Richalet

3.1 Referenztrajektorie und Prädiktionshorizont

Betrachten wir ein System, das sich mit linearen Differentialgleichungen, z.B. 1. Ordnung, beschreiben lässt:

$$T_M \frac{dx_M(t)}{dt} + x_M(t) = K_{PM} \hat{y}$$

Die Lösung einer solchen Differentialgleichung setzt sich aus zwei Teilen zusammen, der homogenen $x_a(t)$ und der partikulären $x_e(t)$ Lösung, die in [3] als „Free“ und „Forced“ bezeichnet sind:

$$x_M(t) = \underbrace{x_M(0)e^{-\frac{t}{T_M}}}_{x_e} + \underbrace{K_{PM}(1 - e^{-\frac{t}{T_M}})}_{x_a} \hat{y}$$

Die homogene Lösung $x_a(t)$ beinhaltet den Teil des Systems ohne eine Anregung von außen. Dieser Teil der Lösung beschreibt das Verhalten des Systems in Abhängigkeit von seiner Vergangenheit und seinen Eingangsgrößen in der Vergangenheit.

Bei der partikulären Lösung $x_e(t)$ sind die Anfangszustände des Systems Null und werden mit einer bekannten Funktion angeregt. Daraus ergibt sich das Systemverhalten für Eingangssignale. Der zeitliche Verlauf des Systems $x_M(t)$ ist die Summe aus der homogenen und der partikulären Lösung.

Die homogene Lösung $x_a(t)$ ist vollständig durch die Vergangenheit vorbestimmt und kann somit nicht beeinflusst werden. Folglich der einzige Weg ein System zu Regeln ist die Einflussnahme auf die partikuläre Lösung $x_e(t)$. Wenn vorhergesagt wird, welches Ausgangssignal benötigt wird, um den gewünschten Verlauf zu erzielen, dann ist auch festgelegt, wie der partikuläre Teil angeregt werden muss. Dabei kommt es immer darauf an, wie das gewünschte Ausgangssignal aussehen soll. Dieses gewünschte Signal ist der Ausgang des Modells $x_M(t)$ und wird als *Referenztrajektorie (R-Trajektorie)* bezeichnet.

Da die Regelung mit der Abtastzeit T erfolgt, wird die R-Trajektorie zu jedem Abtastschritt T in Abhängigkeit des gemessenen oder geschätzten Prozessausgangs neu initialisiert. Zu jedem Abtastschritt wird die R-Trajektorie neu aufgestellt mit verschiedenen Trajektorien, z.B. der vorherigen vorausgesagten Zukunft.

3.2 Prädiktion für ein Horizont

Die Zeitkonstante T_M der R-Trajektorie legt das dynamische Verhalten des Reglers fest und muss so gewählt werden, dass der Prozess dem gewünschten Sollwert im Rahmen seiner dynamischen Eigenschaften realistisch folgen kann.

Bei $t = T_{\text{aus}}$ erreicht der Modellausgang 95% seines Wertes im Beharrungszustand $x_M(\infty)$. Es wird angenommen:

$$T_{\text{aus}} = 3T_M$$

Der Modellausgang wird für die gesamte Ausregelzeit T_{aus} berechnet, die dann in n Zeitabschnitten (Prädiktionshorizonten) der Länge T_h aufgeteilt wird:

$$T_h = \frac{T_{\text{aus}}}{n}$$

Bezeichnet man

$$\alpha = e^{-\frac{T_h}{T_M}}$$

so ergibt sich die folgende rekursive Formel zur Berechnung des Modellausgangs aus der DGL :

$$T_M \frac{dx_M(t)}{dt} + x_M(t) = K_{\text{PM}} \hat{y} \quad \Longrightarrow \quad x_M(t) = x_M(0)e^{-\frac{t}{T_M}} + K_{\text{PM}}(1 - e^{-\frac{t}{T_M}})\hat{y} \quad \Longrightarrow \quad x_{M_{k+h}} = \alpha \cdot x_{M_k} + (1 - \alpha) \cdot K_{\text{PM}} \cdot y_k$$

Nun soll die Rekursion zur Berechnung der Stellgröße des Reglers bzw. des Eingangs der Regelstrecke erstellt werden. Betrachtet wird die Vorhersage für nur einen Horizont mit einem einzelnen Fügungs-Punkt.

Dafür werden einerseits die Regeldifferenzen des Modells e_{M_k} und $e_{M_{k+h}}$ zum Beginn t_k und zum Ende t_{k+h} jedes Prädiktionshorizonts bestimmt. Andererseits werden zu gleichen Zeitpunkten die Regeldifferenzen der reellen Regelgröße e_k und e_{k+h} bestimmt, wobei x_k der Istwert der Regelgröße und x_{k+h} der zukünftige Istwert ist:

$$e_k = w - x_k$$

$$e_{k+h} = w - x_{k+h}$$

3 PFC von J. Richalet
3.2 Prädiktion für ein Horizont

Die zukünftige Regelgröße x_{k+h} am Ende des k -ten Zeithorizonts wird folgendermaßen, abhängig von der tatsächlichen Regeldifferenz e_k nach dem hier gewünschten Verhalten mit dem Dämpfungsgrad λ errechnet und als Referenzwert x_{ref} bezeichnet:

$$x_{k+h} = (1 - \lambda)e_k \quad x_{ref} = x_{k+h} = (1 - \lambda)e_k$$

$$\lambda = e^{-\frac{T_\lambda}{T_{aus}}}$$

Die Wahl der Zeitkonstante T_λ wird später diskutiert.
 Die Regeldifferenzen des Modells sind:

$$e_{Mk} = w - x_{Mk}$$

$$e_{Mk+h} = w - x_{Mk+h}$$

Die Änderung der Regeldifferenz innerhalb des k -ten Zeithorizonts soll für die reelle Strecke und für das Modell gleich sein:

$$e_{Mk} - e_{Mk+h} = e_k - e_{k+h}$$

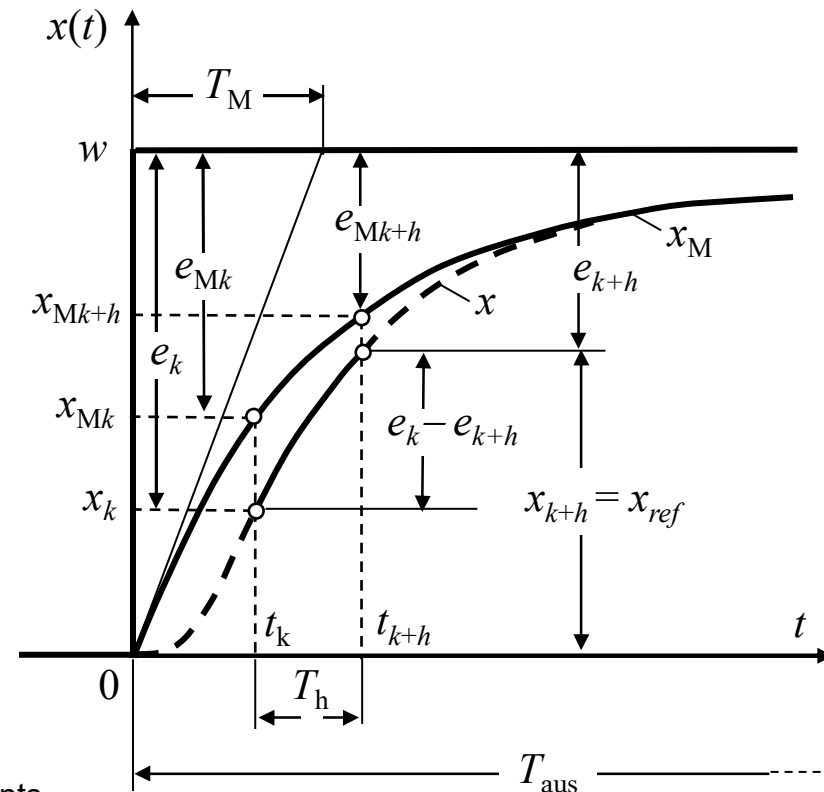
Daraus folgt: $x_{Mk+h} - x_{Mk} = x_{k+h} - x_k$

Setzt man in die letzte Gleichung anstelle der Modellregelgröße x_{Mk+h} den Wert

$$x_{Mk+h} = \alpha \cdot x_{Mk} + (1 - \alpha)K_{PM}y_k$$

und anstelle der zukünftigen Regelgröße x_{k+h} den Wert

$$x_{ref} = (1 - \lambda)(w - x_k)$$



so ergibt sich:

$$\alpha x_{Mk} + (1 - \alpha)K_{PM}y_k - x_{Mk} = (1 - \lambda)(w - x_k)$$

Daraus folgt laut [15] die Rekursion für die Stellgröße:

$$y_k = \frac{1}{K_{PM}} \left[x_{Mk} + \frac{1 - \lambda}{1 - \alpha} (w - x_k) \right]$$

3.3 Prädiktion für mehrere Horizonte

Betrachtet wird die Vorhersage für n -Horizonte mit einem einzelnen Fügungs-Punkt. Es wird angenommen, dass der Sollwert konstant und die R-Trajektorie e-Funktion ist.

Die abgetastete bzw. diskrete Modellfunktion ist gegeben mit dem Proportionalbeiwert K_{PM} und der Zeitkonstante T_M des Modells 1. Ordnung:

$$x_M(n) = \alpha \cdot x_M(n-1) + (1-\alpha) \cdot K_{PM} \cdot y(n-1) \qquad \alpha = e^{-\frac{T}{T_M}}$$

Betrachtet wird die Vorhersage für n -Horizonte mit einem einzelnen Fügungs-Punkt. Es wird angenommen, dass der Sollwert konstant und die R-Trajektorie e-Funktion ist.

In [15] ist gezeigt, wie die Lösung der obigen Rekursion aus einem homogenen Ansatz $\alpha^h x_M(n)$ und einem partikulären Ansatz $K_{PM}(1-\alpha^h)y(n)$ in folgender Form bestimmt wird:

$$y(n) = \frac{[w - x(n)](1 - \lambda^h) - \alpha^h x_M(n) + x_M(n)}{K_{PM}(1 - \alpha^h)}$$

Nach folgende Ersetzungen

$$b_{Mh} = 1 - \alpha^h \qquad l_h = 1 - \lambda^h$$

ergibt sich die Rekursion für die Stellgröße nach Vorhersage für h -Horizonten des betrachteten P-T1-Modells:

$$y(n) = \frac{[w - x(n)] \cdot l_h + x_M(n) \cdot b_{Mh}}{K_{PM} b_{Mh}} \quad \Longrightarrow \quad k = \frac{l_h}{b_{Mh}} \quad \Longrightarrow \quad y(n) = \frac{k w - [k x(n) - x_M(n)]}{K_{PM}}$$

3.4 Beispiel einer Prädiktion für mehrere Horizonte

Eine P-T1-Regelstrecke

$$G_S(s) = \frac{K_{PS}}{1 + sT_1} \quad \text{mit } K_{PS} = 2 \text{ und } T_1 = 50 \text{ s}$$

soll nach dem PFC-Verfahren mit Abtastzeit $T = 0,1$ geregelt werden. Die Ausregelzeit T_{aus} ist somit

$$T_{aus} = 3T_1 = 150$$

Zunächst wird die P-T1-Strecke digitalisiert bzw. z-transformiert. Laut [16,17] ist die z-Übertragungsfunktion

$$G_S(z) = \frac{b_0 K_{PS}}{z - a_1} \quad \text{mit} \quad a_1 = e^{-\frac{T}{T_1}} = e^{-\frac{0,1}{50}} = 0,998 \quad b_0 = 1 - a_1 = 0,002$$

Daraus ergibt sich die rekursive Lösung der Differenzgleichung:

$$x(n) = \frac{b_0 K_{PS} (1 - a_1^n)}{1 - a_1} y(0) + a_1^n x(0) \quad \xrightarrow{K = 1 + b_0 K_{PS}} \quad x(n) = K (1 - a_1^n) y(0) + a_1^n x(0)$$

Das gewünschte Verhalten bzw. das Modell hat auch P-T1-Verhalten, jedoch mit $T_M = 30$ s:

$$G_M(s) = \frac{1}{1 + sT_M}$$

Unter Beachtung

$$G_M(z) = \frac{b_{0M} K_{PM}}{z - a_{1M}} \quad a_{1M} = e^{-\frac{T}{T_M}} = e^{-\frac{0,1}{30}} = 0,9967 \quad b_{0M} = 1 - a_{1M} = 0,0033$$

3 PFC von J. Richalet

3.4 Beispiel einer Prädiktion für mehrere Horizonte

Die entsprechende Rekursion für R-Trajektorie

$$x_M(n) = \frac{b_{0M} K_{PM} (1 - a_{1M}^n)}{1 - a_{1M}} y(0) + a_{1M}^n x_M(0)$$

unter Beachtung

$$b_{0M} K_{PM} = a_{1M} \quad \Rightarrow \quad K_{PM} = \frac{a_{1M}}{b_{0M}}$$

wurde in [12] wie folgt umgeschrieben, wobei r der Referenzwert bzw. der Modellausgang im Fügung-Punkt ist.

$$x_M(n) = x(0) + [r - x(0)](1 - a_{1M}^n)$$

Für den einzigen Fügungs-Punkt gilt $x_M(n) = x(n)$:

$$x(0) + [r - x(0)](1 - a_{1M}^n) = K(1 - a_1^n)y(0) + a_1^n x(0)$$

Daraus wird die Rekursion der Stellgröße bestimmt:

$$y(0) = \frac{(1 - a_{1M}^n)r - a_1^n x(0) + a_{1M}^n y(0)}{K(1 - a_1^n)}$$

$$y(0) = \frac{(1 - a_{1M}^n)r - a_1^n x(0) + a_{1M}^n y(0)}{K(1 - a_1^n)}$$

Die Ergebnisse für n=5, n=8 und n=3:

3.5 Umsetzung von Rekursionen mit MATLAB

Nachfolgend ist die PFC nach Rekursion für Prädiktion mit h -Horizonten gezeigt:
$$y(n) = \frac{k_W - [kx(n) - x_M(n)]}{K_{PM}}$$

```

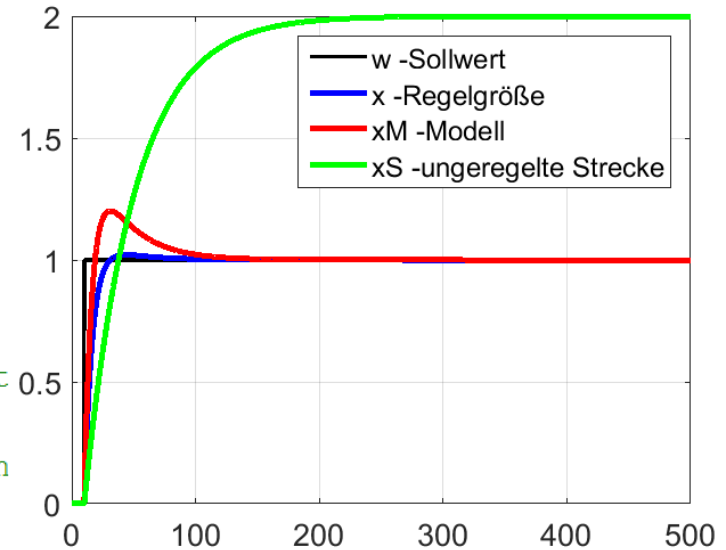
PFC_PT1.m x +
1 - clear
2 - clc
3
4 - KpS=2;           %Regelstrecke (P-T1)
5 - T1=40;
6 - KpM=2;           %Modell (P-T1)
7 - TM=30;
8 % Zeitparameter
9 %-----
10 - T_ aus=100;      %Ausregelzeit bzw.95% der Referenz Trajectorie
11 - t0=10;          %Zeiteingabe Sollwertsprung
12 - T = 0.1;        %Abtastzeit
13 - T_sim=500;      %Simulation-Ende
14 - N=T_sim/T;      %Anzahl Simulationsschritte
15 - time=0:T:(T_sim-T); %Simulationsdauer
16 - n=t0/T;         %Anzahl Schritte vor dem Sollwertsprung
17 %Prädiktionshorizont
18 - h=50;           %Anzahl Schritte in Horizont
19 - Th=T*h;         %Horizont-Länge
20 - lambda=exp(-Th/(T_ aus/3));
21 - lh=1-lambda^h;

```

3 PFC von J. Richalet

3.3 Umsetzung mit MATLAB

```
22 %Faktoren für die Differenzengleichung
23 %-----
24 alpha_S=exp(-T/T1); bS=1-alpha_S;
25 alpha_M=exp(-T/TM); bM=1-alpha_M;
26 alpha_Mh=alpha_M^h; bMh=1-alpha_Mh;
27 k=1h/bMh;
28 %Anfangsbedingungen -----
29 y=zeros(1,N); %Stellgröße
30 x=y; %Regelgröße bzw. geregelte St
31 xM=y; %Modell-Ausgang
32 xS=y; %ungeregelte Strecke im offen
33 %Regelung -----
34 sprung =1; %Sprunghöhe
35 w=[zeros(1,n) sprung*ones(1,N-n)]; %Ansteuerung nach dem Sollwertsprung
36 for i=t0:1:length(time) %erst bei t0=10 anfangen, um die Matrix zu füllen
37     xS(i)=xS(i-1)*alpha_S+bS*KpS*w(i-1); % ungeregelte Strecke
38     x(i)=x(i-1)*alpha_S+bS*KpS*y(i-1); % geregelte Strecke
39     xM(i)=xM(i-1)*alpha_M+bM*KpM*y(i-1); % Modell-Ausgang
40     y(i)=(w(i)-x(i))*1h+xM(i)*bMh/(KpM*bMh); % Stellgröße
41 end
42 plot(time,w,'k',time,x,'b',time,xM,'r',time,xS,'g')
43 h = legend('w -Sollwert','x -Regelgröße','xM -Modell','xS -ungeregelte Strecke',5);
44 set(h,'Interpreter','none')
45 %plot(time,xS,time,x)
46 grid
```



4 Übergang von Rekursionen zu Übertragungsfunktionen

Die Berechnungen von vorherigen Abschnitten kann man viel einfacher mit Simulink realisieren, und zwar ohne Verlust der Genauigkeit, wie unten gezeigt wird. Dafür wird zuerst die Rekursion in eine Form gebracht, die sich im Simulink darstellen lässt.

Die Referenztrajektorie wird, wie auch vorher, als Sprungantwort eines P-T₁-Gliedes mit Proportionalbeiwert $K_p = 1$ und Zeitkonstante T_h nach dem Eingangssprung e_k gewählt. Wird jedoch dabei gesetzt

$$T_\lambda = T_h \quad \text{und folglich} \quad \lambda = \alpha$$

so beträgt die Referenzgröße am Ende des Zeithorizonts 63% von e_k , wie im Bild rechts gezeigt ist, d. h. der Istwert des Regelkreises wird 63% der Abweichung von gewünschter Sprungantwort ausgleichen. Dabei ergibt sich aus der Rekursion für die Prädiktion mit einem Horizont

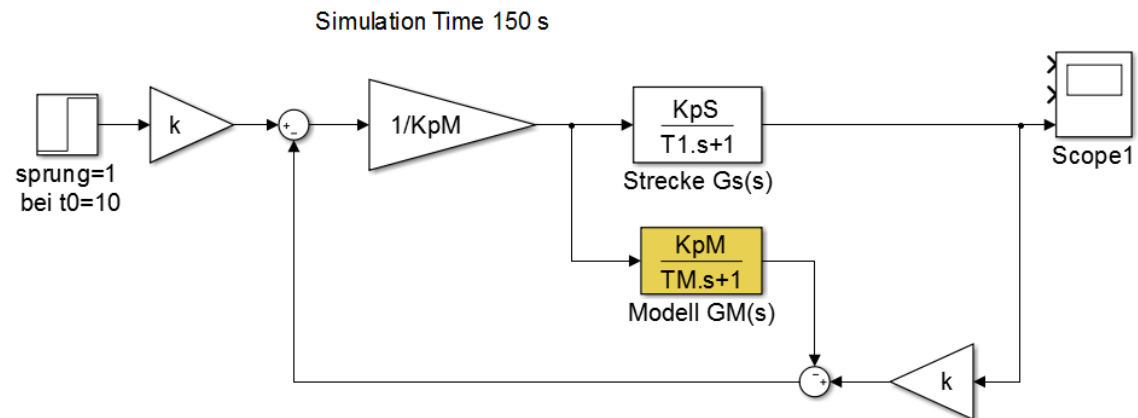
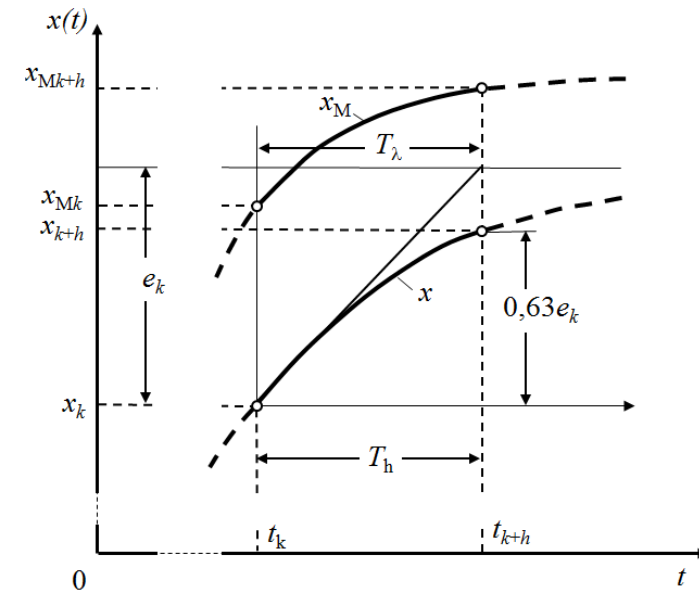
$$y_k = \frac{1}{K_{PM}} \left[x_{Mk} + \frac{1-\lambda}{1-\alpha} (w - x_k) \right]$$

die folgende Stellgröße:

$$y_k = \frac{1}{K_{PM}} [x_{Mk} + (w - x_k)]$$

$$y_k = \frac{1}{K_{PM}} [w - (x_k - x_{Mk})]$$

Die letzte Gleichung kann im Wirkungsplan dargestellt werden (Bild rechts).



4 Übergang von Rekursion zu Übertragungsfunktion

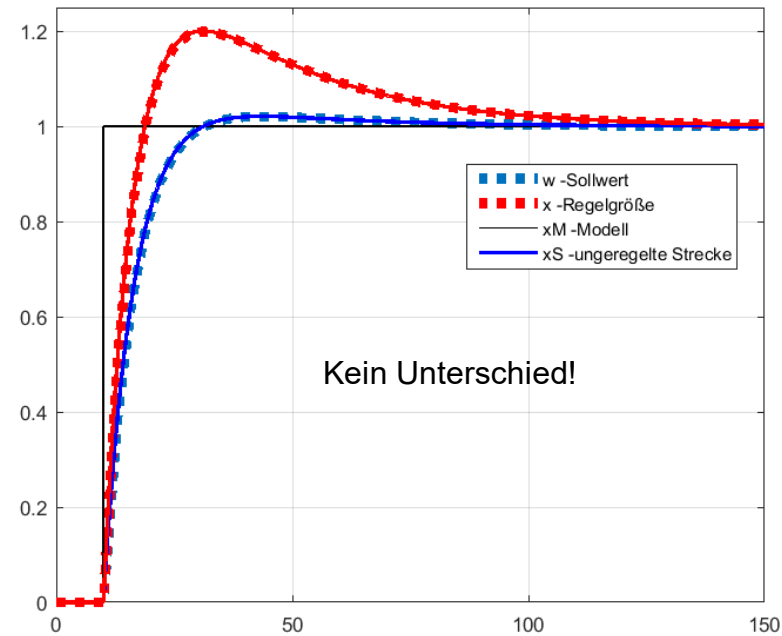
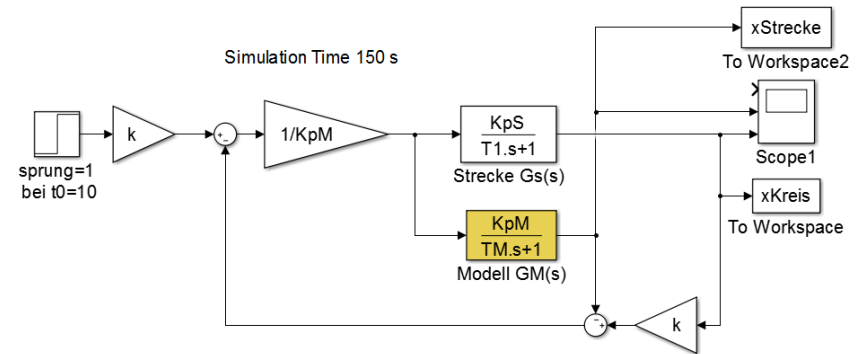
Nun realisieren wir beide Optionen:

– mit MATLAB nach
$$y(n) = \frac{k w - [k x(n) - x_M(n)]}{K_{PM}}$$

– mit Simulink nach
$$y = \frac{1}{K_{PM}} [w - (x - x_M)]$$

```

PFC_PT1.m x +
1 clear
2 clc
3
4 KpS=2;           %Regelstrecke (P-T1)
5 T1=40;
6 KpM=2;           %Modell (P-T1)
7 TM=30;
8 % Zeitparameter
9 %-----
10 T_aus=100;      %Ausregelzeit bzw.95% der Referenz Traje
11 t0=10;         %Zeiteingabe Sollwertsprung
12 T = 0.1;       %Abtastzeit
13 T_sim=150;     %Simulation-Ende
14 N=T_sim/T;     %Anzahl Simulationsschritte
15 time=0:T:(T_sim-T);%Simulationsdauer
16 n=t0/T;       %Anzahl Schritte vor dem Sollwertsprung
17 %Prädiktionshorizont
18 h=50;         %Anzahl Schritte in Horizont
19 Th=T*h;       %Horizont-Länge
20 lambda=exp(-Th/(T_aus/3));
21 lh=1-lambda^h;
22 %Faktoren für die Differenzgleichung
23 %-----
24 alpha_S=exp(-T/T1); bS=1-alpha_S;
25 alpha_M=exp(-T/TM); bM=1-alpha_M;
26 alpha_Mh=alpha_M^h; bMh=1-alpha_Mh;
27 k=lh/bMh;
28 %Anfangsbedingungen
29 y=zeros(1,N); %Stellgröße
30 x=y;         %Regelgröße bzw. geregelte Strecke
31 xM=y;       %Modell-Ausgang
32 xS=y;       %ungeregelte Strecke im offenen Kreis
33 %Regelung
34 sprung =1;   %Sprunghöhe
35 w=[zeros(1,n) sprung*ones(1,N-n)]; %Ansteuerung nach dem Sollwertsprung
36 for i=t0+1:length(time) %erst bei t0=10 anfangen, um die Matrix zu füllen
37     xS(i)=xS(i-1)*alpha_S+bS*KpS*w(i-1); % ungeregelte Strecke
38     x(i)=x(i-1)*alpha_S+bS*KpS*y(i-1); % geregelte Strecke
39     xM(i)=xM(i-1)*alpha_M+bM*KpM*y(i-1); % Modell-Ausgang
40     y(i)=(w(i)-x(i))*lh+xM(i)*bMh/(KpM*bMh); % Stellgröße
41 end
42 plot(time,w,'k',time,x,'b',time,xM,'r',time,xS,'g')
43 h = legend('w -Sollwert','x -Regelgröße','xM -Modell','xS -ungeregelte Stre
44 set(h,'Interpreter','none')
45 %plot(time,xS,time,x)
46 qrid
    
```

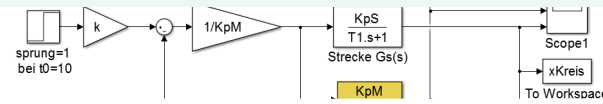


4 Übergang von Rekursion zu Übertragungsfunktion

Die MATLAB-Versuche mit $h=1$; $h=20$ und $h=50$ sind unten gezeigt.

– mit MATLAB nach
$$y(n) = \frac{k w - [k x(n) - x_M(n)]}{K_{PM}}$$

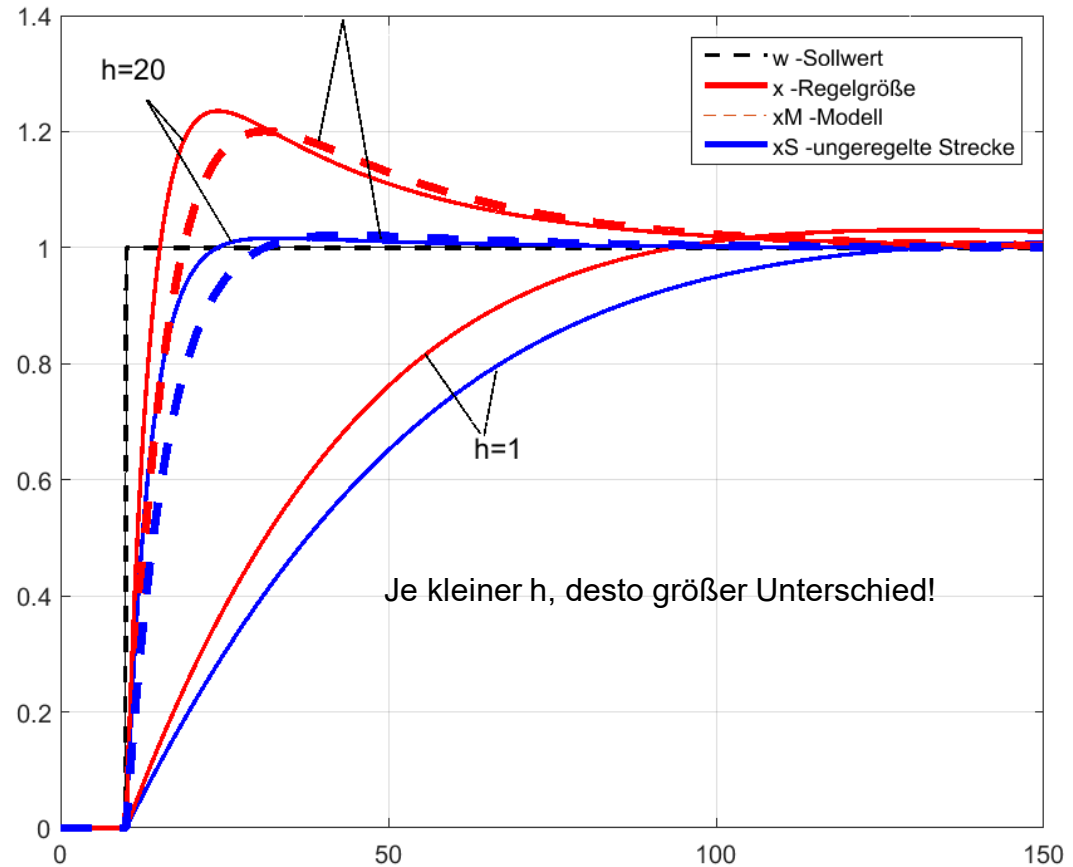
– mit Simulink nach
$$y = \frac{1}{K_{PM}} [w - (x - x_M)]$$



```

PFC_PT1.m x +
1 clear
2 clc
3
4 KpS=2;           %Regelstrecke (P-T1)
5 T1=40;
6 KpM=2;           %Modell (P-T1)
7 TM=30;
8 % Zeitparameter
9 %-----
10 T_aus=100;      %Ausregelzeit bzw.95% der Referenz Traje
11 t0=10;          %Zeiteingabe Sollwertsprung
12 T = 0.1;        %Abtastzeit
13 T_sim=150;      %Simulation-Ende
14 N=T_sim/T;      %Anzahl Simulationsschritte
15 time=0:T:(T_sim-T); %Simulationsdauer
16 n=t0/T;         %Anzahl Schritte vor dem Sollwertsprung
17 %Prädiktionshorizont
18 h=50;           %Anzahl Schritte in Horizont
19 Th=T*h;         %Horizont-Länge
20 lambda=exp(-Th/(T_aus/3));
21 lh=1-lambda^h;
22 %Faktoren für die Differenzgleichung
23 %-----
24 alpha_S=exp(-T/T1); bS=1-alpha_S;
25 alpha_M=exp(-T/TM); bM=1-alpha_M;
26 alpha_Mh=alpha_M^h; bMh=1-alpha_Mh;
27 k=lh/bMh;
28 %Anfangsbedingungen
29 y=zeros(1,N);   %Stellgröße
30 x=y;             %Regelgröße bzw. geregelte Strecke
31 xM=y;           %Modell-Ausgang
32 xS=y;           %ungeregelte Strecke im offenen Kreis
33 %Regelung
34 sprung =1;      %Sprunghöhe
35 w=[zeros(1,n) sprung*ones(1,N-n)]; %Ansteuerung nach dem Sollwertsprung
36 for i=t0+1:length(time) %erst bei t0=10 anfangen, um die Matrix zu füllen
37     xS(i)=xS(i-1)*alpha_S+bS*KpS*w(i-1); % ungeregelte Strecke
38     x(i)=x(i-1)*alpha_S+bS*KpS*y(i-1); % geregelte Strecke
39     xM(i)=xM(i-1)*alpha_M+bM*KpM*y(i-1); % Modell-Ausgang
40     y(i)=(w(i)-x(i))*lh+xM(i)*bMh/(KpM*bMh); % Stellgröße
41 end
42 plot(time,w,'k',time,x,'b',time,xM,'r',time,xS,'g')
43 h = legend('w -Sollwert','x -Regelgröße','xM -Modell','xS -ungeregelte Stre
44 set(h,'Interpreter','none')
45 %plot(time,xS,time,x)
46 grid
    
```

$h=50$, auch Simulink



4 Übergang von Rekursion zu Übertragungsfunktion

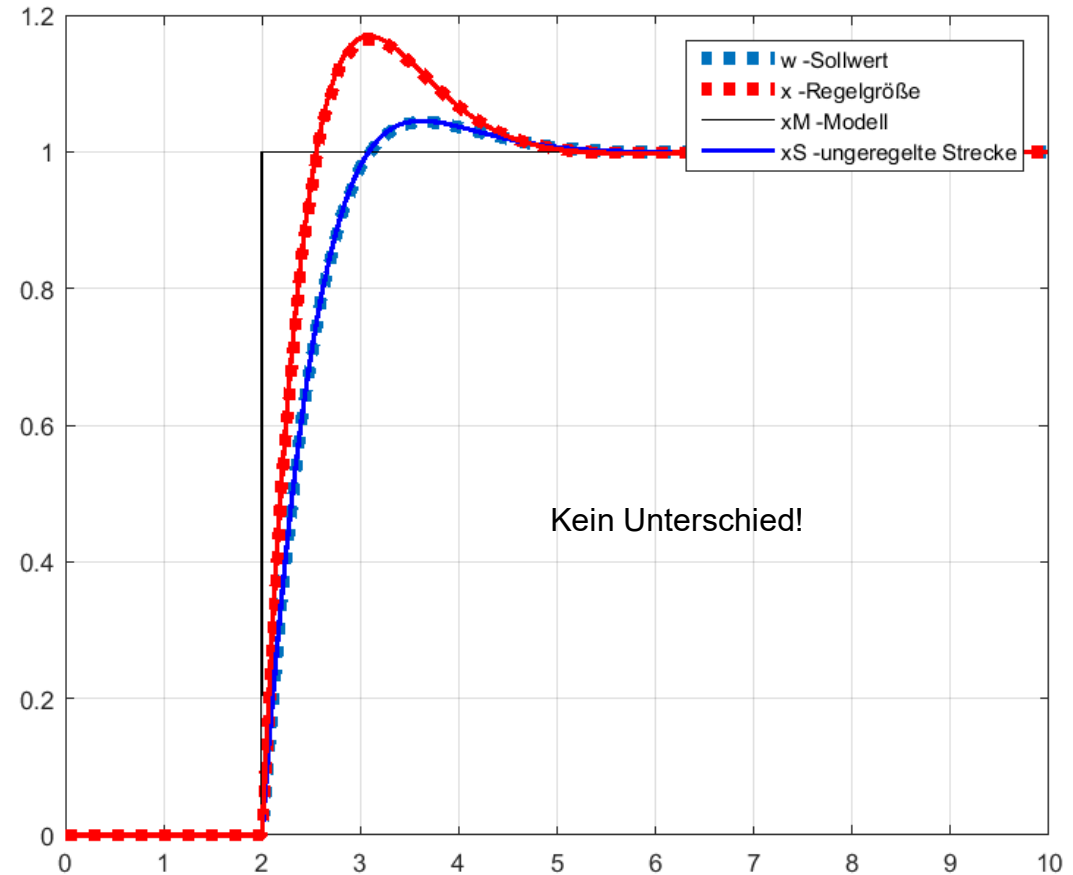
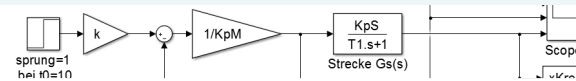
Und noch ein Versuch mit $h=50$ und $K_pS=K_pM=0.25$; $T_1=0.8$; $T_M=0.5$; $T=0.01$; $T_{aus}=2.5$; $T_{sim}=4$;

– mit MATLAB nach
$$y(n) = \frac{kw - [kx(n) - x_M(n)]}{K_{PM}}$$

– mit Simulink nach
$$y = \frac{1}{K_{PM}} [w - (x - x_M)]$$

```

PFC_PT1_testm* x +
1 clear
2 clc
3
4 KpS=0.25;           %Regelstrecke (P-T1)
5 T1=0.8;
6 KpM=0.25;           %Modell (P-T1)
7 TM=0.5;
8 % Zeitparameter
9 %-----
10 T_aus=2.5;         %Ausregelzeit bzw.95% der Referenz Trajectory:
11 t0=2;              %Zeiteingabe Sollwertsprung,ganze Zahl, t0>1
12 T = 0.01;          %Abtastzeit
13 T_sim=10;          %Simulation-Ende
14 N=T_sim/T;         %Anzahl Simulationsschritte
15 time=0:T:(T_sim-T);%Simulationsdauer
16 n=t0/T;            %Anzahl Schritte vor dem Sollwertsprung
17 %Prädiktionshorizont
18 h=50;              %Anzahl Schritte in Horizont
19 Th=T*h;            %Horizont-Länge
20 lambda=exp(-Th/(T_aus/3));
21 lh=1-lambda^h;
22 %Faktoren für die Differenzgleichung
23 %-----
24 alpha_S=exp(-T/T1); bS=1-alpha_S;
25 alpha_M=exp(-T/TM); bM=1-alpha_M;
26 alpha_Mh=alpha_M^h; bMh=1-alpha_Mh;
27 k=lh/bMh;
28 %Anfangsbedingungen -----
29 y=zeros(1,N);     %Stellgröße
30 x=y;               %Regelgröße bzw. geregelte Strecke
31 xM=y;              %Modell-Ausgang
32 xS=y;              %ungeregelte Strecke im offenen Kreis
33 %Regelung -----
34 sprung =1;         %Sprunghöhe
35 w=[zeros(1,n) sprung*ones(1,N-n)]; %Ansteuerung nach dem Sollwertsprung
36 for i=t0:1:length(time) %erst bei t0 anfangen, um die Matrix zu füllen
37     xS(i)=xS(i-1)*alpha_S+bS*KpS*w(i-1); % ungeregelte Strecke
38     x(i)=x(i-1)*alpha_S+bS*KpS*y(i-1); % geregelte Strecke
39     xM(i)=xM(i-1)*alpha_M+bM*KpM*y(i-1); % Modell-Ausgang
40     y(i)=(w(i)-x(i))*lh+xM(i)*bMh/(KpM*bMh); % Stellgröße
41 end
42 plot(time,w,'k',time,x,'b',time,xM,'r',time,xS,'g')
43 h = legend('w -Sollwert','x -Regelgröße','xM -Modell','xS -ungeregelte S
44 set(h,'Interpreter','none')
    
```



5 SPFC: Simplified PFC

Quelle: Zacher, S.,; Reuter, M.: Regelungstechnik für Ingenieure. 15. Auflage, Seiten 362-363, Springer Vieweg Verlag, 2017



Nimmt man abweichend vom in [103] beschriebenen PFC-Verfahren den Grenzfall

$$T_\lambda = T_h,$$

so wird

$$\lambda = \alpha$$

und die Gl. (12.9) vereinfacht sich zum folgenden Algorithmus, der nachfolgend SPFC-Algorithmus (*simplified PFC*) genannt wird:

$$y_k = \frac{1}{K_{PM}} [x_{Mk} + (w - x_k)] = \frac{1}{K_{PM}} [w - (x_k - x_{Mk})] \quad (12.10)$$

Zwar verliert der SPFC-Regler nach der Gl. (12.10) gegenüber dem PFC-Regler nach der Gl. (12.9) an Regelgüte, ist die Realisierung des SPFC-Regelalgorithmus einfacher, wie im **Bild 12.7** gezeigt ist. Die Übertragungsfunktion des Regelkreises ist

$$G_w(s) = \frac{x(s)}{w(s)} = G_v(s) \cdot \frac{G_0(s)}{1 + G_0(s)} = [1 + G_M(s)] \cdot \frac{G_R(s)G_S(s)}{1 + G_R(s)G_S(s)}. \quad (12.11)$$

Laut letzter Formel stellt das im Bild 12.7 gezeigte SPFC-Verfahren die Regelung im geschlossenen Regelkreis mit einem Vorfilter $G_v(s)$ dar (**Bild 12.8**).

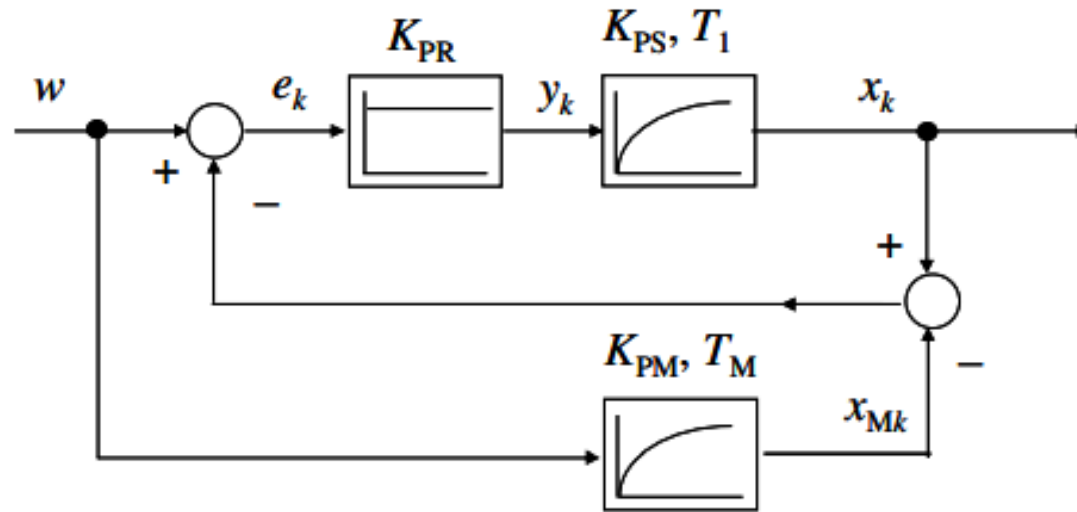


Bild 12.7 Wirkungsplan der vereinfachten PFC-Regelung bei $T_\lambda = T_h$

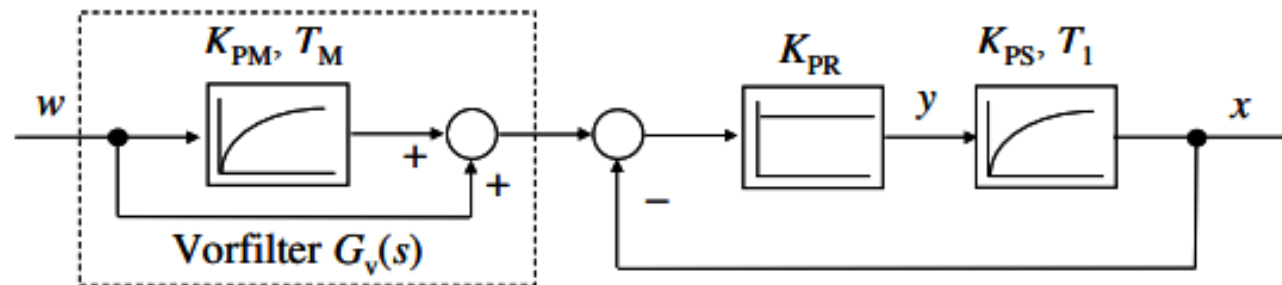


Bild 12.8 Vereinfachtes PFC-Verfahren als Regelung mit einem Vorfilter $G_v(s)$

• **Beispiel 12.3**

Eine P-T1-Strecke $G_S(s)$ mit $K_{PS}=0,8$ und $T_1=90$ s soll mit einem P-Regler $G_R(s)$ nach einem Referenzmodell $G_M(s)$ so geregelt werden, dass die Regelung nach dem P-T1-Verhalten mit der Zeitkonstante $T_w=2$ s ohne bleibender Regedifferenz erfolgt:

$$G_S(s) = \frac{K_{PS}}{1 + sT_1} \quad G_R(s) = K_{PR} \quad G_M(s) = \frac{K_{PM}(s)}{1 + sT_M} \quad G_w(s) = \frac{K_{Pw}}{1 + sT_w}$$

Die Gl. (12.11) beinhaltet drei Unbekannte, davon zwei können beliebig gewählt werden, z.B.

$K_{PR} = \frac{1}{K_{PS}} = 1,25$ und $T_M = T_w = 2$. Daraus ergibt sich das Referenzmodell $G_M(s)$:

$$\frac{1}{1 + sT_w} = \left(1 + \frac{K_{PM}(s)}{1 + sT_M} \right) \cdot \frac{K_{PR}K_{PS}}{1 + sT_1 + K_{PR}K_{PS}} \implies G_M(s) = \frac{1 + s(T_1 - T_M)}{1 + sT_M} = \frac{1 + 88s}{1 + 2s}$$

Der somit eingestellte SPFC-Regelkreis ist in **Bild 12.9** dargestellt. Zum Vergleich: dieselbe Ausregelzeit $T_{aus}=10$ s erreicht diese Strecke mit dem PI-Regler mit $K_{PR}=24$ und $T_1=90$ s.

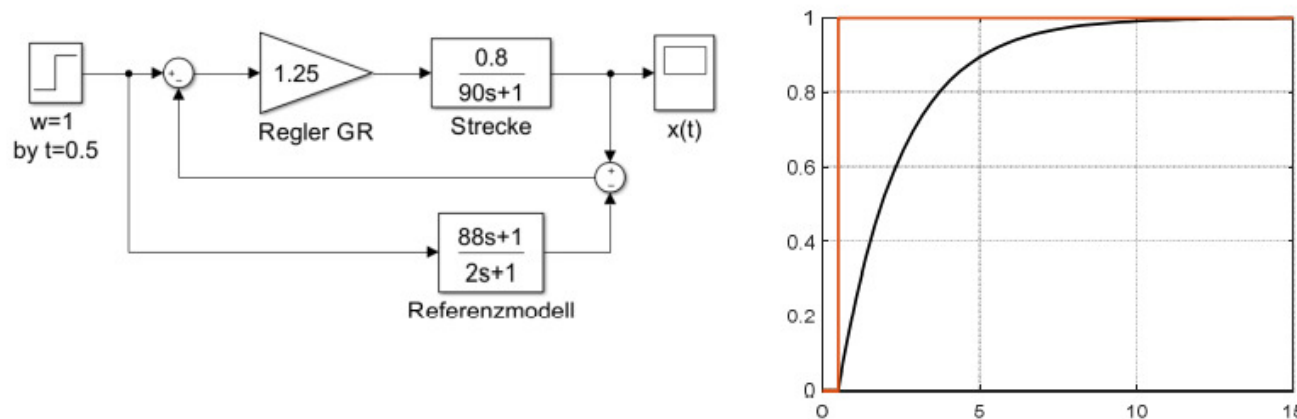


Bild 12.9 Regelkreis und Sprungantwort nach dem vereinfachten PFC-Verfahren

6 Surf Control: Multiset DSM

Quelle: Zacher, S.: Regelungstechnik mit Data Stream Management. Springer Vieweg Verlag, 2021

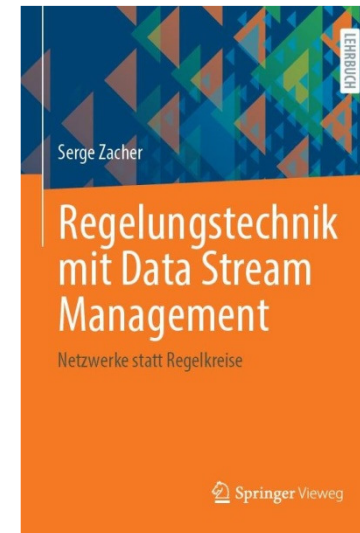
Der Übergang von klassischen Wirkungsplänen zu so genannten Datenflussplänen, der im Buch [19] vorgeschlagen wurde, hat zu einer Reihe von neuen Bausteinen eines Regelkreises geführt.

Während die Wirkungspläne traditionsgemäß die Übertragung von Signalen abbilden, zeigen die Datenflusspläne die Übertragung von Daten, Nachrichten, Informationen, die heute bekanntlich die Grundlagen eines Automatisierungssystems bilden. Somit sind die Datenflusspläne besser an die Strukturen von modernen Regelkreisen angepasst, als die Wirkungspläne.

Die Einführung von Datenflussplänen resultierte in [19] in der Entwicklung von Daten Stream Management. Unter einem Daten Stream Manager (DSM) ist in [19] ein Baustein, bestehend aus klassischen regelungstechnischen Grundgliedern, Steuerungen und logischen Elementen bezeichnet.

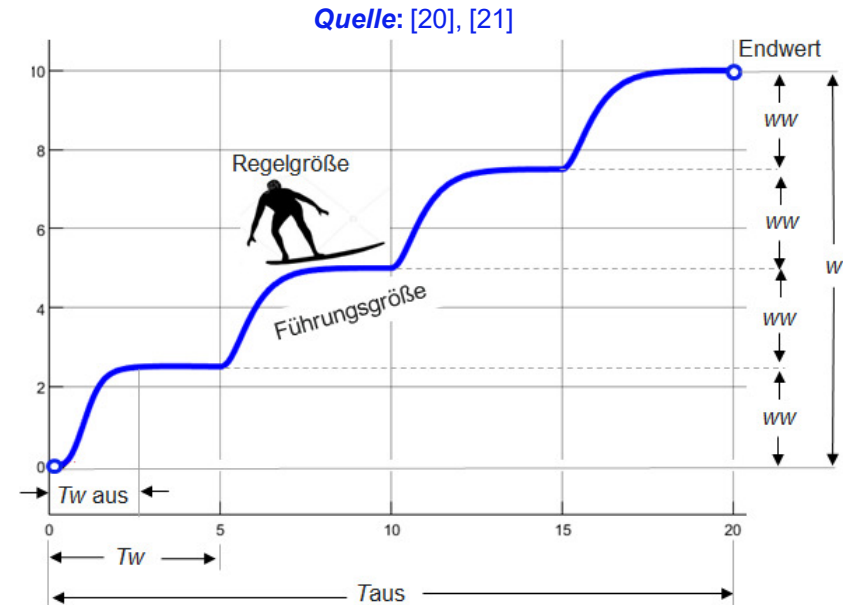
Unter mehreren, in dem Buch [19] entwickelten DSM, wird nachfolgend nur ein DSM „Multiset“ erwähnt, in dem das Führungsverhalten nicht nach einem einzigen Sollwertsprung w (*Set Point*) realisiert wird, sondern nach mehreren kleinen Sollwertsprüngen w_1 , w_2 , w_3 usw. Die Applikation des DSM „Multiset“ in einem Regelkreis, kombiniert mit einem Referenzmodell, hat es ermöglicht, eine einfache robuste Regelung, die „Surf Control“ genannt wurde [20, 21], zu entwickeln.

Im Vergleich zu dem PFC-Konzept, werden beim „Surf Control“ zu jedem Zeithorizont neue Sollwerte eingegeben. Dadurch ist die Regelung nach dem „Surf Control“ besser als nach dem Referenzmodell mit einem einzigen Sollwertsprung, wie es beim PFC üblich ist.

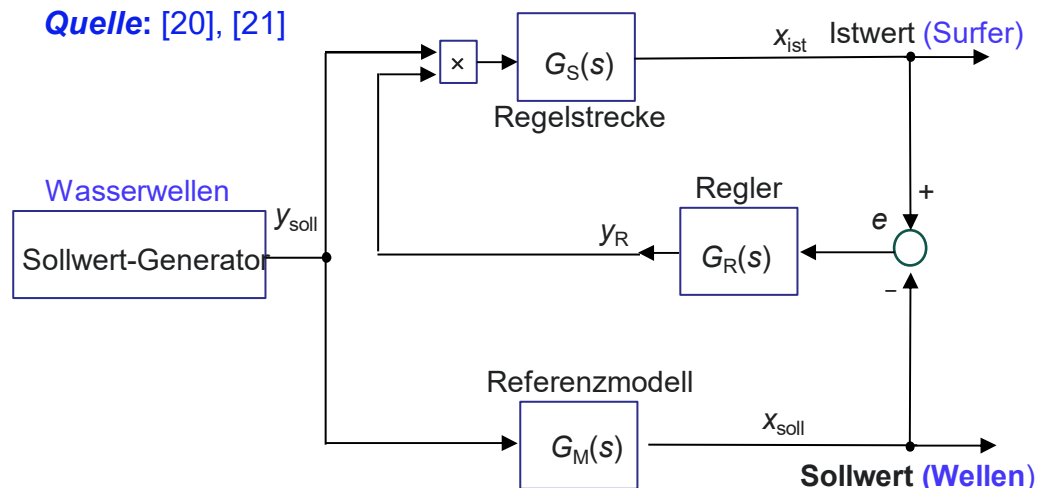


6 Surf Control: Multiset DSM

Die gesamte Ausregelzeit wird bei PFC in mehrere Zeithorizonte zerlegt (siehe oben Seite 12), die Sprungantwort der realen Regelstrecke wird mit der Sprungantwort des Referenzmodells nach einem einzigen Sollwertsprung gefolgt, verglichen und angepasst. Nach dem „Surf Control“ auch folgt die Sprungantwort der realen Strecke der Sprungantwort des Referenzmodells, jedoch nicht (oder nicht nur) die gesamte Ausregelzeit, sondern der Sollwertsprung in mehrere Abschnitte zerlegt, nämlich: ww , wie in Abbildung rechts nach [20, 21] gezeigt ist. Dadurch entsteht die Möglichkeit, die Regelparameter zu korrigieren bzw. die Reglerparameter an das Referenzmodell nach jedem Sollwertsprung anzupassen.



Quelle: [20], [21]



Aber auch der Datenflussplan des „Surfer Controls“ (siehe Abbildung links) unterscheidet sich vom Wirkungsplan des PFC (siehe Seite 18) und vom Wirkungsplan des SPFC (siehe Seite 23). Ausschlaggebend beim „Surf Control“ ist die einzigartige Struktur des Regelkreises, bei der die Strecke nicht nur allein die Stellgröße y_R des Reglers erhielt, sondern das Produkt $y_R y_{soll}$, wobei y_{soll} der jeweilige Sollwertsprung des Referenzmodells ist. Die Grundlagen für solche Datenflusspläne findet man im Buch [19].

7 Literaturquellen

- [1] J. Richalet, A. Rault, J.L. Testud, J. Papon: *Model predictive heuristic control: Applications to industrial processes*. Automatica, 14 (5) (1978), pp. 413–428
- [2] J. Richalet, G. Lavielle, J. Mallet: *La commande prédictive – Mise en oeuvre et applications industrielles*. Editions Eyrolles, 2004
- [3] Jacques Richalet, Donal O'Donovan: *Predictive Functional Control, Principles and Industrial Applications (Advances in Industrial Control)*. Springer-Verlag, 2009, ISBN 978-1-84882-492-8
- [4] Robert Haber, Ruth Bars, Ulrich Schmitz: *Predictive Control in Process Engineering. From the Basics to the Applications*. Wiley-VCH-Verlag, Weinheim, 2011
- [5] R. Haber, U. Schmitz, K.Zabet : *Implementation of PFC in petrochemical plant*.
In-19th IFAC Congress Proceedings Volumes. Vol. 47, Issue 3, 2014, pp. 5333-5338
- [6] Robert Haber, Mirko Kreuzt, Khaled Zabet : *Predictive Functional Control: Algorithmus und Testbetrieb*.
atp Edition, http://ojs.di-verlag.de/index.php/atp_edition/article/view/196 (Stand 05.08.2016)
- [7] Robert Haber, Karl Mocha: *Einfach realisierbare prädiktive Regelung mit Predictive Functional Control (PFC)*.
Ein Kursangebot der Fachhochschule Nordwestschweiz, Brugg-Windisch.
http://www.sga-asspa.ch/cms/images/PDF/flyer%20pfc-workshop_2.pdf (Stand 05.08.2016)
- [8] Satoru Hashizume: *Development of Predictive Control Technique and Practical Applications to Chemical Processes*.
Translated from R&D Report „SUMIMOTO KASGAKU“, Vol. 2015, Sumimoto Chemical Co.,Ltd , 2011.
www.sumitomo-chem.co.jp/english/rd/report/theses/docs/2015E_4.pdf (Stand 05.08.2016)
- [9] Li Hong-Liang, Su Hong-Ye, Liu Jun, Chu Jian: *Predictive functional control (PFC) and its application in chlorinated polyethylene process*. Automatical Computer and Technology. Journal of Zhejiang University SCIENCE, May 2003, Volume 4, Issue 3, pp 300-304
<http://link.springer.com/article/10.1631%2Fjzus.2003.0300> (Stand 05.08.2016)
- [10] Andrés Vivas, Philippe Poignet: *Predictive functional control of a parallel robot*. Control Engineering Practice
Volume 13, Issue 7, July 2005, Pages 863–874
<https://hal.archives-ouvertes.fr/lirmm-00105300/document> (Stand 05.08.2016)

7 Literaturquellen

- [11] Igor Škrjanc, Drago Matko: *Fuzzy Predictive Functional Control in the State Space Doman*.
Journal of Intelligent and Robotic Systems, Kluwer Academic Publishers.
31: 283–297, 2001. http://msc.fe.uni-lj.si/Papers%5CJIRS_Skrjanc2001.pdf (Stand 05.08.2016)
- [12] Anthony Rossiter: *Model Predictive Control for Beginners*. The Univerisity of Sheffield, UK.
<http://controleducation.group.shef.ac.uk/htmlformpc/pfc.html> (Stand 05.08.2016)
- [13] Thomas Hamm: *Umsetzung eines PFC Algorithmus für Strecken 1.Ordnung mit Totzeit auf dem PLS ABB Freelnace 2000*. Projektarbeit der FH Wiesbaden, 2005
(Betreuer: Prof. Dr. Serge Zacher und Dr. Martin Altebockwinkel)
- [14] Thomas Hamm: *Umsetzung eines Modell-Prädiktiven Regelkonzeptes in einer Prozessnahe-Komponente eines Prozessleitsystems*. Diplomarbeit der FH Wiesbaden, 2006
(Betreuer: Prof. Dr. S. Zacher und Dr. Martin Altebockwinkel)
- [15] Sebastian Koller, Alexander Heim, Jürgen Staub: *Entwurf, Modellierung und Engineering eines prädiktiven Reglers nach modellbasierten Verfahren PFC und IMC*. Projektarbeit, h-da/ ZFH Koblenz, 2009 (Betreuer: Prof. Dr. S. Zacher)
- [16] S. Zacher, M. Reuter: *Regelungstechnik für Ingenieure*, Springer-Vieweg Verlag, 15. Auflage, 2017, Seiten 362,363
- [17] S. Zacher: *Übungsbuch Regelungstechnik*, Springer-Vieweg Verlag, 5. Auflage, 2014, Seiten 104, 238
- [18] S. Zacher: *Spezielle Methoden der Regelungstechnik*: Studienbrief BA23, h-da/ ZFH Koblenz, 2007
- [19] S. Zacher: *Regelungstechnik mit Data Stream Management*, Springer-Vieweg Verlag, 2021
- [20] S. Zacher: *Surf-Feedback-Control*: Automation-Letter Nr.42, 2021
https://www.zacher-international.com/Automation_Letters/42_Surf_Control.pdf
- [21] S. Zacher: *Surf Control of Industrial Plants*, 2021, <https://youtu.be/Fe5Had3sjo>