

Multikriterielle, robuste Fuzzy-Optimierung der Parameter bei der Regelung eines verfahrenstechnischen Prozesses mit großer Messtotzeit

Thomas Bernard, Markoto Sajidman

Fraunhofer-Institut für Informations- und Datenverarbeitung IITB
Fraunhoferstr. 1, 76131 Karlsruhe
Tel. +49 (0) 721 / 60 91-360
Fax +49 (0) 721 / 60 91-413
Email: bnd@iitb.fhg.de, saj@iitb.fhg.de

Zusammenfassung

Zur Lösung des multikriteriellen Optimierungsproblems wurde ein Verfahren zur unscharfen Gewichtung und Verknüpfung der Gütekriterien entwickelt, das auf dem bekannten *Fuzzy Decision Making* [4] basiert. Am konkreten Fallbeispiel wird die Generierung von Fuzzy-Gütekriterien zu Störverhalten, Führungsverhalten, Stabilität und Stellaufwand vorgestellt sowie deren Tauglichkeit zur Lösung des Optimierungsproblems untersucht. Zur Sicherstellung der Robustheit der Lösung wird ein einfacher Ansatz vorgestellt. Abschließend werden Ergebnisse der erfolgreichen Regelparameteroptimierung diskutiert. Der vorliegende Beitrag vermittelt Erfahrungen, die bei der Regleroptimierung für einen komplexen, stark gestörten Industrieprozess mit großen Messtotzeiten und unterschiedlichen, zum Teil gegensätzlichen Güteanforderungen, gewonnen wurden.

1 Motivation

Bei der Optimierung von Regelungssystemen sind in der Praxis oft mehrere unterschiedliche, sich zum Teil widersprechende Gütekriterien mit unterschiedlichen Gewichtungsfaktoren zu berücksichtigen. Bei verfahrenstechnischen Prozessen sind dies zum Beispiel:

- gutes Störverhalten der Regelung, d.h. auftretende Störungen sollen so gut wie möglich gedämpft oder kompensiert werden,
- gutes Führungsverhalten zur Gewährleistung der stationären Genauigkeit durch Kompensation von Drifts und/oder Parameterschwankungen,
- Stabilität des geschlossenen Regelkreises,
- geringer Stellaufwand zur Minimierung des Energieeinsatzes oder zur Vermeidung zusätzlicher Systemanregungen und
- Robustheit, d.h. auch bei nicht genau bekannten Streckenparametern ist das Regelverhalten noch zufriedenstellend.

Im Laufe der Untersuchungen hat sich gezeigt, dass die ersten vier Teilkriterien (Störverhalten, Führungsverhalten, Stabilität, Stellverhalten) explizit im gemeinsamen

Gütemaß zu berücksichtigen sind. Robustheit ist als weitere wichtige Eigenschaft von den optimierten Reglerparametern zu fordern. Somit liegt ein Problem der multikriteriellen Optimierung vor. Von besonderer Bedeutung sind dabei die Aggregationsmechanismen zur Verknüpfung der Teilkriterien sowie eine transparente Gewichtung der Teilkriterien. Ein Ziel des Verfahrens ist es sicherzustellen, dass die einzelnen Teilziele auch wirklich erfüllt werden.

Die meisten bisher veröffentlichten multikriteriellen Regelungsentwurfsverfahren beruhen auf der Optimierung eines vektoriellen Gütekriteriums (vgl. z. B. [1], [2], [3]). Hierbei werden einzelne Teilkriterien zu einem Gütevektor zusammengefasst. Zur Lösung des Optimierungsproblems werden unterschiedliche Möglichkeiten vorgeschlagen, wobei eine Methode darin besteht, eine Lösungsmenge zu bestimmen, bei der jedes Teilkriterium einem bestimmten Anspruchsniveau genügt [2]. Hierbei ergeben sich jedoch oft komplexe Optimierungsprobleme, zu deren Lösung z. B. Evolutionsstrategien eingesetzt werden können [3].

Eine weitere Lösungsmöglichkeit besteht darin, die Teilkriterien zu einem Ersatzkriterium zusammenzufassen und somit das multikriterielle in ein monokriterielles Optimierungsproblem zu überführen [3]. Bei der Erstellung eines Ersatzkriteriums besteht jedoch die Gefahr, dass sich konkurrierende Teilkriterien kompensieren. Da in einem solchen Fall die erhaltene "optimale" Lösung kaum noch einen Rückschluss auf die Erfüllung der einzelnen Teilkriterien zulässt, ist die gegenseitige Kompensation der Gütekriterien oft unerwünscht. In vielen Fällen ist es sinnvoll, eine Fuzzy-UND-Verknüpfung der Gütekriterien zu realisieren, wodurch eine Lösung erhalten wird, die alle Teilkriterien in etwa gleich erfüllt und pareto-optimal ist [2].

In diesem Beitrag wird daher ein Ansatz des Fuzzy Decision Making vorgestellt, bei dem das gemeinsame Gütekriterium durch eine Fuzzy-UND-Verknüpfung der einzelnen Teilkriterien erfolgt. Der verwendete Algorithmus erlaubt eine transparente Gewichtung der einzelnen Teilkriterien entsprechend ihrer Bedeutung. Angewendet wurde das fuzzy-basierte Entwurfskonzept auf die Regleroptimierung eines komplexen, stark gestörten Industrieprozesses mit großen Messtotzeiten.

2 Multikriterielle Optimierung durch Fuzzy Decision Making

2.1 Grundidee

Das in diesem Beitrag vorgestellte Konzept zur Lösung eines multikriteriellen Optimierungsproblems basiert darauf, dass die verschiedenen Teilkriterien durch Fuzzy-Zugehörigkeitsfunktionen dargestellt und unscharf verknüpft werden. In einem ersten Schritt werden konventionelle Gütekriterien für die Optimierungsziele "gutes Störverhalten", "gutes Führungsverhalten", "Stabilität" und "geringer Stellaufwand" definiert. Im zweiten Schritt werden diese dann durch geeignete Transformationen in Fuzzy-Gütekriterien umgewandelt. Die Parameter k_p und k_I eines modellbasierten, linearen Reglers werden schließlich nach einem Algorithmus des Fuzzy Decision Making optimiert.

Im folgenden Abschnitt 2.2 wird zunächst der Algorithmus des Fuzzy Decision Making vorgestellt. Abschnitt 2.3 beschreibt ein einfaches Verfahren zur Gewährleistung einer robusten Lösung.

2.2 Fuzzy Decision Making mit Gewichtung der Gütekriterien

Ansätze des Fuzzy Decision Making sind immer dann sinnvoll, wenn Gütekriterien und Restriktionen als Fuzzy-Zugehörigkeitsfunktionen μ_i darstellbar sind. Sie eignen sich sehr gut bei multikriteriellen Problemstellungen und bieten transparente Mechanismen zur Gewichtung der einzelnen Teilkriterien [4], [5], [6]. Angestrebt wird jeweils ein möglichst hoher Erfüllungsgrad der einzelnen Teilkriterien μ_i .

Zur Herleitung des Algorithmus wird zunächst angenommen, dass nur *ein* Parameter p optimiert werden soll. Es seien N Gütekriterien $\mu_1 \dots \mu_N$ gegeben, die jeweils von einer Hilfsgröße y_i abhängen:

$$\begin{aligned} \mu_1 &= f_1(y_1) \\ &\dots \\ \mu_N &= f_N(y_N) \end{aligned} \quad (1)$$

Die Größen y_i können beispielsweise gewöhnliche Gütekriterien (z.B. Güteintegrale) oder andere, den Prozess charakterisierende Größen sein. Es wird vorausgesetzt, dass die y_i vom zu optimierenden Parameter p abhängen. Somit gilt:

$$\begin{aligned} \mu_1 &= f_1(y_1(p)) \equiv \mu_1(p) \\ &\dots \\ \mu_N &= f_N(y_N(p)) \equiv \mu_N(p) \end{aligned} \quad (2)$$

Es wird die *Fuzzy-Entscheidung* μ_D definiert über eine Fuzzy-UND-Verknüpfung der N Gütekriterien μ_1, \dots, μ_N [6]:

$$\mu_D(p) = \mu_1(p) \wedge \dots \wedge \mu_N(p) \quad (3)$$

Zur Realisierung des Fuzzy-UND-Operators \wedge gibt es viele unterschiedliche Möglichkeiten [6], [7]. In Verbindung mit Gewichtungsfaktoren λ_i zur Bewertung der Gütekriterien hat sich der Minimum-Operator als besonders transparent erwiesen [5]:

$$\mu_D(p) = \min(\lambda_1 \mu_1(p), \dots, \lambda_N \mu_N(p)) \quad (4)$$

Dabei wird das Gütekriterium μ_i um so stärker gewichtet, je *kleiner* λ_i ist. Die relative Gewichtung zweier Gütekriterien μ_j und μ_k wird durch das Verhältnis λ_j/λ_k repräsentiert. Für $\lambda_j/\lambda_k \rightarrow 0$ wird μ_j sehr viel stärker als μ_k gewichtet.

Der optimale Parameter p^* berechnet sich über die Maximierung von μ_D :

$$\mu_D(p^*) = \max_p \mu_D(p) \quad (5)$$

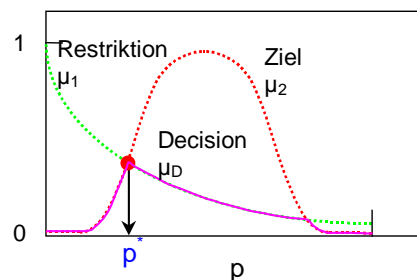


Abb. 1: Zum Grundprinzip des Fuzzy Decision Making

Zur Sicherstellung einer eindeutigen Entscheidung für den Fall, dass ein oder mehrere Gütekriterien ein nicht eindeutiges Maximum aufweisen, wird Gleichung (4) um einen Korrekturterm $\varepsilon(\mu_1 \dots \mu_N)$ erweitert [5]:

$$\mu_D(p) = \min(\lambda_1 \mu_1(p), \dots, \lambda_N \mu_N(p)) + \underbrace{\varepsilon \mu_1(p) \cdot \dots \cdot \mu_N(p)}_{\text{Korrekturterm}}, \quad 0 < \lambda_i < 1, \quad 0 < \varepsilon \ll 1 \quad (6)$$

Die Wirkung des Korrekturterms wird beispielhaft in Abb. 2 verdeutlicht. Das mit dem Gewichtungsfaktor $\lambda = 0.75$ stärker gewichtete Gütekriterium μ_1 führt zunächst zu einem gleichwertigen Bereich in μ_D , der jedoch durch den Korrekturterm zu einer eindeutigen Entscheidung überführt wird.

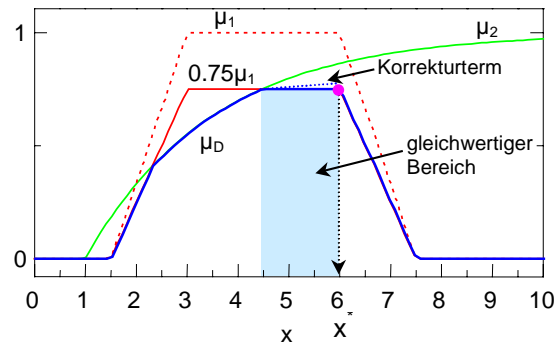


Abb. 2: Zum Mechanismus des Korrekturterms zur Sicherstellung einer eindeutigen Entscheidung

Der Algorithmus lässt sich ohne weiteres auf die hier gegebene Problemstellung der gleichzeitigen Optimierung von zwei Parametern k_p, k_i eines linearen PI-Reglers anwenden.

2.3 Erweiterung hinsichtlich Robustheitsanforderungen

Da bei der Berechnung der Gütekriterien gemäß den Gleichungen (2) i. a. Modellgleichungen verwendet werden, muss die Robustheit der Lösung sichergestellt sein. Dies bedeutet, dass auch bei nicht genau bekannten Streckenparametern das Regelverhalten noch zufriedenstellend ist.

Im Algorithmus des Fuzzy Decision Making kann eine Robustheit der Lösung dadurch gewährleistet werden, dass in die Modellgleichungen (2) Fehlerparameter Δm integriert werden, die die Abweichung des Modells vom realen System beschreiben (z.B. Unsicherheit in der Streckenverstärkung oder Zeitkonstante). Es werden nun charakteristische Werte des Fehlerparameters bei der Berechnung der Gütekriterien eingesetzt und die erhaltenen Zugehörigkeitsfunktionen UND-verknüpft:

$$\begin{aligned} \tilde{\mu}_1(p) &= \bigwedge_{\Delta m} f_1(y_1(\Delta m, p)) \\ &\dots \\ \tilde{\mu}_N(p) &= \bigwedge_{\Delta m} f_N(y_N(\Delta m, p)) \end{aligned} \quad (7)$$

Die dadurch erhaltenen Gütekriterien $\tilde{\mu}_1, \dots, \tilde{\mu}_N$ werden zur Berechnung der Fuzzy-Entscheidung μ_D in Gleichung (6) eingesetzt. Die UND-Verknüpfung in (7) kann ggf. mit Gewichtungsfaktoren erfolgen, so dass die Modellabweichungen entsprechend ihrer Bedeutung berücksichtigt werden können.

3 Anwendung auf einen industriellen verfahrenstechnischen Prozess mit großer Messtotzeit und starkem Rauscheinfluss

3.1 Prozessbeschreibung

Der untersuchte Industrieprozess wurde bereits in [9] vorgestellt. Hierbei handelt es sich um ein Verfahren zur Produktion hochwertiger Glasrohre, wobei ein zylinderförmiger Rohling mit einer konstanten Vorschubgeschwindigkeit in einen Ofen geführt, über seine Erweichungstemperatur erhitzt und mit einer regelbaren Geschwindigkeit v als Rohrstrang aus dem Ofen abgezogen wird. In den Rohling wird ein Inertgas mit einem regelbaren Volumendurchsatz eingeleitet, was zum Aufbau eines Differenzdruckes p zwischen dem Inneren der Verformungszone und der Umgebungsluft dient. Die Aufgabe besteht darin, den Durchmesser D und die Wandstärke W des produzierten Rohrstranges über v und p zu regeln.

Dieser Prozess ist durch eine Reihe von Schwierigkeiten gekennzeichnet, wie z.B. nichtlinear gekoppelte Regelgrößen, nichtlineare, zeitvariante Systemdynamik, große Messtotzeiten, stochastische Störungen im stationären Betrieb sowie großen Driftstörungen in den transienten Prozessphasen.

3.2 Prozessmodell

Näherungsweise kann der Prozess durch ein nichtlineares statisches Modell mit linearen dynamischen Gliedern (Wienermodell) beschrieben werden. Im folgenden wird hieraus eine linearisierte Teilstrecke betrachtet, die den stationären Betrieb in einem Arbeitspunkt befriedigend beschreibt. Die Übertragungsfunktionen der Strecke und des Modells sind in Tabelle 1 dargestellt. Die Abweichungen von Übertragungsfaktor k_s und Zeitkonstante T_s der realen Strecke gegenüber dem angenommenen Streckenmodell werden über die Fehlerfaktoren Δk_{rel} und ΔT_{rel} berücksichtigt, welche mit k_s bzw. T_s multipliziert werden. Für $\Delta k_{rel} = \Delta T_{rel} = 1$ ist das Modell mit der Strecke identisch. Da besonders die Zeitkonstante T_s z. T. erheblich variiert, werden die Werte $\Delta k_{rel} = \{0.7, 1, 1.3\}$ und $\Delta T_{rel} = \{0.5, 1, 1.5\}$ in den Untersuchungen verwendet. Es wird also bezüglich der Streckenverstärkung von einer Modellunsicherheit von $\pm 30\%$ und bezüglich der Zeitkonstante von $\pm 50\%$ ausgegangen.

	Übertragungsfunktion	Parameter
VZ2-Strecke	$S(s) = \frac{\Delta k_{rel} k_s}{(1 + \Delta T_{rel} T_s s)^2}$	$k_s = +1, T_s = 32 \text{ sec}$ $\Delta k_{rel} = \{0.7, 1, 1.3\},$ $\Delta T_{rel} = \{0.5, 1, 1.5\}$
VZ2-Modell	$M(s) = \frac{k_s}{(1 + T_s s)^2}$	
Totzeit	$T(s) = \exp(-T_{tot} s)$	$T_{tot} = L_{tot} / v_0$

Tabelle 1: Streckenmodelle mit Parametern

Übersicht über die verwendeten Reglerstrukturen

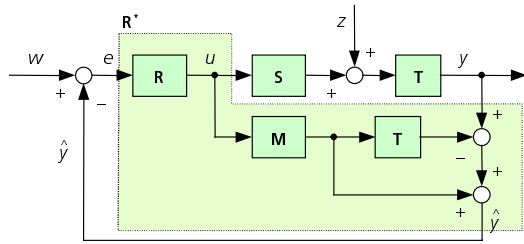


Abb. 3: Smith-Prädiktor mit PI-Grundregler

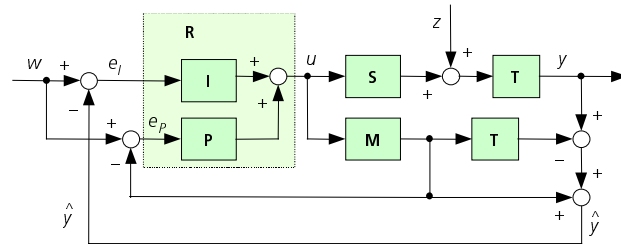


Abb. 4: Smith-Prädiktor-Regelkreis mit selektiven P- und I- Zweigen

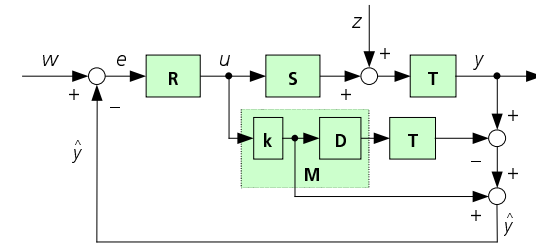


Abb. 5: Smith-Prädiktor-Regelkreis mit gesplittetem Modell

	Smith-Prädiktor mit PI-Grundregler	Smith-Prädiktor mit selektiven P&I-Zweigen	Smith-Prädiktor mit gesplittetem Modell
Grundregler	$R(s) = k_p \left(1 + \frac{k_I}{s}\right)$	$P(s) = k_p, I(s) = \frac{k_I}{s}, R(s) = P(s) + I(s)$	$R(s) = \frac{k_I}{s}$
Ersatzregler R^*	$R^* = \frac{u}{e} = \frac{R}{1 + RM(1-T)}$	$R_{stör}^* = \frac{u}{e} = \frac{I}{1 + PM + IM(1-T)}$ $R_{führ}^* = \frac{u}{w} = \frac{P + I}{1 + PM + IM(1-T)}$	$R^* = \frac{u}{e} = \frac{R}{1 + R(k - MT)}$
Führungs-ÜF F_w	$F_w = \frac{y}{w} = \frac{RST}{1 + RM + R(S - M)T}$	$F_w = \frac{y}{w} = \frac{RST}{1 + RM + I(S - M)T}$	$F_w = \frac{y}{w} = \frac{RST}{1 + Rk + R(S - M)T}$
Stör-ÜF F_z	$F_z = \frac{y}{z} = \frac{1 + RM(1-T)}{1 + RM + R(S - M)T} \cdot T$	$F_z = \frac{y}{z} = \frac{1 + RM - IMT}{1 + RM + I(S - M)T} \cdot T$	$F_z = \frac{y}{z} = \frac{1 + RM(1-T)}{1 + Rk + R(S - M)T} \cdot T$

Tabelle 2: Untersuchte Reglergrundstrukturen (ÜF = Übertragungsfunktion)

3.3 Regelungskonzept

Das Regelungskonzept für die betrachtete Teilstrecke basiert auf einer Variante der Smith-Prädiktor-Regelkreisstruktur [10]. Das Optimierungsverfahren wird auf die drei in Tabelle 2 dargestellten Strukturvarianten angewandt:

1. Gewöhnlicher Smith-Prädiktor mit linearem Streckenmodell und PI-Regler (Abb. 3)
2. Regelkreis mit selektiven P- und I-Zweigen: Hierbei wird die Tiefpasscharakteristik des I-Anteils ausgenutzt, um die gemessene Regelgröße zu filtern, so dass der Stellaufwand implizit reduziert wird. Der P-Anteil des Reglers wird lediglich zur Gegenkopplung des Modellsignals verwendet (Abb. 4).
3. Smith-Prädiktor mit gesplittetem Modell: In diesem Fall wird der statische Modellanteil rückgekoppelt und der dynamische Modellanteil lediglich zum Abgleich der gemessenen Regelgröße verwendet. Bei diesem Ansatz reduziert sich der Regler auf einen I-Regler (Abb. 5).

3.4 Entwicklung der Fuzzy-Gütekriterien

Zur Optimierung der Reglerparameter k_p , k_I werden Fuzzy-Gütekriterien bezüglich Störverhalten, Führungsverhalten, Stabilität und Stellverhalten berücksichtigt. Dabei werden zunächst gewöhnliche Güteintegrale bzw. Gütefunktionen $J_{stör}$, $J_{führ}$, J_{stab} , J_{stell} definiert und durch eine Transformation in das Intervall $[0, 1]$ in entsprechende Zugehörigkeitsfunktion $\mu_{stör}$, $\mu_{führ}$, μ_{stab} , μ_{stell} überführt. Diese Darstellung hat den Vorteil von großer Transparenz, da die Zugehörigkeitswerte leicht interpretiert werden können. Der Wert $\mu = 1$ entspricht einer sehr guten Beurteilung, der Wert $\mu = 0$ entspricht einem nicht akzeptablem Niveau. Entsprechend sind die Zugehörigkeitsfunktionen zu entwerfen.

3.4.1 Gütekriterium 1: Störverhalten

Um gutes Störverhalten der Regelung zu erreichen muss die Störübertragungsfunktion F_z im relevanten Frequenzbereich möglichst starke Dämpfung aufweisen. Zur Entwicklung des Gütekriteriums wird die Amplitude von F_z im logarithmischen Maßstab betrachtet (dB-Skala). In Abb. 6 ist eine typische Störübertragungsfunktion des Smith-Prädiktors gezeigt.

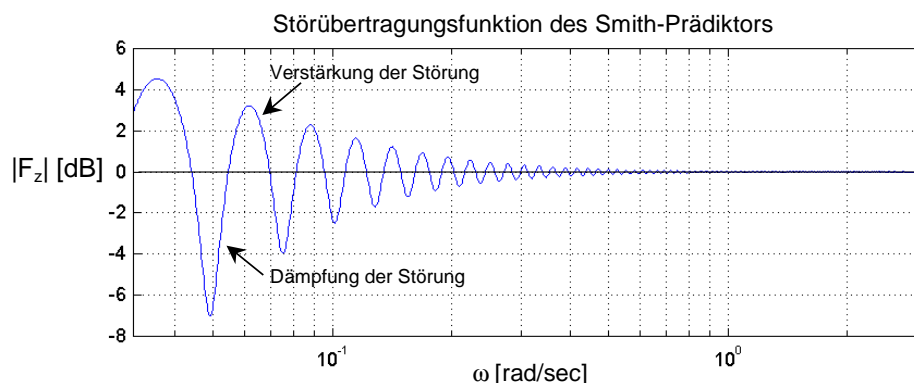


Abb. 6: Typische Störübertragungsfunktion des Smith-Prädiktorreglers

Typisch sind ausgeprägte "Resonanzhörner" im negativen Bereich, d.h. diese Frequenzbereiche werden gut weggedämpft. Zwischen diesen Hörnern gibt es jedoch auch Bereiche mit positiver Amplitude, d.h. Verstärkung der Störung. Wünschenswert ist ein möglichst gleichmäßiger Verlauf von $\log(|F_z|)$ im negativen Bereich. Daher werden positive Werte von $\log(|F_z|)$ im Gütekriterium $J_{stör}$ durch eine Quadrierung besonders bestraft (Gleichung (8)). Zusätzlich wird ein weiterer Term zur Bestrafung starker Krümmung der Störübertragungsfunktion $|F_z|$ addiert. Dadurch soll ein gleichmäßiger Verlauf von $|F_z|$ über den Frequenzbereich erreicht werden. Somit wird folgender zu minimierende Güteindex $J_{stör}$ definiert:

$$J_{stör} = \int_{\omega_1}^{\omega_g} \left(\log(|F_z(\omega)|) \Big|_{|F_z| < 1} + \underbrace{\log(|F_z(\omega)|^2)}_{\text{Strafterm für Werte von } |F_z| > 1} \Big|_{|F_z| > 1} + \alpha \cdot \underbrace{\frac{\partial^2 |F_z(\omega)|}{\partial \omega^2}}_{\text{Strafterm für Krümmung von } F_z} \right) d\omega \quad (8)$$

Die Integrationsgrenzen ω_1 und ω_g entsprechen über $\omega = 2\pi/T$ den Periodendauern $T_1 = 100 \cdot T_A = 200$ sec und $T_g = 2 \cdot T_A = 4$ sec (ω_g : Grenzfrequenz nach Shannon'schen Abtasttheorem). Somit wurde mit dem Intervall $[\omega_1, \omega_g]$ der für den Prozess relevante Frequenzbereich ausgewählt. Die Integration wird numerisch durchgeführt.

Anschaulich kann $J_{stör}$ interpretiert werden als ein Maß für die Standardabweichung des Ausgangssignals y . Das ergibt sich aus folgender Überlegung. Es gilt für die Standardabweichung σ_y

$$\sigma_y^2 = \Theta_{yy}(0) - \bar{y}^2 \quad (9)$$

Dabei bezeichnen $\Theta_{yy}(\tau)$ die Autokorrelationsfunktion und \bar{y} den Mittelwert von y . $\Theta_{yy}(0)$ berechnet sich zu

$$\Theta_{yy}(0) = \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} |F_z(\omega)|^2 S_{zz}(\omega) d\omega, \quad (10)$$

wobei $S_{zz}(\omega)$ das Leistungsdichtespektrum des Rauschsignals bezeichnet [11]. Für weißes Rauschen ($S_{zz}(\omega) = \text{const.}$) ergibt sich zumindest näherungsweise ein Ausdruck vom Typ (8). Für stark negative Werte von $J_{stör}$ kann das Störverhalten als optimal ($\mu_{stör} = 1$), für stark positive Werte als nicht akzeptabel ($\mu_{stör} = 0$) beurteilt werden. Entsprechend wird folgende Definition vorgeschlagen (vgl. Abb. 7):

$$\mu_{stör}(J_{stör}) = \min\left(1, \exp\left(-\frac{J_{stör} - J_1}{J_2}\right)\right) \quad (11)$$

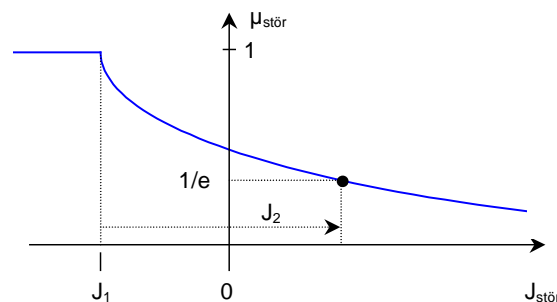


Abb. 7: Fuzzy-Gütekriterium bezüglich Störverhalten ($\mu_{stör}$)

Die Parameter J_1, J_2 wurden zu $J_1 = -3$ und $J_2 = 6$ gewählt. Die Parameter sind relativ leicht zu interpretieren, da $J_{stör}$ in etwa den Mittelwert der Störübertragungsfunktion $|F_z|$ in dB-Einheiten darstellt (vgl. Gleichung (8)).

3.4.2 Gütekriterium 2: Führungsverhalten

Um stationäre Genauigkeit zu erhalten, muss der Betrag der Führungsübertragungsfunktion F_w für kleine Frequenzen etwa gleich 1 sein, d.h. im logarithmischen Maßstab gleich 0. Werte $\log(|F_w|) > 0$ entsprechen überschwingendem Verhalten und sind ebenso ungünstig wie Werte $\log(|F_w|) < 0$, d.h. langsames Erreichen des stationären Zustandes. Es wird daher folgender zu minimierende Teilindex $J_{führ}$ als Mittelwert von F_w bei kleinen Frequenzen definiert:

$$J_{führ} = \frac{1}{\omega_2 - \omega_1} \int_{\omega_1}^{\omega_2} \log(|F_w(\omega)|) d\omega, \quad \omega_2 \approx \omega_1 \quad (12)$$

Bei der rechentechnischen Implementierung wurde $\omega_1 = 0.031$ rad/sec und $\omega_2 = 0.055$ rad/sec gewählt. Dies entspricht den Periodendauern $T_1 = 100 \cdot T_A = 200$ sec und $T_2 = 97.5 \cdot T_A = 115$ sec.

Das Führungsverhalten kann als optimal bezeichnet werden, wenn das definierte Gütekriterium $J_{führ}$ (=Mittelwert von $|F_w|$ in dB-Einheiten) nahe bei Null liegt. Da in $J_{führ}$ sowohl positive als auch negative Werte von $\log(|F_w|)$ zu positiven Werten führen (vgl. (13)), ist die Definition folgender Zugehörigkeitsfunktion sinnvoll

$$\mu_{führ}(J_{führ}) = \exp\left(-\frac{J_{führ}}{J_1}\right), \quad (13)$$

wobei der Parameter J_1 zu $J_1 = 5$ dB gewählt wurde.

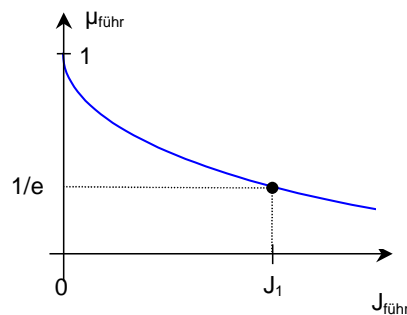


Abb. 8: Fuzzy-Gütekriterium bezüglich Führungsverhalten ($\mu_{führ}$)

3.4.3 Gütekriterium 3: Stabilität

Zur Beurteilung der Stabilität ist die Lage der Pole des geschlossenen Regelkreises wesentlich (vgl. Übertragungsfunktionen in Tabelle 2). Befinden sich alle Pole in der negativen Halbebene (Realteil $Re(s) < 0$), so ist der Regelkreis stabil. Falls ein oder mehrere Pole in der rechten Halbebene ($Re(s) > 0$), so ist der Regelkreis instabil. Falls ein Pol auf der Imaginärachse liegt und alle anderen sich in der linken Halbebene befinden, ist der Regelkreis grenzstabil [8]. Zur Bewertung der Stabilität wird daher die Lage des Pols mit dem größten Realteil herangezogen ($\max Re(s)$). Es erscheint als sinnvoll, einen optimalen Wert $Re_{opt} < 0$ zu definieren mit $\mu_{stab} = 1$ für

$\max \operatorname{Re}(s) < \operatorname{Re}_{opt}$. Weiter ist es plausibel, für den Fall, dass $\max \operatorname{Re}(s) > 0$ gilt, $\mu_{stab} = 0$ zu setzen. Im Zwischenbereich wird linear interpoliert. Dadurch ergibt sich folgende Definition der Zugehörigkeitsfunktion μ_{stab} :

$$\mu_{stab} = \begin{cases} 1 & \text{für } \max \operatorname{Re}(s) < \operatorname{Re}_{opt} < 0 \\ \frac{\max \operatorname{Re}(s)}{\operatorname{Re}_{opt}} & \text{für } \operatorname{Re}_{opt} < \max \operatorname{Re}(s) < 0 \\ 0 & \text{für } 0 < \max \operatorname{Re}(s) \end{cases} \quad (14)$$

Der optimale Wert $\operatorname{Re}_{opt} < 0$ wurde entsprechend der erreichbaren Stabilität bei dem VZ2-Modell zu $\operatorname{Re}_{opt} = -0.05$ gewählt.

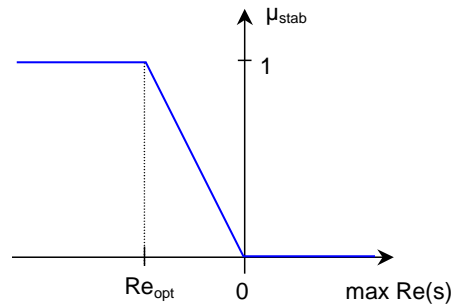


Abb. 9: Fuzzy-Gütekriterium bezüglich Stabilität (μ_{stab})

Von entscheidender Bedeutung ist, dass die Zugehörigkeitsfunktion μ_{stab} im Gegensatz zu $\mu_{stör}$ und $\mu_{führ}$ den Wert Null annehmen kann. Wegen der UND-Verknüpfung der Teilkriterien (vgl. (6)) werden die entsprechenden Lösungswerte k_p und k_i ausgeschlossen, die wegen $\max \operatorname{Re}(s)$ zu instabilen Lösungen führen würden. Dieser transparente Mechanismus ist ein wesentlicher Vorteil des hier vorgestellten Ansatzes.

3.4.4 Gütekriterium 4: Stellverhalten

Bezüglich des Stellverhaltens sind möglichst geringe Stelleingriffe anzustreben. Da beim vorliegenden stark gestörten Glasziehprozess in der stationären Phase das Fehlersignal $e = w - \hat{y}$ überwiegend stochastischer Natur ist, besteht das Ziel darin, die Standardabweichung von u zu minimieren. Entsprechend der Überlegung bei der Störoptimierung wird dies über die Minimierung des Integrals über die Ersatzreglerübertragungsfunktion

$$R^*(s) = \frac{u(s)}{e(s)} \quad (15)$$

erreicht (vgl. Störübertragungsfunktionen in Tabelle 2). Es wird daher folgender zu minimierende Güteindex J_u definiert:

$$J_{stell} = \int_{\omega_1}^{\omega_2} \log(|R^*(\omega)|) d\omega \quad (16)$$

Somit werden also im Mittel möglichst kleine Werte von $\log(|R^*(\omega)|)$ angestrebt, was einem geringem Stellaufwand entspricht.

Das Fuzzy-Gütekriterium bezüglich Stellverhalten (μ_{stell}) wird in vollkommen analoger Weise wie das Gütekriterium bezüglich Störverhalten ($\mu_{stör}$) definiert, da auch hier für stark negative Werte von J_{stell} das Stellverhalten als optimal ($\mu_{stell} = 1$), für stark positive Werte als nicht akzeptabel ($\mu_{stell} = 0$) beurteilt werden kann. Entsprechend Gleichung (11) wird folgende Definition vorgeschlagen:

$$\mu_{stell}(J_{stell}) = \min(1, \exp(-\frac{J_{stell} - J_1}{J_2})) \quad (17)$$

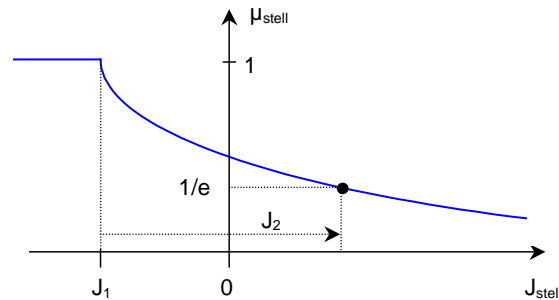


Abb. 10: Fuzzy-Gütekriterium bezüglich Stellverhalten (μ_{stell})

Die Parameter J_1, J_2 wurden zu $J_1 = -5$ und $J_2 = 5$ gewählt. Die Parameter entziehen sich hier allerdings einer einfachen Interpretation. Es ist daher zunächst der Wertebereich von J_{stell} festzustellen und schließlich J_1 und J_2 entsprechend der erreichbaren Güte festzulegen.

3.5 Robustheit gegenüber Modellungenauigkeiten

Die verwendeten Reglerstrukturen erbringen naturgemäß die besten Ergebnisse für den Fall der idealen Übereinstimmung des Streckenmodells M mit der tatsächlichen Strecke S ($S = M$). Es gilt beispielsweise für die Führungsübertragungsfunktion des Smith-Prädiktorregelkreises mit PI-Grundregler (siehe Tabelle 2):

$$F_w = \frac{y}{w} = \frac{RST}{1 + RM + R(S - M)T} \quad (18)$$

Die Abweichung des Modells von der Strecke wird offensichtlich durch den Term $(S - M)$ beschrieben. Nur für $S = M$, d.h. ideale Übereinstimmung des Modells mit dem Streckenverhalten, wird die Totzeit der Strecke kompensiert.

Die Abweichung vom Modell gegenüber dem Streckenverhalten werden über relative Fehlerparameter $\Delta k_{rel}, \Delta T_{rel}$ modelliert (vgl. Abschnitt 3.2). Es gilt für die VZ2-Strecke

$$S(s) = \frac{\Delta k_{rel} k_s}{(1 + \Delta T_{rel} T_s s)^2} \quad (19)$$

Mit S sind auch die Übertragungsfunktionen F_z, F_w, F_u von Δk_{rel} und ΔT_{rel} abhängig und dadurch auch die Gütekriterien $\mu_{stör}, \mu_{führ}, \mu_{stab}, \mu_{stell}$.

Zur Berechnung von Fuzzy-Gütekriterien, die auch die möglichen Modellungenauigkeiten enthalten, werden die einzelnen Gütekriterien $\mu_{stör}, \mu_{führ}, \mu_{stab}, \mu_{stell}$ in Abhängigkeit von Δk_{rel} und ΔT_{rel} berechnet und jeweils durch den Fuzzy-UND-Operator miteinander verknüpft (20).

$$\begin{aligned}
\tilde{\mu}_{stör} &= \bigwedge_{\Delta k_{rel}, \Delta T_{rel}} \mu_{stör}(\Delta k_{rel}, \Delta T_{rel}), & \wedge = \min \\
\tilde{\mu}_{führ} &= \bigwedge_{\Delta k_{rel}, \Delta T_{rel}} \mu_{führ}(\Delta k_{rel}, \Delta T_{rel}) \\
\tilde{\mu}_{stab} &= \bigwedge_{\Delta k_{rel}, \Delta T_{rel}} \mu_{stab}(\Delta k_{rel}, \Delta T_{rel}) \\
\tilde{\mu}_{stell} &= \bigwedge_{\Delta k_{rel}, \Delta T_{rel}} \mu_{stell}(\Delta k_{rel}, \Delta T_{rel})
\end{aligned} \tag{20}$$

Die Aggregation der somit erhaltenen Teilkriterien $\tilde{\mu}_{stör}$, $\tilde{\mu}_{führ}$, $\tilde{\mu}_{ab}$, $\tilde{\mu}_{ell}$ erfolgt entsprechend Gleichung (6) gemäß

$$\mu_D(K_p, K_I) = \min(\lambda_{stör} \tilde{\mu}_{stör}, \lambda_{führ} \tilde{\mu}_{führ}, \lambda_{stab} \tilde{\mu}_{stab}, \lambda_{stell} \tilde{\mu}_{stell}) + \varepsilon \tilde{\mu}_{stör} \tilde{\mu}_{führ} \tilde{\mu}_{stab} \tilde{\mu}_{stell} \tag{21}$$

4 Ergebnisse der Parameteroptimierung

Zur Veranschaulichung des vorgestellten Optimierungskonzeptes werden im folgenden die Ergebnisse zu Regelkreisstruktur 2 (Smith-Prädiktor mit selektiven P- und I-Zweigen, s. Abb.4) betrachtet.

In Abb. 11 sind die Fuzzy-Gütekriterien bezüglich Störverhalten $\mu_{stör}$, Führungsverhalten $\mu_{führ}$, Stellaufwand μ_{stell} und Stabilität μ_{stab} sowie die resultierende Fuzzy-Entscheidung μ_D in Abhängigkeit der zu optimierenden Parameter k_p und k_I dargestellt. Das Ergebnis wurde für $T_{tot} = 235$ sec erzielt. Aus den unterschiedlichen Positionen der Maxima der einzelnen Gütekriterien wird deutlich, dass gegensätzliche Güteanforderungen vorliegen. So wird gutes Störverhalten eher für "kleine" k_I -Werte erreicht, während für gutes Führungsverhalten "große" k_I -Werte günstig sind. Beim Gütekriterium zur Stabilität μ_{stab} ist zu erkennen, dass für große Bereiche des $[k_p, k_I]$ -Parameterraums sich instabiles Verhalten ergeben würde, was durch Bereiche mit $\mu_{stab} = 0$ gekennzeichnet ist. Durch die UND-Verknüpfung der Gütekriterien wird sichergestellt, dass diese Werte nicht zur Lösungsmenge gehören können.

Kennlinien der optimierten Parameter k_p^* , k_I^* sowie der Zugehörigkeitsgrad $\mu_D(k_p^*, k_I^*)$ sind in Abb. 12 als Funktion der Messtotzeit T_{tot} dargestellt, die in Abhängigkeit der Abzugsgeschwindigkeit v variiert. Bei dickwandigen Rohren treten sehr langsame Abzugsgeschwindigkeiten und somit große Totzeiten auf, bei dünnwandigen Rohren sind die Totzeiten bis zu einem Faktor von 10 geringer. Durch Hilfslinien sind die konstanten Parameterwerte vor der Optimierung gekennzeichnet. Es ist ersichtlich, dass der Zugehörigkeitsgrad μ_D , der als Gütemaß der optimierten Werte interpretiert werden kann, durch die Optimierung deutlich gesteigert wurde.

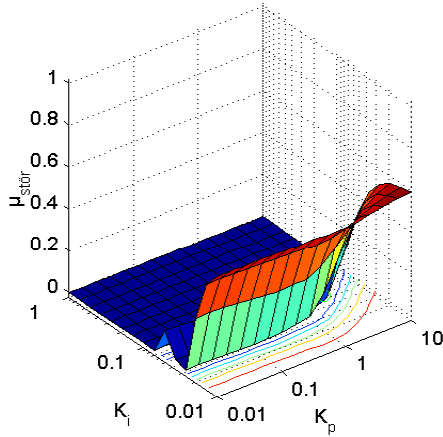
Interessant ist die Tatsache, dass für kleine Totzeiten das Gütemaß abnimmt. Dies ist dadurch zu erklären, dass für Totzeiten in der Größenordnung der Zeitkonstante ($T_{tot} \approx T_S = 32$ sec) der hier berücksichtigte relative Modellfehler in T_S von ± 50 % sich stärker bemerkbar macht als für $T_{tot} > T_S$. Für den Fall sehr großer Totzeiten ($T_{tot} \gg T_S$) nimmt die Robustheit des Smith-Prädiktors hingegen auch ab, so dass das Gütemaß hier ebenfalls niedrigere Werte annimmt.

Die Ergebnisse dieser Optimierung wurde in Form von Lookup-Tabellen in der Prozessregelungssoftware implementiert und seither mit Erfolg eingesetzt. Hierbei wurden Verbesserungen in der Regelgüte von bis zu 30% gegenüber heuristisch optimierten Regelparametern erzielt. Gegenüber den herkömmlichen vektoriellen Gütekriterien

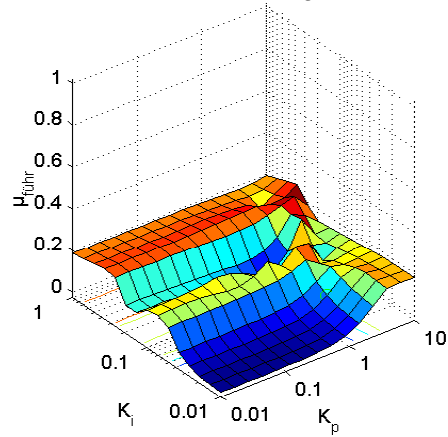
gestattet das vorgestellte fuzzy-basierte Regleroptimierungskonzept eine individuellere Berücksichtigung in der Praxis auftretender, heuristischer Güte- und Robustheitsforderungen sowie Beschränkungen.

Fuzzy-Gütekriterien bei selektivem P&I-Regler (VZ2-Strecke, $T_{tot} = 235$ sec)

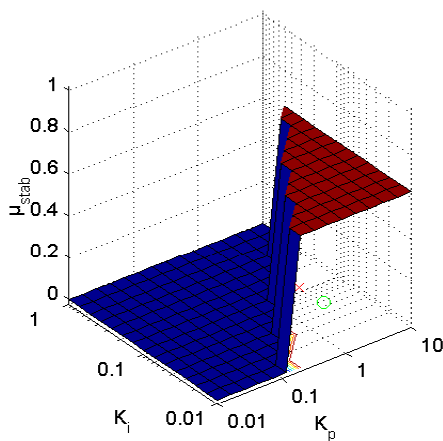
Gütekriterium Störverhalten



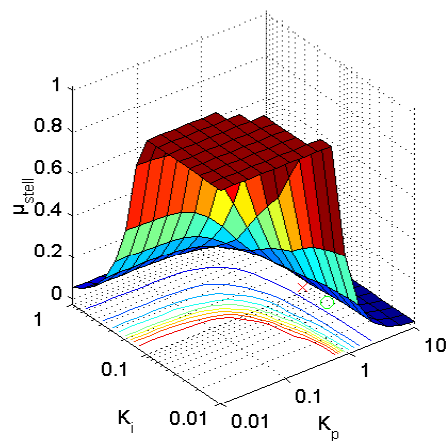
Gütekriterium Führungsverhalten



Gütekriterium Stabilität



Gütekriterium Stellverhalten



Fuzzy Decision μ_D

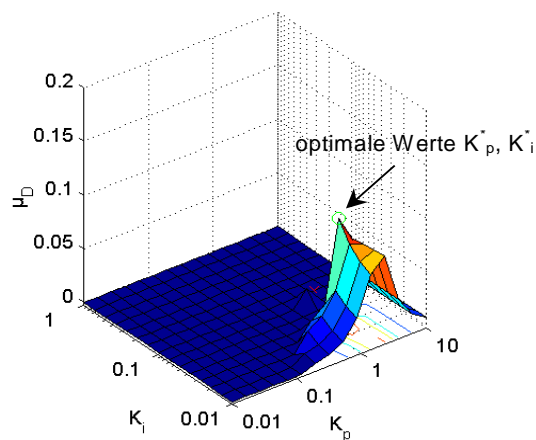


Abb. 11: Fuzzy-Gütekriterien bei VZ2-Strecke ($T_{tot} = 235$ sec)

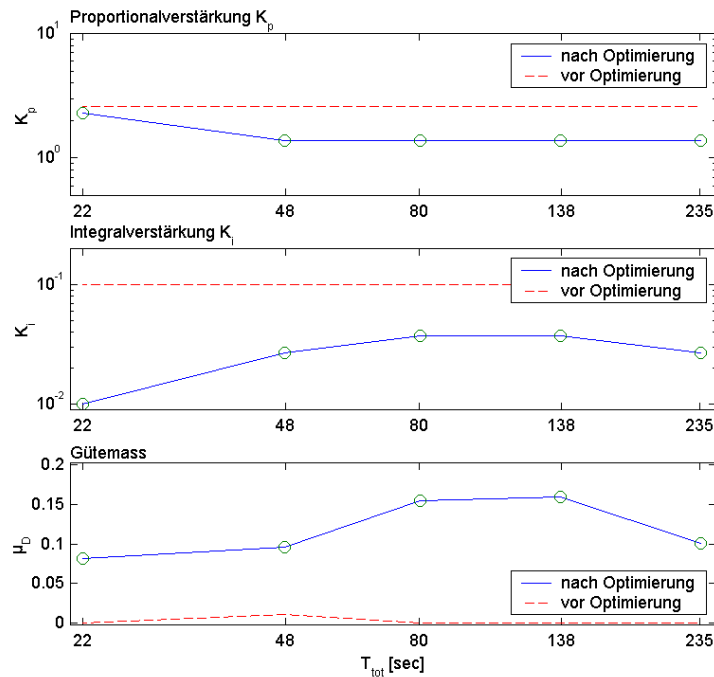


Abb. 12: Optimierte Parameter k_p und k_i sowie resultierendes Gütemaß μ_D für eine VZ2-Strecke als Funktion der Messtotzeit

5 Literatur

- [1] Kreisselmeier, G; Steinhauser, R.: Systematische Auslegung von Reglern durch Optimierung eines vektoriellen Gütekriteriums, *Regelungstechnik* 27, pp. 76-79, 1979
- [2] Ackermann, J.: *Robuste Regelung*. Springer, Heidelberg 1993
- [3] Kahlert, J.: *Vektorielle Optimierung mit Evolutionsstrategien und Anwendungen in der Regelungstechnik*. VDI-Verlag, Düsseldorf, 1991
- [4] Bellman, R.E.; Zadeh, L.A.: Decision Making In A Fuzzy Environment, *Management Science*, 17 (1970), S. 141-163
- [5] Bernard, T.: Ein Beitrag zur gewichteten multikriteriellen Optimierung von Heizungs- und Lüftungsregelkreisen auf Grundlage des Fuzzy Decision Making. Universität Karlsruhe, Fakultät für Maschinenbau, Dissertation 2000, online: <http://thbernard.leute.server.de/diss>
- [6] Rommelfanger, H.: *Fuzzy Decision Support Systeme*. Springer-Verlag, Heidelberg 1994
- [7] Kiendl, H.: *Fuzzy Control methodenorientiert*. Oldenbourg-Verlag, München; 1997
- [8] Föllinger, O.: *Regelungstechnik: Einführung in die Methoden und ihre Anwendung*, Hüthig-Verlag, Heidelberg 1994
- [9] Sajidman, M.; Kuntze, H.B.: Fuzzy-Regelung stark gestörter, verfahrenstechnischer Prozesse mit großer Messtotzeit; Proc. 5. Workshop "Fuzzy Control" des GMA-UA 1.4.2, Dortmund 1995
- [10] Smith, O. J.: A Controller to Overcome Deadtime, *ISA Journal*, 6 (1959) 2, pp. 28-33
- [11] Isermann, R.: *Digitale Regelsysteme*. Berlin, Springer, 1977