

# Einstellung von PID-Reglern in einer Mehrgrößenumgebung – Software und Anwendungsbeispiel

Rainer Dittmar, Fachhochschule Westküste, FB Technik  
dittmar@fh-westkueste.de

## Zusammenfassung

Moderne Prozessanlagen weisen oft eine starke stoffliche und energetische Integration auf, in deren Ergebnis nicht zu vernachlässigende Wechselwirkungen zwischen PID-Eingrößenregelkreisen entstehen. Eine sequentielle Vorgehensweise bei der Einstellung der individuellen PID-Regler ist in dieser Situation nicht nur zeitaufwändig, sondern führt auch nicht zu einem optimalen Gesamtergebnis. Der Beitrag stellt eine Methode und ein darauf aufbauendes Software-Werkzeug vor, die es erlauben, optimale Reglerparameter für PID-Eingrößenregler in einer Mehrgrößenumgebung zu bestimmen und die Regler gemeinsam in einem Schritt zu parametrieren. Das Verfahren stützt sich auf die Identifikation dynamischer Modelle für alle Stellgrößen-Regelgrößen-Beziehungen der einzustellenden PID-Regler. Die Reglerparameter werden durch Lösung eines nichtlinearen Optimierungsproblems mit Nebenbedingungen ermittelt. Die Anwendung wird an einem Beispiel aus dem Raffineriebereich demonstriert.

## 1 Motivation

Moderne verfahrenstechnische Prozessanlagen sind zunehmend durch starke stoffliche und insbesondere energetische Kopplungen zwischen Teilanlagen und Prozesseinheiten, durch Stoffkreisläufe sowie durch die Einsparung von Zwischenpuffern gekennzeichnet. Neue Anforderungen an die Prozessführung ergeben sich auch aus häufigeren Änderungen der Art und Qualität der eingesetzten Rohstoffe und Energieträger sowie notwendiger größerer Flexibilität hinsichtlich Menge und Qualität der hergestellten Produkte.

Obwohl ihrer Natur nach Mehrgrößensysteme, werden Prozessanlagen aus guten Gründen mit einer Vielzahl von dezentralen Eingrößen-PID-Regelkreisen instrumentiert. Das Prinzip der dezentralen Regelung an einer Mehrgrößensystem-(MIMO)-Regelstrecke ist in Abb. 1 für  $n$  Regel- und Stellgrößen dargestellt. Die Zuordnung der Regel- zu den Stellgrößen und damit die Definition der „Hauptregelstrecken“ ist Teil des Anlagenentwurfs. Über die „Koppelstrecken“ beeinflussen sich die Einzelregelkreise untereinander.

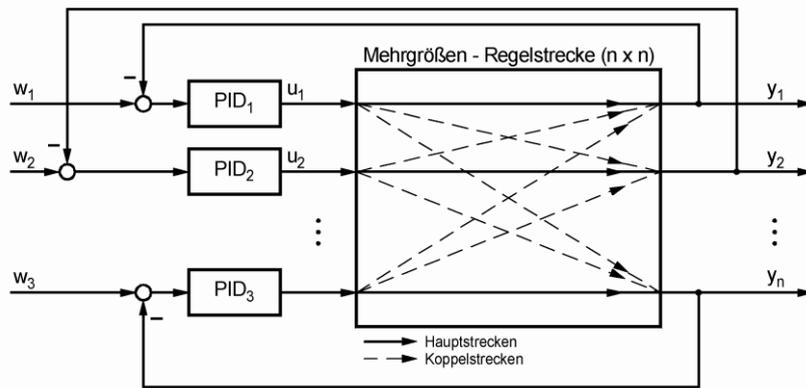


Abbildung 1: Dezentrale Mehrgrößenregelung

Die oben beschriebenen Veränderungen führen dazu, dass die Wechselwirkungen zwischen den individuellen PID-Regelkreisen tendenziell wesentlich stärker in der Prozessführung spürbar werden als das früher der Fall war. Die Einstellung günstiger Reglerparameter, die nicht nur eine angemessene Regelgüte, sondern auch Robustheit gegenüber Änderungen des Streckenverhaltens im laufenden Anlagenbetrieb sichern, wird unter diesen Bedingungen zu einer immer anspruchsvolleren Aufgabe.

Die gegenwärtige industrielle Praxis der Einstellung von PID-Regelkreisen ist durch folgende Merkmale gekennzeichnet:

- Sequentielle Einstellung beginnend mit den „wichtigen“ Regelkreisen, Hauptmethoden: systematisches Probieren und Anwendung „bewährter“ Parametersätze, keine quantitative Abschätzung von Performance und Robustheit;
- wenn überhaupt, dann Anwendung herkömmlicher (klassischer) Einstellregeln, neuere Einstellregeln weitgehend unbekannt;
- nicht ausreichende Berücksichtigung der spezifischen Form des auf Automatisierungssystemen sehr unterschiedlich implementierter PID-Algorithmen;
- sehr zögerliche Anwendung von Tuning-Werkzeugen, die von AS-Herstellern mitgeliefert oder von Dritten angeboten werden;
- nahezu ausschließlich Single-Loop-Tuning.

In der vorliegenden Arbeit wird eine Methode und ein auf dieser Grundlage entwickeltes Software-Werkzeug „AptiTune™“ vorgestellt, das es erlaubt, optimale Reglerparameter für PID-Eingrößenregler in einer Mehrgrößenumgebung zu bestimmen und mehrere Regler gemeinsam in einem Schritt zu parametrieren („Multi-loop Tuning“). Natürlich ist es möglich, das Werkzeug auch für die Parametrierung von Eingrößenregelkreisen zu benutzen. Ziel der Entwicklung war es, ein zwar auf modernen regelungstechnischen Methoden basierendes, aber dennoch praxisgerechtes, nicht zu hohe Anforderungen an regelungstheoretische Vorkenntnisse stellendes, Werkzeug bereitzustellen. Seine Anwendung setzt voraus, dass ein dynamisches Modell aller Stellgrößen-Regelgrößen-Beziehungen des Mehrgrößensystems identifiziert wird. Die Identifikation ist selbst nicht Bestandteil des Tuning-Werkzeugs. Die Bestimmung der Reglerparameter geschieht durch Lösung eines (i.A.

nicht-konvexen, multimodalen) nichtlinearen Optimierungsproblems mit Nebenbedingungen. Die Anwendung wird an einem industriellen Beispiel aus dem Raffineriebereich demonstriert.

## 2 Methode und Software-Werkzeug

### 2.1 Modellbildung

Der erste Schritt des modellbasierten Multiloop-Tunings ist die Entwicklung eines dynamischen Prozessmodells mit  $n$  Ein- und  $n$  Ausgangsgrößen, den Stellgrößen  $u_i$  und Regelgrößen  $y_j$  des in Abb. 1 dargestellten Mehrgrößensystems. Dafür können verschiedene Methoden und Werkzeuge eingesetzt werden. Ein nahe liegender Weg ist die Anwendung von Mehrgrößen-Identifikationswerkzeugen, die als Bestandteil von MPC-(Model Predictive Control)-Programmsystemen bereits weite Verbreitung gefunden haben. Beispiele sind DMCplus (Aspen Technology) und Profit Controller (Honeywell, vgl. [1]), für eine Übersicht siehe [2].

Messdaten für die experimentelle Prozessidentifikation des Mehrgrößensystems werden vorzugsweise auf der Grundlage von Tests bei geöffneten PID-Regelkreisen gewonnen. Dazu werden zunächst alle  $n$  einzustellenden Regelkreise in den Handbetrieb geschaltet, deren Stellgrößen nacheinander mehrfach sprungförmig verstellt und die Zeitverläufe aller Regelgrößen aufgezeichnet. Erfahrungsgemäß sind vier bis sechs Sprünge pro Stellgröße ausreichend. Dabei ist es sinnvoll, unterschiedliche Sprungdauern zwischen 10 und 100% der geplanten Ausregelzeiten zu verwenden, um unterschiedliche Frequenzen der Streckendynamik anzuregen. Wenn entsprechende Signalgeneratoren vorhanden sind, können alternativ zur Aufnahme von Sprungantworten können auch PRBS oder GBN-Signale verwendet werden. Auch eine - zeitsparende - simultane Verstellung mehrerer Stellgrößen ist möglich. Ist es nicht möglich, Regler in die Betriebsart HAND zu nehmen, können Versuche im geschlossenen Regelkreis (Sollwertsprungfolgen oder Addition eines Testsignals zur Stellgröße) durchgeführt und geeignete Closed-loop-Identifikationsmethoden verwendet werden [3], [4]. Die meisten Identifikationsprogramme erlauben eine Abspeicherung der Modelle im FIR- oder FSR-Format, d.h. als Folge von Impuls- oder Sprungantwortkoeffizienten.

Die (extern) ermittelten FIR-/FSR-Modelle werden dann in "AptiTune™" geladen, durch ein Zustandsmodell höherer Ordnung approximiert und so geglättet (Model-to-Model-Fit, Ho-Kalman-Algorithmus). Dieses Modell bildet die Grundlage für die Optimierung der Reglerparameter. Eine praktische Möglichkeit der Modellvalidierung besteht darin, das Führungsverhalten des Regelungssystems mit den derzeit eingestellten Parametern zu simulieren und die Simulationsergebnisse mit historischen Daten oder Ergebnissen aktiver Experimente (Sollwertsprünge) zu vergleichen.

## 2.2 Bestimmung optimaler Reglerparameter

Die Bestimmung der Reglerparameter  $K_{Pi}$ ,  $T_{Ni}$  und  $T_{Vi}$  für die  $i=1\dots n$  in den Entwurf einzubeziehenden PID-Regler geschieht durch numerische Lösung eines nichtlinearen Optimierungsproblems mit Nebenbedingungen:

$$\begin{aligned} \min_{K_{Pi}, T_{Ni}, T_{Vi}} \{ J = J_1 + \alpha J_2 + \beta J_3 \} \\ g_j(K_{Pi}, T_{Ni}, T_{Vi}) \leq 0 \quad j = 1 \dots m, i = 1 \dots n \end{aligned} \quad (1)$$

Darin bedeutet  $J$  die Zielfunktion, und die  $g_j$  bezeichnen  $j=1\dots m$  Ungleichungs-Nebenbedingungen. Die Zielfunktion  $J$  setzt sich aus drei Bestandteilen zusammen, die unterschiedliche Aspekte der Regelgüte bewerten:

1. Führungsverhalten: Integral der absoluten Regeldifferenz (IAE-Kriterium) nach einer Sollwertänderung

$$J_1 = \int_0^{T_f} |y(t) - y_r(t)| dt \quad (2)$$

Die Regeldifferenz wird dabei aus der Regelgröße  $y(t)$  und einer Referenztrajektorie  $y_r(t)$  gebildet, die sich mit Verzögerung erster Ordnung ausgehend vom aktuellen Istwert dem Sollwert annähert. Der Anwender kann über die Gestaltung dieser Trajektorie Einfluss auf das gewünschte Führungsverhalten nehmen. Zu diesem Zweck kann ein für alle Hauptregelstrecken gemeinsamer „Speedup-Faktor“  $SpF$  gesetzt werden, der als Verhältnis der  $T_{95\%}$ -Zeit der Regelstrecke zur gewünschten Anregelzeit definiert ist. Ein Speedup-Faktor von  $SpF = 1$  bedeutet also, dass der geschlossene Regelkreis „genau so schnell“ ist wie die Regelstrecke. Aus  $SpF$  ergibt sich umgekehrt die Zeitkonstante der Referenztrajektorie. Verkleinerung von  $SpF$  führt zu einer trägeren, Vergrößerung zu einer schnelleren Reaktion auf Sollwertänderungen.

2. Störverhalten: IAE nach einer sprungförmigen Störung am Streckeneingang

$$J_2 = \int_0^{T_f} |w(t) - y(t)| dt \quad (3)$$

Für diesen Fall wird die Regeldifferenz aus dem (konstanten) Sollwert  $w$  und dem Istwert  $y(t)$  der Regelgröße gebildet.

3. Stellaufwand: Integral der absoluten Stellgrößeninkremente

$$J_3 = \int_0^{T_f} |\Delta u(t)| dt \quad (4)$$

Über die Gewichte  $\alpha$  und  $\beta$  kann der Anwender die relative Bedeutung der verschiedenen Aspekte der Regelgüte bewerten. Da es sich um ein Mehrgrößensystem mit jeweils  $n$  Regel- und Stellgrößen handelt, werden die Zielfunktionen  $J$  für alle  $(n \times n)$  Antworten der

geschlossenen Regelkreise auf Sollwert- und Störgrößenänderungen berechnet. Über einen weiteren Entwurfsparameter kann beeinflusst werden, welches Gewicht das Führungs- und Störverhalten der einzelnen PID-Regelkreise gegenüber der Entkopplung der Regelkreise untereinander aufweisen soll.

Bei der Minimierung der beschriebenen Zielfunktion können (für jeden Regelkreis) folgende harte, d.h. in jedem Fall zu erfüllende, Nebenbedingungen berücksichtigt werden:

- Maximal erlaubte Stellgrößenänderung  $\Delta u_i(k) \leq \Delta u_{i,max}$  nach einer Änderung des Sollwerts
- Maximale Überschwingweite  $OS_i = (y_{i,max} - y_i(\infty)) / \Delta w_i * 100\% \leq OS_{i,max}$
- Minimale Dämpfung
- Maximale Verstärkung von Rauschsignalen (Messrauschen) in der Stellgröße
- Robustheit gegenüber Änderungen von Streckenverstärkung und Totzeit
- Maximal erlaubte Sollwertabweichung bei Füllstandsregelungen, deren Ziel die Ausnutzung des Puffervolumens ist („averaging level control“)
- Maximal erlaubte Zeit für die Rückkehr zum Sollwert (ebenfalls für diese Art von Füllstandsregelungen)
- obere und untere Grenzwerte für die Reglerparameter selbst.

Durch die Vorgabe einer oder mehrerer Nebenbedingungen kann der Anwender die Ermittlung optimaler Reglerparameter genau auf die prozessspezifischen Entwurfsforderungen abstimmen – selbst im Eingrößenfall ein klarer Vorteil gegenüber einer auf Erfahrungen bzw. Einstellregeln beruhenden Vorgehensweise.

Startwerte für die nichtlineare Optimierung werden durch Anwendung von Einstellregeln für die Einzelregelkreise gefunden. Alternativ kann die Initialisierung mit den auf dem Leitsystem vorgefundenen oder den zuletzt bestimmten Einstellwerten erfolgen. Wie die praktische Erfahrung zeigt, ist die Lösung des beschränkten Optimierungsproblems in manchen Fällen numerisch aufwändig. Dies äußert sich in der geometrisch komplizierten Gestalt der Zielfunktion und im Auftreten (mitunter vieler!) lokaler Minima. Das bedeutet, dass unterschiedliche suboptimale Sätze von Reglerparametern zu einem sehr ähnlichen Zeitverhalten des Regelungssystems führen können. Daher wurde das Programmsystem so gestaltet, dass der Anwender zwischen unterschiedlich aufwändigen Suchverfahren wählen kann.

Die Anwendung der Verfahren erfordert keine Spezialkenntnisse der Theorie der nichtlinearen Optimierung. Ein interner Mechanismus sorgt dafür, dass unzulässige Lösungen, die evtl. bei widersprüchlicher Spezifikation der als hart aufgefassten Nebenbedingungen auftreten können, vermieden werden.

Die Bestimmung der Reglerparameter wird auf den ausgewählten Reglertyp (P, I, PI, PID) und das konkrete Zielsystem (z.B. Prozessleitsysteme von Honeywell, ABB, Siemens, Emerson usw.) bezogen. Dies trägt dem Umstand Rechnung, dass die Umsetzung der PID-Reglergleichung auf verschiedenen Automatisierungssystemen im Einzelnen nicht zu vernachlässigende Differenzen aufweist, und für einen „generischen“ PID-Regler berechnete

Einstellwerte durchaus nicht das gewünschte Regelkreisverhalten erzeugen, wenn sie unbedenken in ein bestimmtes Leitsystem übernommen werden.

Mit den optimalen Reglerparametern wird abschließend eine Simulation des geschlossenen Regelungssystems für Führungs- und Störverhalten durchgeführt, und die sich ergebenden Stell- und Regelgrößenverläufe werden grafisch dargestellt. Das Störverhalten wird sowohl für sprungförmige Störungen an den Streckeneingängen als auch für stochastische Störungen an den Streckenausgängen berechnet. Für eine vereinfachte Robustheitsanalyse werden sogenannte Robustheitsplots angeboten, die den Abstand zur Stabilitätsgrenze für eine vorgegebene Unsicherheit der Verstärkungen und Totzeiten der Hauptstrecke visualisieren.

### 3 Anwendung

#### 3.1 Benzinstabilisierung in einer Raffinerie

Das Multiloop-Tuning-Werkzeug wurde vielfach in der ersten Phase von APC-(Advanced Process Control)-Projekten zur Neueinstellung der Regler eingesetzt, die später Sollwerte von einem übergeordneten MPC-Regler verarbeiten sollen. Ein Beispiel ist eine Benzin-Stabilisierungskolonnen in einer Raffinerie, deren vereinfachtes R&I-Schema in Abb. 2 dargestellt ist.

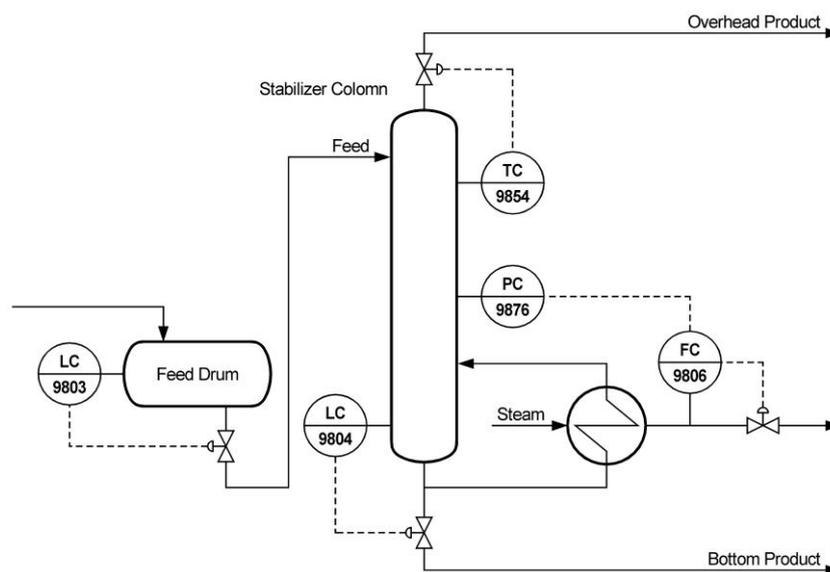


Abbildung 2: Benzinstabilisierungskolonnen

In dieser Kolonnen werden Wasserstoff und Methan aus dem Benzin (überwiegend C5-Verbindungen) abgetrennt (Kopfprodukt). Die etwas ungewöhnliche Stellgrößen-Regelgrößen-Zuordnung hat zunächst technologische Gründe: verwendet man die Heizleistung als Stellgröße für den Kolonnendruck und nicht das Ventil in der Kopfproduktleitung, ist die Wahrscheinlichkeit geringer, dass in Störsituationen der Druck zu hoch wird und das Sicherheitsventil anspricht. Die statische RGA-(Relative Gain Array)-Matrix hat den Wert

$$RGA = \begin{bmatrix} 0,8854 & 0,1146 \\ 0,1146 & 0,8854 \end{bmatrix} \quad (5)$$

Sie zeigt aber, dass die Zuordnung richtig gewählt ist: die RGA-Diagonalelemente liegen dichter am Wert Eins als die Nebendiagonalelemente. Eine dynamische RGA-Analyse zeigt, dass die Wechselwirkung zwischen den Regelkreisen, die nach der statischen RGA-Matrix nicht sehr ausgeprägt scheint, im Bereich der Bandbreite der Regelkreise deutlich zunimmt. Abbildung 3 zeigt den Verlauf der beiden RGA-Elemente in Abhängigkeit von der Frequenz.

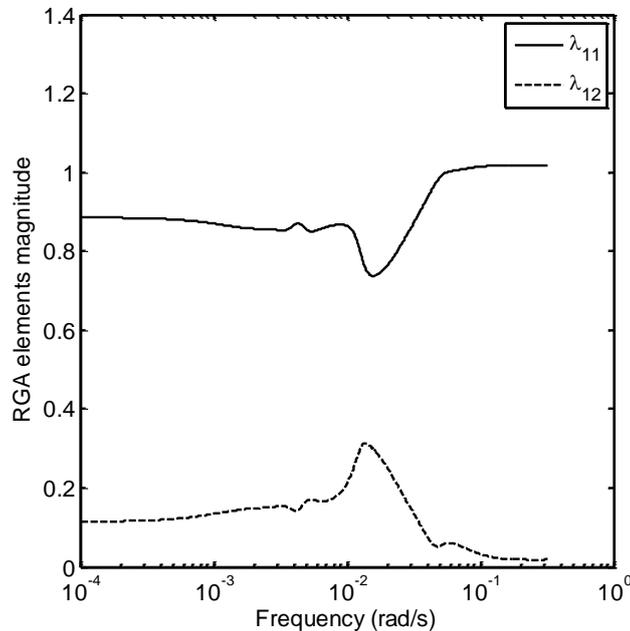


Abbildung 3: Amplitudengang der RGA-Elemente

Auf Grund der vorhandenen Kopplung sind die Druck- und Temperaturregler nur schwer unabhängig voneinander und für den gesamten Arbeitsbereiche der Kolonne einzustellen. Daher wurde eine Neueinstellung mit Hilfe von ‘‘AptiTune™’’ vorgenommen. Zunächst wurden (extern) FIR-Modelle auf der Grundlage von Experimenten im offenen Regelkreis ermittelt.

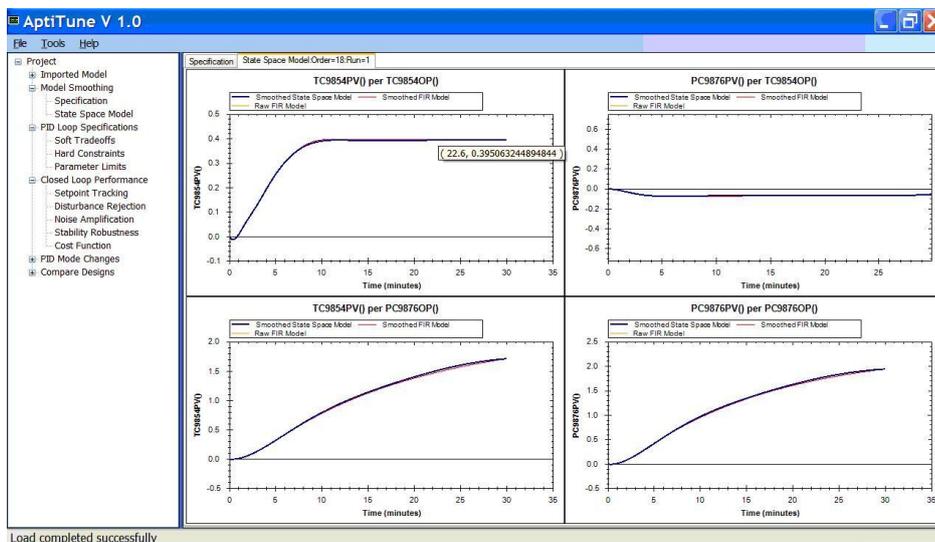


Abbildung 3: Sprungantworten des (2x2)-Modells der Kolonne

Die Sprungantworten des im Tuning-Tool generierten Zustandsmodells zeigt Abbildung 3. In Abb. 4 sind die simulierten Führungssprungantworten beider Regelkreise dargestellt.

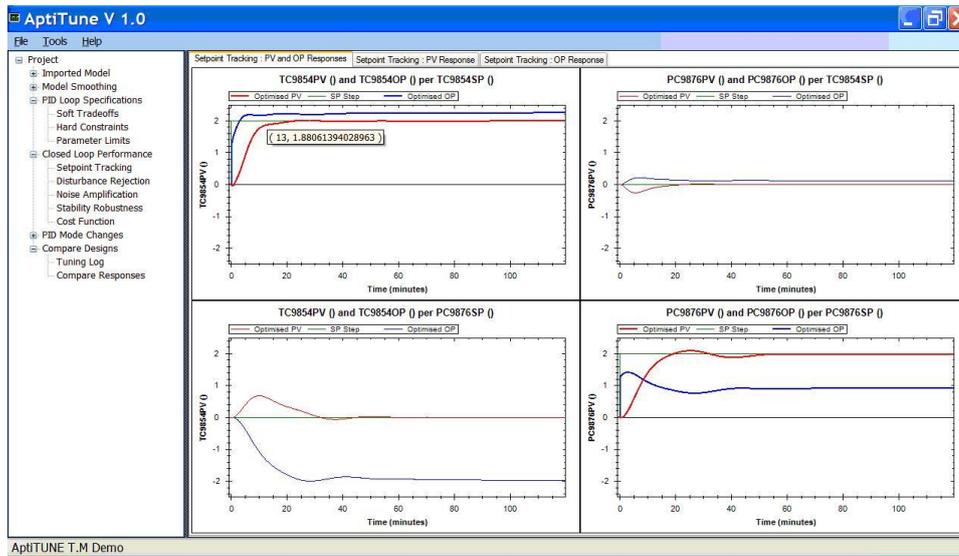
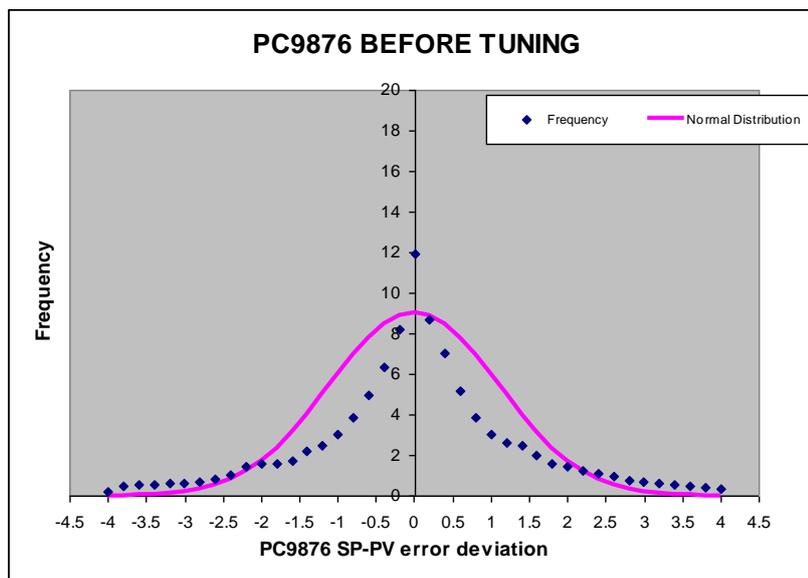


Abbildung 4: Führungsverhalten der Kolonnen-Regelkreise

Die Temperaturregelung weist einen Speedup-Faktor von  $SpF = 1$ , die Druckregelung von  $SpF = 2$  auf. Beide Sprungantworten sind durch geringe Überschwingweiten, gute Dämpfung und einen ruhigen Stellverlauf gekennzeichnet. Die Entkopplung ist ebenfalls als gut zu bewerten. Eine große Rolle spielte der Aspekt der Robustheit, da die Verstärkung der Temperaturstrecke stark arbeitspunktabhängig ist. Für den Temperaturregler wurde daher eine sehr hohe Amplitudenreserve vorgesehen. Um die Verbesserung der Regelgüte durch die Neueinstellung zu bewerten, wurden Regelkreisdaten jeweils eine Woche vor und nach der Neueinstellung aufgezeichnet und ausgewertet. Abbildung 5 zeigt beispielhaft die Verteilung der Regeldifferenz des Druckreglers, die eine Reduktion der Standardabweichung  $\sigma$  um den Faktor 4 aufweist (bei der Temperaturregelung konnte  $\sigma$  um 67% reduziert werden).



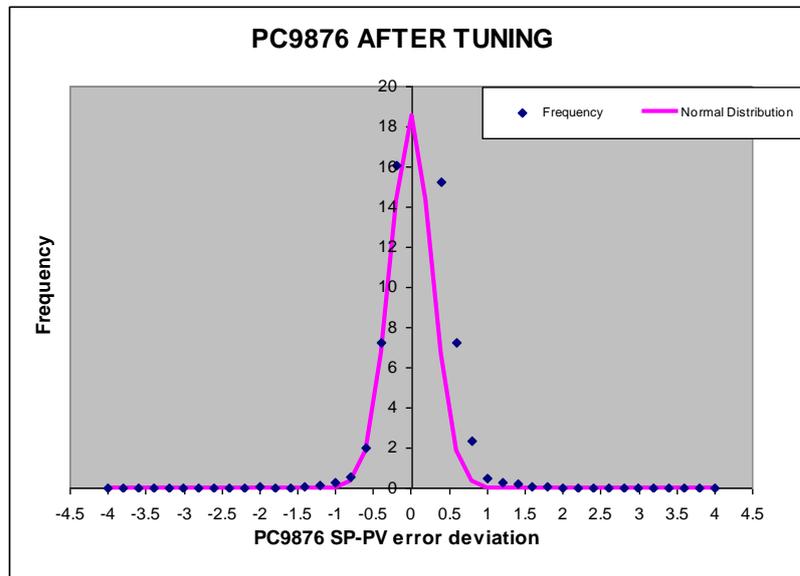


Abbildung 5: Histogramme der Regeldifferenz vor und nach der Regler-Neueinstellung

## 4 Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wird eine Methode und ein darauf basierendes, neu entwickeltes Software-Werkzeug zur Einstellung von PID-Regelkreisen in einer Mehrgrößenumgebung vorgestellt. Sie stützt sich auf Fortschritte der Theorie der Systemidentifikation und der nichtlinearen Optimierung mit Nebenbedingungen. Das Werkzeug ist darauf gerichtet, die bisher praktizierte zeitaufwändige, in starkem Maß erfahrungsabhängige, sequentielle Vorgehensweise bei der Einstellung dezentraler PID-Regler in Mehrgrößensystemen durch einen modellbasierten, simultanen Ansatz zu ersetzen. Im Gegensatz zur Verwendung von Einstellregeln können durch den Nutzer unterschiedliche, auf die konkrete Regelungsaufgabe zugeschnittene Forderungen an die Regelgüte und die Robustheit gemacht werden. Auch bei Unsicherheit des Prozessmodells und nichtlinearer Prozesscharakteristik lässt sich damit ein sicherer Betrieb der Regelungen über einen größeren Zeitraum und über einen größeren Arbeitsbereich erreichen.

Methode und Softwaretool wurden inzwischen in über 30 industriellen APC-Projekten erfolgreich eingesetzt [5]. In einer Reihe von Fällen ist es dabei gelungen, das Ziel eines „One-shot tuning“, d.h. der gleichzeitigen Ermittlung aller Reglerparameter ohne Notwendigkeit eines manuellen Feintuning, zu erreichen. Überwiegend wurden 2x2- bzw. 3x3-Systeme getunt, in einem Fall wurde das Verfahren auf ein 8x8-System angewendet (dort bestanden allerdings sehr gute Voraussetzungen für Anlagentests und Modellbildung).

Training vorausgesetzt, kann das Tuning-Werkzeug auch von qualifizierten Facharbeitern und Technikern genutzt werden. Die Modellbildung sollte aber von einem APC-Fachmann vorgenommen werden.

## Literatur

- [1] MacArthur, W.J., Zhan, C.: A practical global multi-stage method for fully automated closed-loop identification of industrial processes. *Journal of Process Control* 17(2007) S. 770 – 786.
- [2] Dittmar, R., Pfeiffer, B.-M. (2006). Industrielle Anwendung modellbasierter prädiktiver Regelungen. *Automatisierungstechnik* 54(2006) S. 590 - 601.
- [3] Isermann, R., Münchhof, M.: *Identification of dynamic Systems – an introduction with applications*. Springer 2010.
- [4] Zhu, Y.: *Multivariable System Identification for Process Control*. Pergamon Press 2001.
- [5] Harmse, M., u.a: Robust optimization-based multi-loop PID controller tuning: A new tool and an industrial example. Proceedings of the IFAC Symposium on Advanced Control of Chemical Processes (ADCHEM 2009), Koc University, Turkey 2009.