

# 34. REGELUNGSTECHNISCHES KOLLOQUIUM IN BOPPARD

16.-18. FEBRUAR 2000

## Programm und Kurzfassungen

### Mittwoch, 16. Februar 2000

nachmittags **Anreise**  
**18:30** **Abendessen** im Bellevue Rheinhotel

### Donnerstag, 17. Februar 2000

**08:45 – 09:15** **Eröffnung und Begrüßung (Raum 1)**  
*Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Günther Schmidt, TU München*

	Raum 1	S.	Raum 2	S.
<b>09:15 – 10:45</b>	<b>Modellbildung und Prozessführung (1)</b> Sitzungsleitung: <i>Prof. Dr.-Ing. J. Lunze</i>		<b>Diagnose und Anlagensicherheit</b> Sitzungsleitung: <i>Prof. Dr.-Ing. P. Neumann</i>	
09:15 – 09:45	Modellierung und Regelung des Triebwasserbereichs einer Kraftwerksgruppe <i>M. Meusburger (Univ. Linz, Schlacher)</i>	2	Einsatz von Qualitativen Modellen für eine rechnergestützte Sicherheitsanalyse von Automatisierungssystemen <i>U. Biegert (Univ. Stuttgart, Göhner)</i>	4
09:45 – 10:15	Modellierung und Regelung beim Antrieb und Wickeln von elastischen Stoffbahnen <i>D. Knittel (Univ. Louis Pasteur, Ostertag)</i>	6	Beobachterbasierte Meßfehlerdiagnose an einem aufgeladenen Verbrennungsmotor <i>S. Jakubek (TU Wien, Jörgl)</i>	8
10:15 – 10:45	Evaluierung und Selektion von Regelungsstrategien für komplexe verfahrenstechnische Anlagen <i>B. Mahn (Univ. Bochum, Reinig)</i>	10	Objektorientierte Modellierung von Wissen zur Inbetriebnahme und Diagnose von Feldbusgeräten <i>R. Bachmann (TU Dresden, Rieger)</i>	12

**10:45 – 11:15** **Kaffeepause**

<b>11:15 – 12:15</b>	<b>Modellbildung und Prozessführung (2)</b> Sitzungsleitung: <i>Prof. Dr.-Ing. H. Unbehauen</i>		<b>Mechatronische Systeme</b> Sitzungsleitung: <i>Prof. Dr.-Ing. A. Gräser</i>	
11:15 – 11:45	Phänomenologische Analyse von Raumheizsystemen mittels objektorientierter Modellbildung und Simulation <i>M. Frigge (Univ. Paderborn, Dörrscheid)</i>	14	Kraftregelung eines haptischen Displays zur kinästhetischen Interaktion mit virtuellen und realen entfernten Umgebungen <i>J. Hoogen (TU München, Schmidt)</i>	16
11:45 – 12:15	Ein Fertigungsleitsystem zur Optimierung der Ressourcendisposition für kleine und mittelständische Unternehmen <i>M. Baumann (IITB Karlsruhe, Steusloff)</i>	18	Implementierungsaspekte für die Realisierung eines mechatronischen Steer-by-Wire Systems <i>S. Feick (Univ. Kaiserslautern, Pandit)</i>	20

**12:15 – 14:00** **Mittagessen**

# 34. REGELUNGSTECHNISCHES KOLLOQUIUM IN BOPPARD

16.-18. FEBRUAR 2000

<b>14:00 – 15:00</b>	<b>Lineare Regelungstheorie</b> Sitzungsleitung: <i>Prof. Dr. A. Weinmann</i>	<b>Neuronale Netze (1)</b> Sitzungsleitung: <i>Prof. Dr.-Ing. V. Krebs</i>
14:00 – 14:30	Frequenzbereichs-Spezifikationen durch Farbkodierung im Parameterraum <i>M. Muhler (DLR, Ackermann)</i>	Identifikation nichtlinearer zeitvarianter Prozesse mit Neuronalen Netzen <i>M. Tagscherer (TU Chemnitz, Protzel)</i>
14:30 – 15:00	Schätzung und Fehlererkennung von hybriden Systemen mit gemischt ganzzahlig-kontinuierlicher Optimierung <i>D. Mignone (ETH Zürich, Morari)</i>	Online-Überwachung nichtlinearer Black-Box-Modelle für die prädiktive Regelung <i>V. Rossman (Univ. Dortmund, Engell)</i>

**15:00 – 15:30 Kaffeepause**

<b>15:30 – 16:30</b>	<b>Signalverarbeitung</b> Sitzungsleitung: <i>Prof. Dr. techn. K. Janschek</i>	<b>Neuronale Netze (2)</b> Sitzungsleitung: <i>Prof. Dr.-Ing. E. Schnieder</i>
15:30 – 16:00	Frequenz-Analyse nicht stationärer Signale mittels Wavelet-Theorie <i>S. Ellis (G.M. Univ. Duisburg, Schwarz)</i>	Einsatz schneller Neuronaler Netze zur modellgestützten Optimierung von Verbrennungsmotoren <i>M. Hafner (TU Darmstadt, Isermann)</i>
16:00 – 16:30	Sensorfusion in der automatischen Sichtprüfung metallischer Oberflächen <i>P. León (Univ. Karlsruhe (TH), Mesch)</i>	Einsatz eines Neuronalen Netzes für die Regelung einer Zykloidfeuerungsanlage <i>A. Noureldin (BTU Cottbus, Lappus)</i>

<b>16:45</b>	<b>Plenarvortrag 1</b>	<b>39</b>
	Gastvortrag  Some Perspectives on Nonlinear Control of Mechanical Systems <i>Prof. Mark W. Spong, University of Illinois at Urbana-Champaign</i> <i>zur Zeit Gast am Lehrstuhl für Steuerungs- und Regelungstechnik, TU München</i>  mit anschließender Diskussion	

**18:30 Abendessen**

# 34. REGELUNGSTECHNISCHES KOLLOQUIUM IN BOPPARD

16.-18. FEBRUAR 2000

**Freitag, 18. Februar 2000**

08:45 – 10:15	<b>Prädiktive Regelung</b> Sitzungsleitung: Prof. Dr.-Ing. F. Allgöwer	<b>Medizintechnische Anwendungen</b> Sitzungsleitung: Prof. Dr. U. Engmann
08:45 – 09:15	Selbsteinstellender prädiktiver Kompaktregler <i>J. Hücker (RWTH Aachen, Rake)</i>	40
09:15 – 9:45	Regelungskonzepte für Schwingungsprüfstände <i>J. Pfeiffer (TU Clausthal, Konigorski)</i>	44
09:45 – 10:15	Eine Anwendung modellgestützter prädiktiver Regelung zur Wasserbewirtschaftung des Mittellandkanals und des Elbe-Seiten-Kanals <i>H. Linke (TU Ilmenau, Puta)</i>	48
		42
		46
		50

**10:15 – 10:45 Kaffeepause**

10:45 – 12:15	<b>Nichtlineare Regelung</b> Sitzungsleitung: Prof. Dr.-Ing. D. Franke	<b>Fuzzy Logik</b> Sitzungsleitung: Prof. Dr. H. Kiendl
10:45 – 11:15	Flachheitsbasierte Folgeregelung eines Platte-Kugel-Systems <i>T. Meurer (Univ. Stuttgart, Zeitz)</i>	52
11:15 – 11:45	Regelungskonzept für nichtlineare Strecken auf der Grundlage linearer veränderlicher (LPV-)Systeme <i>S. Sommer (O.v.G. Univ. Magdeburg, Korn)</i>	56
11:45 – 12:15	Nichtlineare zeitdiskrete Regelung eines unteraktuierten Manipulators <i>N. Scherm (Univ. Hannover, Gerth)</i>	60
		54
		58
		62
<b>12:15 – 12:45</b>	<b>Plenarvortrag 2</b>	
	Die Schrecksekunde: Regelung kann helfen <i>Prof. Dr.-Ing. J. Ackermann, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.</i>	

**12:45 – 13:15 Abschlussdiskussion**

**13:15 – 14:30 Mittagessen**

**14:30 Ende des Kolloquiums**

# Modellierung und Regelung des Triebwasserbereichs einer Kraftwerksgruppe

Mathias Meusburger

Institut für Regelungstechnik und elektrische Antriebe  
Johannes Kepler Universität Linz  
Altenbergerstraße 69, A-4040 Linz  
Tel.: +43/732/2468/9736  
Fax: +43/732/2468/9734  
Email: mathias@regpro.mechatronik.uni-linz.ac.at

**Schlüsselwörter:** Verteiltparametrische Systeme, Pegelregelung einer hydraulischen Anlage, Hybride Systeme

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der Automatisierung der Triebwasserführung einer Wasserkraftwerksgruppe, die sich südlich von Innsbruck befindet und ursprünglich um die Jahrhundertwende gebaut wurde, siehe Bild 1. Um die Effizienz der Kraftwerke zu steigern, wurde im unteren Bereich des Triebwasserstollens durch diverse Einbauten ein Speicherraum, der im Folgenden als Stollenspeicher bezeichnet wird, geschaffen, dessen Inhalt zur Abdeckung von Lastspitzen herangezogen wird. Um bei großen Laständerun-

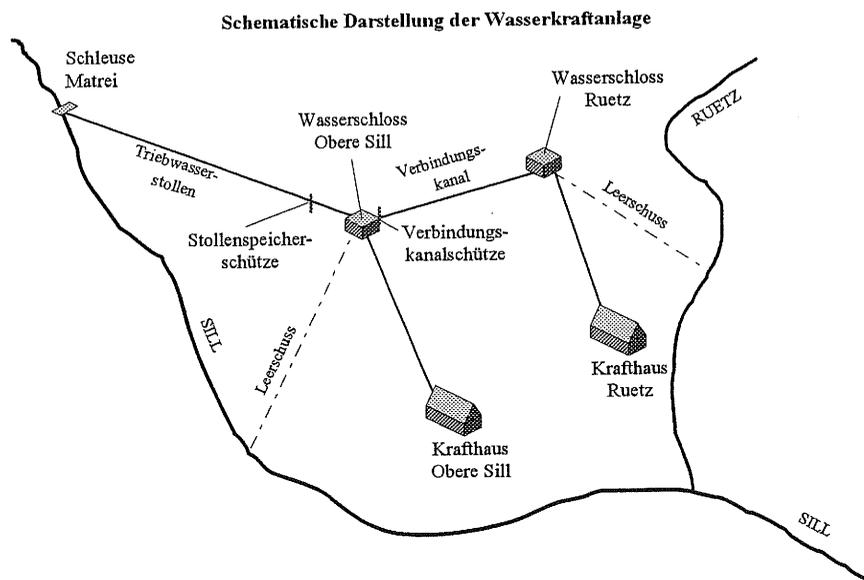


Bild 1: Schematische Darstellung der Wasserkraftanlage.

gen in den Kraftwerken sicherzustellen, dass der Pegelstand im Wasserschloss Obere Sill im zulässigen Bereich bleibt, muss der Abfluss aus diesem Stollenspeicher entsprechend geregelt werden.

Die zur Bewältigung dieser Aufgabe erforderlichen Regelstrategien und mathematischen Modelle wurden im Rahmen dieser Arbeit entwickelt [1]. Die Modellierung der Anlage erfolgte basierend auf den nichtlinearen partiellen Differentialgleichungen für die eindimensionale Rohr- und Kanalströmung. Das Modell zur Beschreibung der Strömung im Stollenspeicher konnte durch geeignete Annahmen auf ein System von vier gewöhnlichen

Differentialgleichungen reduziert werden. Die Kanalströmungen im unteren Stollenabschnitt, nach dem Stollenspeicher und im Verbindungskanal zwischen den beiden Wasserschlossern (siehe Bild 1) wurden mit Hilfe der partiellen Differentialgleichungen für die Kanalströmung

$$Q_t + 2\frac{Q}{A}Q_x + \left(gA - \left(\frac{Q}{A}\right)^2 A_y\right) y_x + gA(S - S_0) = 0$$

$$A_t + Q_x = 0,$$

mit dem Durchfluss  $Q$ , der Querschnittsfläche der Strömung  $A$ , dem Pegelstand  $y$ , der Erdbeschleunigung  $g$ , dem Reibungsgefälle  $S$  und dem Gefälle des Kanals gegenüber der Horizontalen  $S_0$  modelliert. Die Indizes  $x$ ,  $t$  und  $y$  symbolisieren dabei die partielle Ableitung nach den entsprechenden Größen. Für den Reglerentwurf und zur numerischen Lösung wurden die obigen partiellen Differentialgleichungen mit Hilfe eines finiten Differenzenverfahrens approximiert.

Neben den Strömungen wurde auch der Ausfluss unter einer Schütze modelliert. Das erstellte nichtlineare Ausflussmodell garantiert einen stetigen Übergang zwischen dem vollständigen und dem unvollständigen Ausfluss. Die gute Übereinstimmung zwischen dem mathematischen Modell und der realen Anlage konnte anhand von Messdaten festgestellt werden.

Basierend auf den mathematischen Modellen, die sich in Form von  $AI$ -Systemen darstellen lassen, wurden für die verschiedenen Betriebszustände der Anlage Regler entworfen, die den vollautomatischen Betrieb ermöglichen. Die entwickelten Regler basieren dabei auf der Linearisierungsmethode in Verbindung mit einer Kompensation gewisser Nichtlinearitäten. So wurde zum Beispiel zur Regelung des Pegelstandes im Wasserschloss Obere Sill ein Pegelregler erstellt, der aus einem linearen optimalen  $L_2$ -Regler und einer prädiktiven Störgrößenaufschaltung besteht. Neben diesen Reglern musste eine auf Zustandsautomaten basierende Steuerung entworfen werden, mit deren Hilfe die Reglerumschaltungen und die notwendigen Verriegelungen beim Übergang zwischen den einzelnen Betriebszuständen durchgeführt werden können.

Der Regler enthält neben den verschiedenen Pegelreglern und der Steuerung auch einen Zustandsbeobachter für die gesamte Anlage. Simulationsstudien, die durch Messergebnisse abgesichert sind, zeigen die Funktionstüchtigkeit des vorgeschlagenen Regelungskonzeptes.

## Literatur

- [1] M. Meusburger, A. Kugi, K. Schlacher and A. Sillaber, Modeling and Control of a Special Type of Open Channel Flow, in *Computational Fluid Dynamics '98, Athens*, Part I, Vol. 1, 292–297, John Wiley & Sons Ltd., 1998.

# Einsatz von Qualitativen Modellen für eine rechnergestützte Sicherheitsanalyse von Automatisierungssystemen

U. Biegert

Institut für Automatisierungs- und Softwaretechnik  
Universität Stuttgart  
Pfaffenwaldring 47, 70550 Stuttgart  
Tel.: +49-711-7321  
Fax: +49-711-7302  
Email: [biegert@ias.uni-stuttgart.de](mailto:biegert@ias.uni-stuttgart.de)

**Schlüsselwörter:** Sicherheitsanalyse, Sicherheit, Automatisierungssysteme, qualitative Modellierung

Mehr und mehr wird erkannt, dass für die Sicherheitsanalyse von software-gesteuerten Systemen, eine ganzheitliche Betrachtungsweise erforderlich ist. Im Zeitalter der Informationstechnik übernimmt die Software in sicherheitskritischen Anwendungen, wie bei verfahrenstechnischen Anlagen, Medizin- und Verkehrstechnik, zunehmend Verantwortung für das Wohl von Mensch und Umwelt. Gleichzeitig steigt der Umfang und die Komplexität solcher Systeme stark an. Fehler der Software können den technischen Prozess mit unvorhersehbaren Folgen beeinflussen. Defekte von technischen Elementen können auf ähnliche Weise das reguläre Verhalten des Steuerungsprogramms beeinträchtigen. Falsche menschliche Bedieneingriffe wirken sich direkt oder indirekt über die Steuerungssoftware auf den technischen Prozess aus. Wie viele Katastrophen zeigen, basieren schwere Unfälle in der Tat nicht nur auf Einzelfehlern, sondern hauptsächlich auf Kombinationen von Fehlern (Mehrfachfehlern) [1]. Die Auswirkungen von Mehrfachfehlern auf das Systemverhalten sind mit herkömmlichen Methoden nicht vollständig erfassbar. Viele konventionelle Methoden sind im wesentlichen Anleitungen zu einem strukturiertem Vorgehen zum Aufspüren von Sicherheitslücken. Die eigentliche Analyse findet dabei im Kopf der Experten statt („Brainstorming“) und ist demzufolge abhängig von deren Erfahrung, Kenntnisstand und Systemverständnis. Komplexe Wechselbeziehungen zwischen Systemkomponenten führen die Experten nicht selten an die Grenzen ihrer Fähigkeiten.

Für die Entwicklung sicherer Systeme sind neue Methoden notwendig, bei denen nicht nur Teile eines Automatisierungssystems betrachtet werden. In diesem Beitrag wird anhand eines Beispiels gezeigt, wie auf der Basis eines qualitativen Modells alle Bestandteile eines Automatisierungssystems beschrieben werden können. Hierzu wird die Methode *SQMA* (Situationsbasierte Qualitative Modellbildung und Analyse) eingesetzt [2]. Bei *SQMA* handelt es sich um eine komponentenorientierte Modellierung. Alle Komponenten eines Systems werden unabhängig von ihrer späteren Funktion qualitativ beschrieben. Dabei werden Wertebereiche von wichtigen Prozess- und Informationsgrößen mit Hilfe von Intervallvariablen gebildet. Bestimmte Wertebereiche können klassifiziert werden; z.B. kann das Intervall [50bar, 70bar] eines Drucks als „nicht bestimmungsgemäß“ und mit einem Kommentar „Überdruck“ gekennzeichnet werden. Anhand der Systemstruktur werden die Wechselwirkung der einzelnen Systembestandteile untereinander und damit das Systemverhalten berechnet. Es können die Auswirkungen von beliebig vielen Fehlern auf das Gesamtsystem analysiert werden. Der Rechner entlastet den Experten bei der Durchführung

der Analyse, indem er die Fleißarbeit, das kombinatorische Denken, übernimmt. Im Rahmen des Beitrags wird ebenfalls eine rechnergestützte Analyse anhand eines kleinen Automatisierungssystems vorgestellt.

### **Literatur:**

- [1] Leveson, Nancy G.: *SAFWARE - System Safety and Computers*, 1. Aufl., Addison-Wesley 1995
- [2] Lauber, R.; Göhner, P.: *Prozessautomatisierung I*, 3. Aufl., Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 1999
- [3] Huber, Burgbacher, Biegert, Billmann, *Qualitative Systemanalyse und computergestützte Gefahrenidentifikation (HAZOP)*, Chemie Ingenieur Technik, S.992, 7/97

# Modellierung und Regelung beim Antrieb und Wickeln von elastischen Stoffbahnen

Dr.-Ing. Dominique Knittel , Prof. Dr.-Ing. Eric Ostertag  
Groupe de Recherche en Automatique et Vision Robotique (LSIIT/GRAViR)  
Université Louis Pasteur, ENSPS, Bld Sébastien Brant  
F-67400 Illkirch

**Schlüsselwörter :** Transport und Wickeln, viskoelastische Stoffbahn, Modellierung, Identifikation, robuste Mehrgrößenregelung, dezentrale Regelung

## Kurzfassung

Bei der Herstellung oder Verarbeitung von Papier, Kunststoff, Textilien oder Metall werden kontinuierliche Fertigungsanlagen eingesetzt. Charakteristisch ist eine durchlaufende Stoffbahn, die sämtliche Antriebe der Anlage miteinander verkoppelt. Industrieanlagen bestehen aus Abwicklern, Aufwicklern, Leitantrieben, Folgeantrieben, Speichersystemen, um zahlreiche Bearbeitungsschritte wie z. B. Beschichten, Schneiden, u.s.w. durchführen zu können. Der Leitantrieb mit überlagertem Drehzahlregler gibt der Stoffbahn die gewünschte Geschwindigkeit. Die Folgeantrieben dienen dem Transport und dem Erzeugen der gewünschten Spannung der Stoffbahn. Um einen einwandfreien Transport und Wickeln zu erreichen, müssen die Bahnkräfte innerhalb enger Grenzen geregelt werden. Durch die Kopplung der Antriebe über die Stoffbahn entsteht ein Mehrgrößenregelsystem.

Es werden verschiedene existierende Modellansätze für eine kontinuierliche Fertigungsanlage vorgestellt. Eine Erweiterung dieser Modelle wird an ein industrielles kunststoffbeförderndes Speichersystem angepasst. Somit konnten Spannungsschwankungen beschrieben und mit neuen Regelungsansätzen verringert werden [Koç98] [Koç99b].

Gegenstand derzeitiger Forschungsaktivitäten sind robuste Mehrgrößenregelungen an einem Labormodell für Ab/Aufwickelsysteme für viskoelastische Stoffbahnen:  $H_\infty$  Entwurfungsverfahren werden mit dezentralen Regelungen verglichen [Koç99a]. Die Spannungssollwerte werden durch Optimierung von einem erstellten inneren Spannungsmodell abgeleitet [Bou99].

## Literatur

- [Bou99] Boutaous M., Knittel D. : *Paramètres influençant la qualité de l'enroulement des matériaux flexibles*, 14ème Congrès Français de Mécanique, Toulouse, 1999
- [Bra73] Brandenburg, G. : *Ein mathematisches Modell für eine durchlaufende elastische Stoffbahn in einem System angetriebener, umschlungener, Walzen* - Part 1, 2, 3 Regelungstechnik und Prozess-Datenverarbeitung vol. 3, 1973
- [Koç98] Koç H., Knittel D., Gauthier C. , Abba G., Ostertag E. : *Modeling and identification of an industrial accumulator in an elastic web transport system*. Cesa'98 IMACS-IEEE Multiconference, Symposium on Industrial and Manufacturing Systems, Tunisia, April 1-4, 1998
- [Koç99a] Koç H., Knittel D., de Mathelin M., Abba G. : *Modélisation et commande de systèmes de transport de bande*, JDA'99, Nancy, septembre 1999
- [Koç99b] Koç, H., Knittel, D., de Mathelin, M., Gauthier, C., Abba, G., Ostertag, E. : *Modeling and control of an industrial accumulator in a web transport system*, European Control Conference ECC'99, Sept. 1999

- [Par92] Parant, F., Coeffier, C., Iung, C. : *Modeling of web tension in a continuous annealing line*, Iron and Steel Engineer, November 1992, pp. 46-49
- [Rei92] Reid, K.N., Shin, K.H., Lin, K.C. : *Variable-gain control of longitudinal tension in a web transport system*, AMD, Web Handling, ASME 1992, pp. 87-100
- [Wof95] Wolfermann, W. : *Tension control of webs - a review of the problems and solutions in the present and future*, Proceed. IWEB3, Oklahoma, 1995, pp. 198-229

# Beobachterbasierte Meßfehlerdiagnose an einem aufgeladenen Verbrennungsmotor

Stefan Jakubek

*Institut für Maschinen- and Prozeßautomatisierung,  
Technische Universität Wien,  
Gußhausstr. 27-29, A-1040 Wien, Austria  
Telefon: +43-1-58801-328 11, Fax: +43-1-58801-32899  
email: jakubek@impa.tuwien.ac.at*

**Zusammenfassung:** Die ständige Erweiterung der Automatisierung, ihre Anwendung auf große und komplexe Anlagen und die damit verbundenen Sicherheitsanforderungen bewirken ein steigendes Interesse an erweiterten Techniken zur Fehlerdiagnose.

Modellbasierte Methoden zur Fehlerdiagnose wurden vor allem in den letzten zwei Jahrzehnten permanent weiterentwickelt. Die Zielsetzung eines Fehlerdiagnosesystems ist, ein System über seine Eingänge und Ausgänge zu beobachten und sogenannte Residuensignale zu erzeugen, die eine Abweichung des Systemverhaltens anzeigen.

Diese Residuensignale sollen nicht nur anzeigen, daß ein Fehler aufgetreten ist (*Fehlerdetektion*), sondern auch Information darüber geben, wo dieser Fehler aufgetreten ist (*Fehlerisolierung*), und wie groß dieser ist (*Fehleridentifikation*). Zu guter Letzt sollen die Residuensignale auch möglichst schnell ansprechen, wenn ein Fehler aufgetreten ist.

Um maximale Betriebssicherheit zu garantieren, müssen entsprechende Maßnahmen getroffen werden, wenn Fehler detektiert werden. Einerseits können Prozeßfehler wie Lecks bewirken, daß eine Anlage in einen unkontrollierten Zustand gerät, andererseits führen Meßfehler zu falschen Reglerinputs, was zu ähnlichen Problemen führt. Speziell in sicherheitskritischen Anlagen hat man nur wenig Zeit, um richtig zu reagieren, was die Suche nach schnellen und zuverlässigen Fehlerdiagnosesystemen rechtfertigt.

In der vorliegenden Arbeit wird das Prinzip der beobachterbasierten Fehlerdiagnose angewendet, um Meßfehler in einem turboaufgeladenen Großgasmotor zu detektieren.

In der beobachterbasierten Fehlerdiagnose wird typischerweise ein Beobachter bzw. Kalmanfilter, basierend auf einem quantitativen Modell der Anlage eingesetzt, um die tatsächlichen Messungen zu rekonstruieren. Treten Abweichungen auf, so ist ein Fehler aufgetreten. Um Meßfehler nur zu *detektieren* ist dieses Prinzip bereits ausreichend, wogegen für die *Isolation* und *Identifikation* der Fehler strukturierte Residuensignale generiert werden müssen. Bisher wurden diese durch sogenannte *dedicated observer schemes* (DOS) erzeugt.

Das DOS verwendet eine Beobachterbank, wobei jeder Beobachter auf nur einer einzigen Messung basiert. Solange diese Messung korrekt ist, wird der zugeordnete Beobachter korrekte Schätzungen aller Systemausgänge liefern. Ist die, dem Beobachter zugeordnete Messung falsch, so werden auch *alle* Schätzwerte des Beobachters abweichen, während jede andere fehlerhafte Messung nur *einen* abweichenden Schätzwert liefert. Verarbeitet man nun alle Beobachter-Schätzwerte, so ist eine Lokalisierung des oder der Fehler möglich.

Der Nachteil des DOS ist seine hohe Rechenanforderung. Speziell dann, wenn das mathematische Modell der Anlage komplex und nichtlinear ist, sind die Grenzen einer praktischen Realisierbarkeit bald erreicht.

In der vorliegenden Arbeit werden deshalb Wege aufgezeigt, wie man unter Benützung von nur einem Beobachter oder Kalmanfilter auch mehrfach gleichzeitig auftretende Meßfehler isolieren kann.

Es wird ein Beobachter ausgelegt, der auf *allen* vorhandenen Messungen basiert und Schätzwerte eben dieser Messungen ausgibt. Wenn ein Sensor fehlerhafte Werte produziert, dann werden normalerweise auch alle Schätzungen des Beobachters abweichen. Um nun auf einzelne Fehler rückschließen zu können, muß der Beobachter-Ausgangsfehler durch ein geeignetes Postfilter transformiert werden. Das Postfilter muß auch im Falle mehrerer gleichzeitig auftretender Fehler für korrekte Fehlerisolation und -identifikation sorgen.

Bis jetzt wurden dazu drei Möglichkeiten erarbeitet:

1. **Statische Filterung:** Der Beobachterfehler wird durch eine statische Filtermatrix in Residuensignale transformiert. Die Filtermatrix muß so gestaltet werden, daß die Meßfehler voneinander isoliert werden, und auch die Größe aufgetretener Offsets korrekt wiedergegeben wird. In bestimmten Fällen kann die Matrix noch hinsichtlich Rauschunterdrückung optimiert werden. Dies ist insbesondere dann wichtig, wenn wie im Falle des Gasmotors qualitativ sehr unterschiedliche Messungen verarbeitet werden. Nachteilig an der statischen Filterung ist, daß korrekte Fehlerisolation nur in „eingeschwungenen“ Zuständen gesichert werden kann. Während transients Übergänge kann es bei ungünstiger Gestaltung der Beobacherverstärkungsmatrix zu starkem Überschwingverhalten oder zu Allpaßverhalten kommen.
2. **Paritätsfilterung:** Das Paritätsfilter bedient sich sogenannter Paritätsrelationen. Das Paritätsprinzip stellt eigentlich einen selbstständiger Ansatz zur Fehlerdetektion dar. Meß- oder Systemfehler werden durch Verarbeitung der Systemeingänge und Ausgänge in einen sogenannten Paritätsraum abgebildet. Durch Projektion auf geeignete Paritätsvektoren ist Fehlerisolation möglich. Dieses Verfahren wurde abgewandelt, um den Beobachteraussgangsfehler optimal auf Residuensignale abzubilden. Ein Optimierungsverfahren legt Paritätsvektoren derart fest, daß auch während transients Vorgänge perfekte Fehlerisolation gewährleistet ist. Weiters kann man durch Wahl der Filterordnung die Rauschempfindlichkeit steuern.
3. **Systeminversion:** Nach Auslegung eines Beobachters oder Kalmanfilters läßt sich das Verhalten zwischen aufgetretenen Fehlern und resultierenden Beobachteraussgangsfehlern durch ein entsprechendes dynamisches System beschreiben. Invertiert man nun dieses System, so erhält man formal ein Filter, das die aufgetretenen Beobachterfehler direkt und ohne Zeitverzögerung auf die verursachenden Meßfehler abbildet. Dieser, an sich idealen Lösung stehen folgende Probleme gegenüber:
  - Die Residuensignale sind aufgrund der Schnelligkeit des Filters üblicherweise auch sehr rauschempfindlich
  - Je nach Konfiguration ergibt die Systeminversion nicht unbedingt ein stabiles Filter. Die entsprechenden Gleichungen konnten noch nicht analytisch gelöst werden, sodaß keine strenge Aussage über dieses Problem gemacht werden kann. An der zu untersuchenden Anlage, die auch Allpaßverhalten aufweist, konnte jedoch festgestellt werden, daß die Auslegung des Beobachters mitverantwortlich ist für die Stabilität des Postfilters. Mithilfe *genetischer Optimierungsalgorithmen* konnten bei simultaner Optimierung des Beobachters und des Postfilters gute Resultate erzielt werden.

Alle oben genannten Ansätze wurden mit Meßdaten des Großgasmotors ausgelegt, erprobt und auf ihre Anwendbarkeit hin untersucht.

# Evaluierung und Selektion von Regelungsstrategien für komplexe verfahrenstechnische Anlagen

Dipl.-Ing. Bernd Mahn \*

Prof. Dr.-Ing. Gunter Reinig \*\*

\*Lehrstuhl für Regelungssysteme und Steuerungstechnik

\*\* Lehrstuhl für Regelungssysteme und Steuerungstechnik

Ruhr-Universität Bochum

Ruhr-Universität Bochum

Universitätsstraße 150, 44801 Bochum

Universitätsstraße 150, 44801 Bochum

Tel.: +49(0)234/32-26348

Tel.: +49(0)234/32-24060

Fax: +49(0)234/32-14155

Fax: +49(0)234/32-14155

Email: Mahn@RuS.Ruhr-Uni-Bochum.de

Email: Reinig@RuS.Ruhr-Uni-Bochum.de

**Schlüsselwörter:** Benchmark, Evaluierung, Mehrgrößenregelung, Verfahrenstechnik

Der Einsatz von Mehrgrößenregelungen ist für einen effektiven und sicheren Betrieb verschiedenster verfahrenstechnischer Anlagen erforderlich: von der Erdöldestillation bis zur kleinsten Abwasseraufbereitungsanlage. In den letzten Jahren wurden in Kooperation von Regelungstheorie und Informatik eine Reihe neuer Konzepte für derartige Regelungen entwickelt. Die beachtliche Vielzahl von entstandenen Regelungsstrategien (zu nennen sind z.B. Zustandsrückführung mit Beobachter, Modellprädiktive Regler, Fuzzy-Regler oder Entkopplungsnetzwerke) erschwert es dem Anwender, eine geeignete Auswahl zu treffen [1]. Daher wurde der Vergleich und die Bewertung dieser Strategien unter praxisnahen Bedingungen und nach praxisrelevanten Kriterien als Thema für diese Arbeit aufgegriffen.

Die untersuchten Strategien finden hauptsächlich bei komplexen verfahrenstechnischen Anlagen Anwendung. Dabei werden lediglich Regelungen für kontinuierliche Prozesse mit bereits funktionierender Basisautomation berücksichtigt. Auf Batchprozesse und eine betriebswirtschaftliche Optimierung wird hier nicht näher eingegangen, da nicht alle Strategien dafür geeignet sind. Folgende Bewertungsaspekte dienen der umfangreichen Evaluierung:

- Das Reglerverhalten wird durch etablierte Bewertungskriterien wie Integral Absolut Error (IAE), Integral Square Error (ISE) und Übergangsverhalten evaluiert. Zusätzlich werden Bewertungskriterien angewandt, die neben der Regelabweichung noch die Stellgrößenaktivitäten berücksichtigen [2].
- Die Robustheit wird durch Simulationen mit angenommenen Unsicherheiten in den Prozeßeigenschaften wie Totzeit und Verstärkung untersucht. Zum Vergleich der Regler dient die maximale zulässige Unsicherheit, welche die Anlage inklusive Regler bei vorab definierten Störungen und Arbeitspunktänderungen an die Stabilitätsgrenze bringt. Außerdem wird die Toleranz der Regelungsstrategie bezüglich defekter Meß- und Stellglieder überprüft [3].
- Da der Aufwand der Reglerimplementierung sowohl von der Anzahl der einzustellenden Tuning-Parameter als auch von der Komplexität bzw. dem Vorhandensein von Einstellvorschriften abhängt, werden diese bei der Bewertung einbezogen. Des Weiteren wird die Einbindung einschließlich deren Unterstützung in vorhandene geräte- und anwendungstechnische Lösungen berücksichtigt, weil einige Regelungsstrategien im Leitsystem selbst, andere aufbauend auf dem Prozeßleitsystem implementiert werden.
- Der Aufwand für die Modellgewinnung wird in dieser Arbeit als weiteres Kriterium herangezogen, da nicht nur lineare sondern auch nichtlineare Regelungen eingesetzt werden sollen. Neben der Art des Modells werden die zur Verfügung stehenden Tools zur Modellgewinnung mit berücksichtigt [4].

- Schließlich stellt die Bedienungsfreundlichkeit der Regelung einen wichtigen Faktor dar, weil sie insbesondere die Akzeptanz beeinflusst. Sie wird unter anderem bestimmt durch nachvollziehbare Regelungsaktivitäten sowie die Möglichkeit, den Regler im Teilbetrieb zu betreiben und stoßfrei anzufahren.

Zur Bewertung dieser und eventuell weiterer Kriterien unter praxisnahen Bedingungen wurde eine Workbench entwickelt, die unterschiedliche nichtlineare rigorose dynamische Prozeßmodelle enthält. Diese Modelle sind mit einem Prozeßleitsystem verbunden, das die Plattform für die jeweilige Reglerimplementierung darstellt.

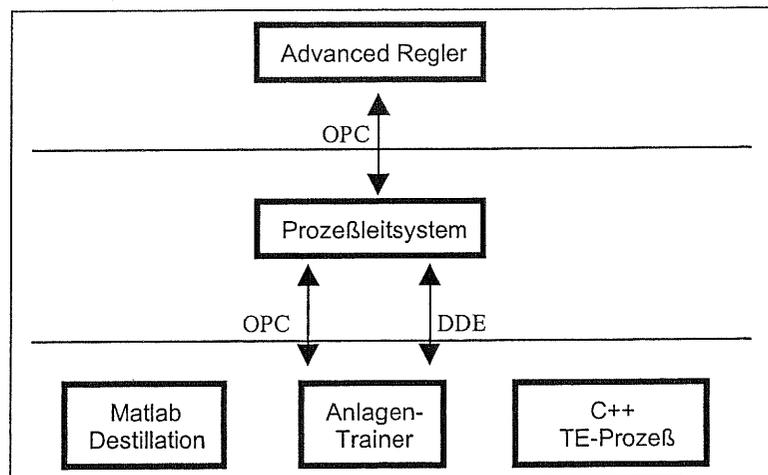


Abbildung 1: Struktur der Workbench

Die zuvor genannten Evaluierungskriterien sollen für unterschiedliche, auch kommerzielle Regler angewendet werden, wobei zunächst beispielhaft eine binäre Destillationskolonne als Prozeßmodell verwendet wird. Erste Ergebnisse werden auf der Tagung vorgestellt.

Die Folien zum Vortrag können unter <http://www.rus.ruhr-uni-bochum.de/Reglereval.htm> heruntergeladen werden.

### Literatur:

- [1] Seborg, D.E.: A Perspective on Advanced Strategies for Process Control, In: Frank, P.M.: Advances in Control: Highlights of the ECC'99, pp. 102-134, Springer 1999, ISBN 1-85233-122-4
- [2] Subawalla, H.; Paruchuri, V.P.; Gupta, A.; Pandit, H.G.; Rhinehart, R.R.: -Comparison of Model-Based and Conventional Control: A Summary of Experimental Results-Ind. Eng. Chem. Res. vol. 35, no. 10, pp. 3547-3559, 1996.
- [3] Shinsky; F.G.: Process Control Systems Application, Design and Adjustment-Book: McGraw-Hill, 1990.
- [4] Joshi, N.V.; Murugan, P.; Rhinehart, R.R.: Experimental Comparison of Control Strategies, Control Eng. Practice, vol. 5, no. 7, pp. 885-896, 1997.

# Objektorientierte Modellierung von Wissen zur Inbetriebnahme und Diagnose von Feldbusgeräten

R. Bachmann\*, P. Rieger\*\*

Institut für Automatisierungstechnik  
Technische Universität Dresden  
Mommsenstraße 13, 01062 Dresden  
Tel.: +49/351/3439  
Fax: +49/351/7039

\*Email: bachmann@eatns1.et.tu-dresden.de

\*\*Email: rieger@eatns1.et.tu-dresden.de

**Schlüsselwörter:** Objektorientierung, Wissensbasierte Systeme, Expertensysteme, Diagnose

Stetig komplexer werdende Geräte und Anlagen, die stark steigende Anzahl von Prozeßvariablen und Parametern, die Heterogenität der heutigen Feldbuslandschaft und ein unterschiedliches Wissensniveau bei Anwendern führen zu zahlreichen Problemen bei der Inbetriebnahme und Fehlerdiagnose von Feldbusgeräten. Deshalb ist eine geeignete nutzerdifferenzierte Unterstützung der Anwender von kommunikationsfähigen Automatisierungsgeräten notwendig. Diese Unterstützung bei der Lösung von Problemen der Inbetriebnahme und Fehlerdiagnose soll durch die Integration eines wissensbasierten Systems in ein entsprechendes Inbetriebnahmewerkzeug erreicht werden.

Bild 1 zeigt die Struktur eines derartigen Werkzeuges im Zusammenhang mit einer Feldbusanlage [1]. Dieses Werkzeug kann flexibel an sich ändernde Geräteeigenschaften, Besonderheiten einer speziellen Automatisierungsanlage, verschiedenste Kommunikationssysteme und die sich daraus ergebenden spezifischen Inbetriebnahme- und Diagnoseaufgaben angepaßt werden. Die Verwendung eines einheitlichen Applikationsinterfaces ermöglicht die Kopplung an die verschiedenen Kommunikationssysteme [2]. Zusatztools für Streckenidentifikation oder Reglerentwurf können später in das Gesamtsystem eingebunden werden. Eine Datenbankanbindung dient dazu, durch explizite Anforderung - oder selektiv ausgelöst durch eine Schlußfolgerung des wissensbasierten Systems - auf Zusatzinformationen wie Datenblätter, Betriebsanleitungen oder Bestelldaten zugreifen zu können. Als wichtigste Komponente des Gesamtsystems fungiert eine kommerziell verfügbare Expertensystemshell, die grundlegende Mittel zur Akquisition und Nutzung von Wissen bereitstellt. Eine Besonderheit dieser Expertensystemshell ist deren Teilung in ein Entwicklungssystem und eine als ActiveX-Control

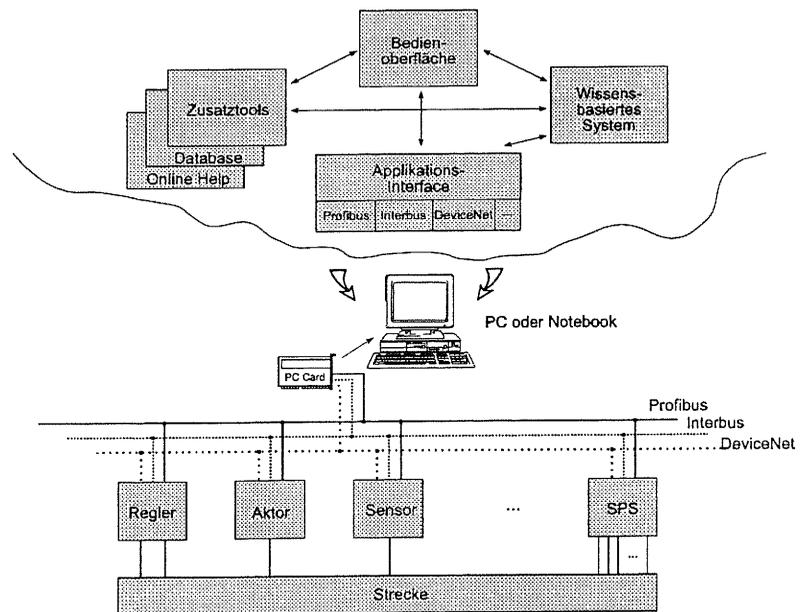


Bild 1: Inbetriebnahme- und Diagnosesystem

Als wichtigste Komponente des Gesamtsystems fungiert eine kommerziell verfügbare Expertensystemshell, die grundlegende Mittel zur Akquisition und Nutzung von Wissen bereitstellt. Eine Besonderheit dieser Expertensystemshell ist deren Teilung in ein Entwicklungssystem und eine als ActiveX-Control

verfügbare Laufzeitkomponente. Durch diese Teilung läßt sich die Laufzeitkomponente gut in eigene Software integrieren und durch diese steuern.

In der Praxis sammelt sich das Wissen über Problembhebungen bei der Inbetriebnahme bzw. Fehlerdiagnose meist bei verschiedenen Experten an. Diese können es aufgrund von Zeitmangel und fehlenden geeigneten Werkzeugen oft nur unzureichend oder in einer schlecht wiederverwendbaren Form aufbereiten. Es ist eine schwierige und aufwendige Aufgabe aus dem in dieser Form vorliegenden menschlichen Expertenwissen gut wartbare und für andere Geräte oder Systeme wiederverwendbare Wissensbasen zu entwickeln. Eine wichtige Voraussetzung für eine effiziente Wissensakquisition ist deshalb die Verfügbarkeit einer verständlichen, möglichst weit verbreiteten Entwurfs- und Beschreibungsmethodik. Aufgrund ihrer guten Eignung und Verbreitung bietet sich die Verwendung objektorientierter Methoden an. Bild 2 zeigt, welche grundsätzlichen Parallelen zwischen einem objektorientierten System-

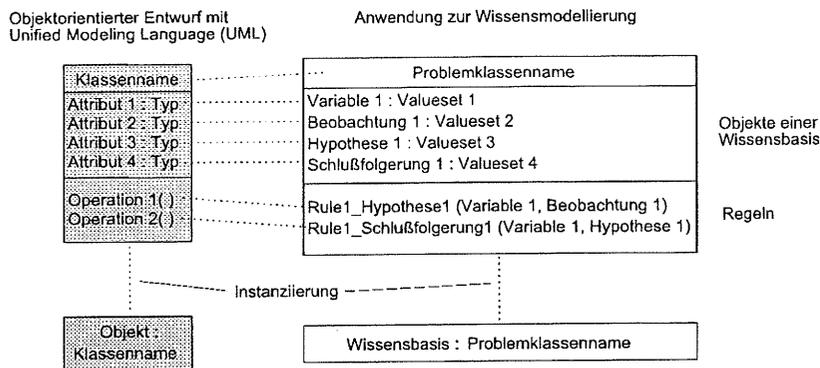


Bild 2: Verwendung objektorientierter Entwurfsmethoden

bzw. Softwareentwurf und einer Wissensmodellierung gezogen werden können. Links im Bild ist die übliche Darstellung einer Klasse mit Notationsmitteln der Unified Modeling Language (UML) zu finden. Attribute und Operationen der zu einer bestimmten Klasse gehörigen Objekte lassen sich auf diese Weise sinnvoll beschreiben. Die Entsprechung zum Objekt bildet bei der Wissensmodellierung die Wissensbasis, die nötige Daten und Regeln zur Lösung eines bestimmten Problems bzw. eines Problemkomplexes umfaßt. Wissensbasen können also auch einer bestimmten Klasse angehören – der jeweiligen Problemklasse. Die Attribute einer Problemklasse können geräteinterne oder Kommunikations-Variablen, Beobachtungen, Hypothesen sowie Schlußfolgerungen sein. Die nötigen Regeln zur Aufstellung von Hypothesen und Ableitung von Schlußfolgerungen können den Operationen gleichgesetzt werden. Mit den objektorientierten Modellierungsaspekten Vererbung, Assoziation und Aggregation lassen sich gut strukturierte Problemklassenhierarchien aufbauen. Hierbei ist entscheidend, daß sich für ein bestimmtes Anwendungsgebiet, wie die Feldebustechnik, eine Reihe von Basisproblemklassen definieren läßt, die eine Erstellung und Wartung von Wissensbasen für die Inbetriebnahme und Diagnose spezieller Feldbusgeräte in ihrem automatisierungstechnischen Umfeld erheblich vereinfacht. Weitere Gesichtspunkte wie inhaltliche Aspekte der Basisproblemklassen, die in die Gesamtgeräteentwicklung integrierbare Erstellung der Problemklassenhierarchie für ein konkretes Feldbusgerät sowie Problemstellungen der Fehlerdiagnose bei dynamischen Vorgängen werden im Vortrag erläutert.

## Literatur:

- [1] Bachmann, R.; Rieger, P.: An Object-Oriented Knowledge-Based System for Intelligent Start-Up and Diagnosis of Fieldbus Devices. Conference Proceedings, European Control Conference 1999, Karlsruhe.
- [2] Simon, R.: Kopplung eines PC-basierten Expertensystems an Feldbus-Netzwerke. Diplomarbeit, TU Dresden, 1999.

# Phänomenologische Analyse von Raumheizsystemen mittels objektorientierter Modellbildung und Simulation

Dipl.-Ing. M. Frigge

Fachgebiet Regelungstechnik  
(Prof. Dr.-Ing. F. Dörrscheidt)  
Universität Paderborn  
Pohlweg 47-49, 33098 Paderborn  
Tel.: +49/5251/60-3004  
Fax: +49/5251/60-3432  
Email: mf@irving.uni-paderborn.de

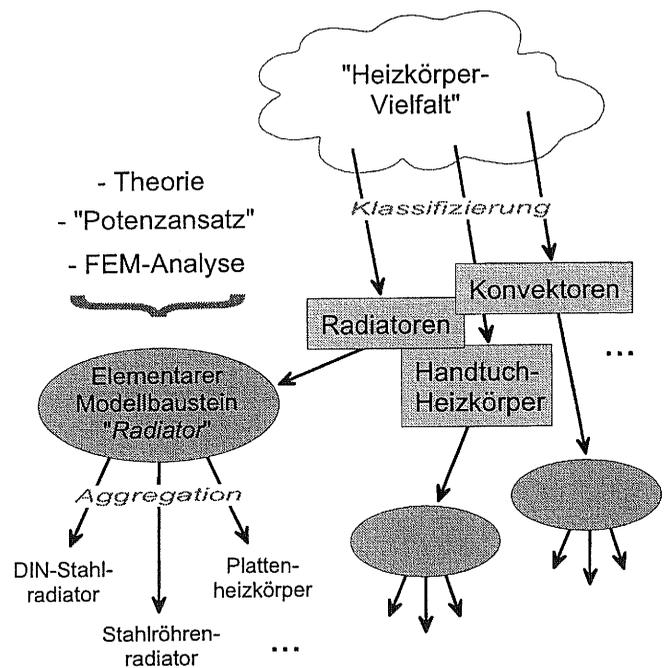
**Schlüsselwörter:** Modellbildung, Simulation, Objektorientierung, Heizungstechnik

Als Grundlage einer gerechten Aufteilung der Energiekosten beim Betrieb einer Heizungsanlage ist man daran interessiert, die von allen versorgten Nutzereinheiten verbrauchten Wärmemengen möglichst exakt zu ermitteln. Für den dazu notwendigen Einsatz von Heizkostenverteilern an Raumheizkörpern müssen bestimmte Bewertungsfaktoren bekannt sein, deren messtechnische Ermittlung in der Regel mit hohen Kosten verbunden ist. Im Rahmen einer Industriekooperation ist die Idee entstanden, die Zielgrößen anstelle der aufwendigen Messung durch eine zeit- und kostengünstige Simulation zu ermitteln. Die Lösung dieser Aufgabe erfordert ein hinreichend genaues mathematisches Modell der am Messvorgang beteiligten Komponenten.

Der Schwerpunkt der Arbeit liegt auf der Nachbildung des Subsystems „Raumheizkörper“. Einerseits gibt es einfache Modelle, welche auf dem in der Heizungstechnik bekannten Potenzansatz [1] basieren. Diese bilden das System Heizkörper jedoch nur als Gesamtheit ab, so dass für die Aufgabenstellung benötigte Zwischengrößen (wie z.B. Temperaturprofile) fehlen. Andererseits wäre eine detaillierte Analyse durch den Einsatz von CFD-Werkzeugen denkbar. Aufgrund der Vielfalt existierender und damit für die Problemstellung interessierender Heizkörper scheidet dieser Weg jedoch ebenfalls aus.

Die Lösung erfordert einen neuen Modellansatz, der eine einfache Berücksichtigung der zahlreichen verschiedenen Heizkörperarten ermöglicht. Zunächst

werden durch eine geeignete Klassifizierung verwandte Heizkörperarten in Gruppen zusammengefasst, wodurch sich die Gesamtzahl an benötigten Modellansätzen reduziert (s. Abbildung). Die gewonnenen Erkenntnisse aus einer theoretischen Analyse der bei der Wärmeübertragung beteiligten Phänomene sowie aus zusätzlichen detaillierten CFD-



Struktur der Modellbildung

Simulationen werden dazu genutzt, um auf der Basis des bekannten Potenzansatzes adäquate Ersatzmodelle für jede abstrahierte Heizkörperklasse abzuleiten.

Für die Realisierung des Klassenkonzepts eignet sich in besonders das am Fachgebiet Regelungstechnik entwickelte objektorientierte Modellierungswerkzeug *CAMex* (Computer Aided Modeling for *experimental Design*) [2]. Die Strukturierungsmethoden durch Abstraktion bilden zusammen mit der Vorgehensweise der Klassenbildung sowie speziellen Vererbungsmechanismen die Basis der Objektorientierung. Durch hierarchische Zerlegung des Prozesses in seine Subsysteme (substantielle Abstraktion) und anschließende Betrachtung der physikalischen Phänomene (phänomenologische Abstraktion) werden auf einer Ebene hoher Modularität und niedriger Abstraktion elementare Modellbausteine definiert, die entsprechend der Topologie zum Gesamtmodell aggregiert werden. Auf diese Weise lassen sich aus wenigen elementaren Modellbausteinen jeder Heizkörperklasse eine Vielzahl an Heizkörpern der betreffenden Klasse schnell und einfach rechnergestützt generieren.

## Literatur:

- [1] Esdorn, H.; Külpmann, R.; Mügge, G.: *Modellierung von Heizflächen*. Rechnergestützte Untersuchung des instationären Betriebsverhaltens von Wärmeversorgungen. Fachbericht der TU Berlin, 1990.
- [2] Panreck, K.: „Modellierungstool CAMex“. at – *Automatisierungstechnik* 46 (1998), S. 40-41.

# Kraftregelung eines haptischen Displays zur kinästhetischen Interaktion mit virtuellen und realen entfernten Umgebungen

J. Hoogen

Lehrstuhl für Steuerungs- und Regelungstechnik (LSR)  
Technische Universität München  
80290 München  
Tel.: +49/89/289 234 34, Fax: +49/89/289 283 40  
Email: jens.hoogen@ei.tum.de

**Schlüsselwörter:** Kinästhetik, Haptik, Haptisches Display, Kraftregelung

Als haptisches Display oder Eingabegerät werden mechatronische Systeme bezeichnet, über die ein Bediener mit einer virtuellen oder realen entfernten Umgebung kinästhetisch interagieren kann. Das bedeutet, der Bediener kann mit Kraft-/Bewegungswahrnehmung und -ausübung die Umgebung sowohl erfühlen als auch intuitiv manipulieren. Der Informations- und Energiefluß ist hier im Gegensatz zu anderen menschlichen Sinnen bidirektional.

Anwendungsfelder für haptische Displays reichen vom industriellen CAD Design und virtuellen Prototyping über Chirurgen-Training in der Medizin bis hin zum Entertainmentbereich. Der Tastsinn des Menschen ist besonders dann wichtig, wenn die Sicht durch Verdeckung eingeschränkt wird, feinfühlig Montageaufgaben durchgeführt oder harte Objekte manipuliert werden sollen.

Ein haptisches Display hat u. a. die Aufgabe, die in einer Umgebung ertasteten mechanischen Impedanzen  $Z$ , hier definiert als Quotient aus Kraft und Bewegungsgeschwindigkeit, möglichst realitätsnah darzustellen. Die Herausforderung liegt darin, das haptische Display und die Regelung so zu entwerfen, daß auch Übergänge zwischen sehr kleinen Impedanzen, wie der Bewegung im freien Raum und sehr großen Impedanzen, z.B. bei Kontakt mit einer harten Wand, stabil und oszillationsfrei dargestellt werden können. In [2] wurde dazu der Begriff der  $Z$ -Width eingeführt, der die Bandbreite der Impedanzen angibt, die durch ein haptisches Display dargestellt werden können. Die Literatur unterscheidet zwischen zwei grundlegenden Typen von haptischen Displays [3]: *Impedanz Displays* sind Systeme mit geringer Trägheit, die die Operatorgeschwindigkeit messen und Kräfte erzeugen. Hierzu gehört beispielsweise das weitverbreitete PHANTOM [5]. Der zweite Typ, als *Admittanz Display* bezeichnet, besitzt in der Regel große Trägheit, ist mit einem Kraftsensor ausgestattet und positions- oder geschwindigkeitsgeregelt. Hier wird die Kraft gemessen und Bewegung erzeugt. Diese Eigenschaften finden sich besonders bei Displays auf der Basis von Industrierobotern [4].

Am LSR wurde ein haptisches Display [1] entwickelt, das sich aufgrund seiner Konstruktion und Regelung zwischen Impedanz- und Admittanz-Typ einordnen läßt: DeKiFeD3 kann in den drei kartesischen Raumrichtungen Kräfte bis zu 60N auf die Hand des Bedieners übertragen. Dazu wurde eine serielle Kinematik mit DC Motoren und Planetengetriebe in jedem Gelenk aufgebaut. Als Sensorik sind Winkelencoder auf den Motorachsen angebracht und ein Kraft-/Momentensensor, der die Kraft zwischen Hand

des Bedieners und DeKiFeD3 mehrachsig mißt. Mit dem Kraft-/Momentensensor und den über PWM-Verstärker stromgeregelten DC Motoren wird ein Kraftregelkreis geschlossen. Die kartesische Position  $w$  wird als Eingangsgröße für die angekoppelte Umgebung benutzt, so daß DeKiFeD3 von außen als Impedanz Typ angesehen werden kann, der durch starke Aktorik kombiniert mit der Kraftregelung jedoch auch die Fähigkeit des Admittanz-Typs zur Darstellung von großen Umgebungs-Impedanzen aufweist.

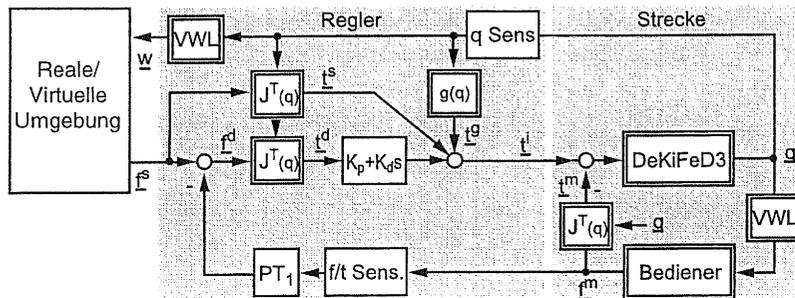


Abbildung 1: Systemarchitektur

festes oder lockeres Greifen des DeKiFeD3, erhalten bleibt. Dies wird u. a. durch Tiefpaß-Filterung des rückgeführten Kraftsignals  $f^m$  und einen PD-Regler mit Vorsteuerung erreicht (siehe Abbildung 1). Die kartesischen Kräfte  $f^d$  und  $f^s$  werden dabei über die transponierte Jacobi-Matrix  $J^T$  in die Gelenkmomente  $t^d$  und  $t^s$  transformiert.

Die mit dem DeKiFeD3 darstellbaren Impedanzen sind ausreichend, um dem Bediener einen realitätsnahen Eindruck vom Kontakt mit harten Wänden zu vermitteln oder, um etwa ein virtuelles Ping Pong Spiel zu realisieren. Darüberhinaus werden erste Ergebnisse präsentiert, die mit der zweiten Generation des DeKiFeD3 - dem DeKiFeD4 - gewonnen wurden. DeKiFeD4 besitzt einen vierten, rotatorischen Freiheitsgrad und alle Gelenke sind mit spielfreien Harmonic Drive Getrieben ausgestattet. Damit kann die Bandbreite des Systems deutlich erhöht und noch größere Impedanzen realisiert werden.

## Literatur

- [1] Baier H.; Buss M.; Freyberger F.; Hoogen J.; Kammermeier P.; Schmidt G.: Distributed PC-Based Haptic, Visual and Acoustic Telepresence System – Experiments in Virtual and Remote Environments, im Tagungsband der IEEE Virtual Reality '99 Conference, Houston, Texas, 118-125.
- [2] Colgate, J.E.; Brown, J.M: Factors Affecting the Z-Width of a Haptic Display, im Tagungsband der IEEE International Conference on Robotics and Automation 1994, San Diego, California, 3205-3210.
- [3] Adams, R.J.; Hannaford B.: A Two-Port Framework for the Design of Unconditionally Stable Haptic Interfaces, im Tagungsband der IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems 1998, Victoria, B.C., 1254-1259.
- [4] Clover, C.L.; Luecke, G.R.; Troy, J.J; McNeely, W.A. : Dynamic Simulation of Virtual Mechanisms with Haptic Feedback Using Industrial Robotics Equipment, im Tagungsband der IEEE International Conference on Robotics and Automation (1997), Albuquerque, New Mexico, 724-730.
- [5] Massie, T.H.; Salisbury, J.K.: The PHANToM Haptic Interface: A Device for Probing Virtual Objects, im Tagungsband des ASME Winter Annual Meeting, Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems 1994, Chicago.

# Ein Fertigungsleitsystem zur Optimierung der Ressourcendisposition für kleine und mittelständische Unternehmen

M. Baumann

Fraunhofer-Institut für Informations- und Datenverarbeitung IITB  
Fraunhoferstr. 1, 76131 Karlsruhe  
Tel.: +49/721/6091-374  
Fax: +49/721/6091-499  
Email: bau@iitb.fhg.de

**Schlüsselwörter:** Produktionsplanung und -steuerung, PPS, Fertigungssteuerung, Fertigungsleittechnik, Ressourcenbelegung, Maschinenbelegung

Zur Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit von kleinen und mittelständischen Unternehmen (KMUs) im produzierenden Gewerbe nimmt die kundenspezifische Fertigung kleiner Produktmengen und -stückzahlen ständig zu. In der Textilveredlung beispielsweise werden zunehmend kleinere Mengen eines Textils mit speziellem Dessin und Colorit in Eigen- oder Lohnveredlung hergestellt.

Die Produktionsabläufe in KMUs sind dadurch gekennzeichnet, daß Liefertermine, kurze Durchlaufzeiten und die produktivitätsgerechte Bündelung der Aufträge berücksichtigt werden müssen. In der Vergangenheit wurden zur Optimierung der von diversen technischen und organisatorischen Restriktionen geprägten Produktionsabläufe in KMUs sehr spezielle informationstechnisch gestützte Verfahren für die Ressourcendisposition realisiert.

Daraus resultieren Defizite bei der Anpassung, Übertragung und Verbesserung dieser Verfahren. Da Speziallösungen die Kosten deutlich in die Höhe treiben, fehlt den Unternehmen derzeit ein geeignetes Werkzeug zur Entscheidungsunterstützung bei der Optimierung der Ressourcendisposition. Dieses Werkzeug muß einerseits den ausgeprägten Restriktionen von KMUs Rechnung tragen und andererseits mit geringem Aufwand angepaßt werden können.

Zur Lösung dieser Problemstellung wurde am IITB ein flexibles Werkzeug zur Entscheidungsunterstützung des Disponenten bei der Ressourcenbelegung von Produktionsanlagen entwickelt. Dieses Werkzeug wurde vollkommen objektorientiert modelliert (vgl. [3, 4]), wodurch eine einfache Anpassung an unterschiedliche organisatorische und technologische Restriktionen erreicht werden kann. Aus den im konkreten Anwendungsfall relevanten Zielen, den Ressourcen und Vorgängen (bzw. Bearbeitungsschritten) und den Restriktionen ergibt sich ein spezielles Planungsproblem (vgl. [1]).

Um dieses Planungsproblem zu lösen, wurde eine Algorithmik entwickelt, mit der speziell Ressourcenbelegungsprobleme beherrscht werden können, die durch eine Vielzahl von Restriktionen gekennzeichnet sind. Da wären beispielsweise Beschränkungen der Variation von Parametern von einem Auftrag zum anderen, Konkurrenz um die Kapazität für Nebenarbeiten (Werkzeugmontage, Prüfvorgänge), reihenfolgeabhängige Umrüstvorgänge incl. der Nebenzeiten für Reinigungsarbeiten, maximale Zeitspannen zur Weiterverarbeitung

(vgl. [2, 5]), da das Produkt sonst erstarrt, verfärbt oder unerwünschte Reaktionen einsetzen, beschränkte Zwischenlagermöglichkeiten und die Verfügbarkeit von Hilfsstoffen.

Die entwickelte Algorithmik wurde an eine geeignete Benutzeroberfläche angebunden, die eine grafisch-interaktive Planung ermöglicht. Dieser Weg führt weg von den „Black-Box-Optimierungsalgorithmen“ hin zur stärkeren Interaktion des Disponenten und der rechnergestützten Planungshilfen. So kann ein Disponent seine Erfahrungen oder schwer abbildbares Wissen in einer effizienten, zielgerichteten Lösungssuche einbringen.

## **Literatur:**

- [1] Baumann, M. und Schroff, A.: Modellierung und Simulation ressourcenbeschränkter Fertigungsabläufe. in: Schnieder, E.: Entwurf komplexer Automatisierungssysteme, 4. Fachtagung, Braunschweig, 7. bis 9. Juni 1995, S. 263-276
- [2] Brinkmann, K. und Neumann, K.: Heuristic Procedures for Resource-Constrained Project Scheduling with Minimal and Maximal Time Lags: The Minimum Project-Duration Resource-Levelling Problems. Universität Karlsruhe, Technical Report WIOR-443, Institut für Wirtschaftstheorie und Operations Research, 1994
- [3] Fowler, M. und Scott, K.: UML Distilled – Applying the Standard Object Modeling Language. Addison Wesley, 1997
- [4] Gamma, E., Helm, R. Johnson, R. und Vlissides, J.: Entwurfsmuster: Elemente wiederverwendbarer objektorientierter Software. Bonn: Addison-Wesley, 1996
- [5] Neumann, K. und Zhan, J.: Heuristics for Resource-Constrained Project Scheduling with Minimal and Maximal Time Lags. in: Proceedings of the International Conference of Industrial Engineering and Production Management (IEPM), Mons 1993, S.561-575

# Implementierungsaspekte für die Realisierung eines mechatronischen Steer-by-Wire Systems

S. Feick \*

\* Lehrstuhl für Regelungstechnik und Signaltheorie  
Universität Kaiserslautern  
Erwin-Schrödinger-Straße, 67653 Kaiserslautern  
Tel.: +49/631/3552  
Fax: +49/631/4205  
Email: feick@e-technik.uni-kl.de

**Schlüsselwörter:** Steer-by-Wire, Mechatronik, Fehlertoleranz

Steer-by-wire-Systeme (SBW), bei denen die mechanische Verbindung zwischen Lenkrad und angelenkten Rädern eines Fahrzeugs durch ein Regelungssystem, bestehend aus Sensoren, Aktoren und Reglern ersetzt ist, versprechen Vorteile in vielerlei Hinsicht. Die Flexibilität und Adaptivität mechatronischer Systeme ermöglicht die Implementierung von Funktionen, die für konventionelle Lenkungssysteme undenkbar oder nur mit großem Aufwand zu realisieren sind. Ein wesentlicher Unterschied zu konventionellen, mechanischen Lenkungssystemen ist, dass eine Änderung der Systemeigenschaft in großem Bereich allein durch Änderung von Softwareparametern möglich ist, und dies sogar adaptiv während des Betriebs. SBW legt den Grundstein für die Implementierung neuartiger Fahrerassistenzsysteme und Komfortfunktionen. Eine Erhöhung des Lenkkomforts ist durch die Realisierung einer Kennfeldlenkung mit in weiten Bereichen frei wählbaren fahrgeschwindigkeits- und lenkwinkelabhängigen Parametern gegeben.

Was das Ersetzen der physikalischen Funktion eines mechanischen Systems durch ein mechatronisches anbetrifft, so ist dies mit relativ hohem Aufwand an Hard- und Software verbunden. Hierzu ist zunächst eine Lenkaktorik mit hoher Stellkraft zur Anlenkung der Räder notwendig, die Krafrückmeldung zum Fahrer vollzieht sich mit Hilfe eines mit dem Lenkrad verbundenen Force-Feedback-Aktors. Die Aktorpositionen sind mit hochauflösenden Lage-sensoren zu erfassen. Die hochdynamische Regelung der Aktoren geschieht durch Mikrorechner mit Peripherie.

Die erforderliche hohe Komplexität des elektronischen Systems bringt von Natur aus eine geringere Zuverlässigkeit mit sich. Der Fahrer erwartet aber von der mechatronischen Lenkung mindestens die gleiche Sicherheit, die er von dem konventionellen, mechanischen System her gewohnt ist. Die Implementierung einer mechanischen Rückfallebene stellt keine befriedigende Lösung für dieses Problem dar. Zum einen werden die Designvorteile hierdurch größtenteils hinfällig, zum anderen ist mit einer Beeinträchtigung des mechatronischen Lenk-systems zu rechnen. Nicht zuletzt verbietet der hohe Kostendruck dieses Vorgehen.

Das anzuwendende Prinzip für das Erreichen einer mit herkömmlichen Lenk-systemen vergleichbaren Zuverlässigkeit und Sicherheit ist die Fehlertoleranz, deren Grundlage die redundante [1] Auslegung der Aktoren, Sensoren und Mikrorechner ist. Damit ergibt sich zwangsläufig ein dezentrales System mit verteilten Komponenten. Der hieraus resultierende hohe Kommunikationsbedarf ist mit Hilfe eines fehlertoleranten Bussystems zu decken. Nicht zuletzt erfordert SBW ein fehlertolerantes Energieversorgungssystem.

Es gilt, die in der Praxis eingesetzten Fehlertoleranzverfahren auf den automobilen Anwendungsfall zuzuschneiden. Fehlertoleranz ist bei sicherheitsrelevanten Systemen in der Praxis durch die Anwendung zweier immer wiederkehrender Prinzipien realisiert. Zum einen ist dies die Umsetzung des Robustheitsansatzes, zum anderen ist dies das Rekonfigurationsprinzip. Die Aktoren des Systems sind in zweifacher, dynamisch heißer Redundanz zu betreiben. Heiße Redundanz ermöglicht die bestmögliche Ressourcennutzung. Im Gegensatz zu kalter Redundanz (Stand-by-Konzept) besteht nicht das Problem der Überwachung von nicht in Betrieb befindlichen Komponenten. Die Überwachung geschieht durch Einsatz analytischer oder physikalischer Redundanz [2]. Das selbstrekonfigurierbare [3] fehlertolerante Regelungssystem ist derart auszulegen, dass es mit einer möglichst geringen Anzahl von Sensoren auskommt.

Die Aussichten für einen breiten Einsatz von SBW in der Zukunft können durch zunehmende Zuverlässigkeit und höherer Leistungsfähigkeit der Elektronik bei gleichzeitigem Kostenschwund im Zuge einer Massenfertigung und Vorantreiben der Bemühungen um eine übergreifende Standardisierung für X-by-Wire-Systeme begünstigt werden.

### **Literatur:**

- [1] Cin, M. D.: Fehlertolerante Systeme, Teubner Studienbücher Informatik 1979
- [2] Isermann, R.: Überwachung und Fehlerdiagnose, Moderne Methoden und ihre Anwendung bei technischen Systemen, VDI-Verlag, 1994
- [3] Pradhan, D. K.: Fault-Tolerant Computer System Design, Prentice Hall PTR, New Jersey 1995

# Frequenzbereichs-Spezifikationen dargestellt durch Farbkodierung im Parameterraum

Dipl.-Ing. M. Muhler

Prof. Dr.-Ing. J. Ackermann

Institut für Systemdynamik und Robotik  
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.  
Oberpfaffenhofen, 82234 Wessling  
Tel.: +49/8153/282423, Fax: +49/8153/281847  
Email: Michael.Muhler@dlr.de, Juergen.Ackermann@dlr.de

**Schlüsselwörter:** Parameterraum, Farbkodierung, Frequenzbereichs-Spezifikationen

Mit dem Parameterraumverfahren steht ein bewährtes Werkzeug zur Robustheitsanalyse von Systemen mit physikalisch motivierten unsicheren Parametern und zur Synthese von robusten Regelungen zur Verfügung [1]. Insbesondere erlaubt dieses Verfahren die Betrachtung von Eigenwertkriterien. Kürzlich wurde die Erweiterung des Parameterraumverfahrens auf Frequenzbereichs-Spezifikationen, sowohl Ortskurvenkriterien als auch Sensitivitätsbedingungen, beschrieben [2, 3, 4].

Im Rahmen dieses Beitrags wird die Darstellung von Frequenzbereichs-Spezifikationen durch Farbkodierung vorgestellt. Übliche Kriterien, wie zum Beispiel die Stabilitätsreserve in der Nyquist-Ebene, liefern ein skalares Gütemass, das von unbekanntem System- und Regler-Parametern abhängt. Für die interaktive Analyse und Synthese werden Spezifikationen an den Regelkreis in eine Ebene des Parameterraums abgebildet. Die hier vorgestellte Methode bestimmt hierzu Gebiete in einer Parameterebene, die zu Gütemasswerten in vorgegebenen Intervallen führen. Durch Farbkodierung dieser Gebiete mit Hilfe einer intuitiven Farbpalette kann nicht nur die Einhaltung eines Gütemasswertes überprüft werden, sondern der Einfluß der Parameter auf die Spezifikationen wird ersichtlich. Eine Farbpalette mit Farbtönen von grün über gelb bis rot ähnlich einer Verkehrsampel erscheint besonders geeignet. Visualisierung von Gebieten mit geringen Gütemasswerten durch rote Farbtöne, bzw. grüne Farbtöne für Parametergebiete, in denen die Spezifikationen sehr gut eingehalten werden, machen die generierten Abbildungen sehr leicht interpretierbar. Alternativ kann eine Graustufen-Kodierung erfolgen, falls keine farbige Darstellung möglich ist.

Die Abbildung von Eigenwertkriterien wie z.B. Dämpfung ist in [1] eingehend beschrieben. Die daraus resultierenden Grenzen im Parameterraum können den farbkodierten Gütemassen aus dem Frequenzbereich überlagert werden. Abbildung 1 zeigt exemplarisch die Überlagerung von graustufenkodierten Frequenzbereichs-Spezifikationen und durch dicke Linien abgegrenzten Gebieten mit bestimmten Eigenwertkriterien. So ist im umrandeten Gebiet der Reglerparameter  $k_1, k_2$  gute Dämpfung gewährleistet, im weißen Gebiet ein genügender Abstand der Nyquist-Ortskurve vom kritischen Punkt  $-1$ .

Beim robusten Entwurf für mehrere repräsentative Betriebspunkte einer Familie von Regelstrecken werden Eigenwertkriterien an jeden

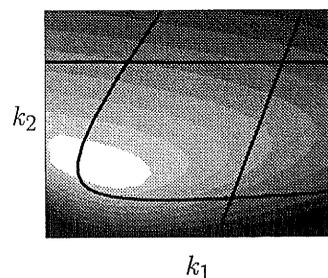


Abbildung 1: Graustufen-kodierte Frequenzbereichs-Spezifikationen.

Repräsentanten in eine Ebene freier Reglerparameter abgebildet. Die Schnittmenge der zulässigen Gebiete aller Repräsentanten ist die Menge der Reglerparameter, die zur simultanen Erfüllung der Eigenwertkriterien führt. Analog hierzu interessiert bei Frequenzbereichs-Spezifikationen der geringste Gütemasswert aller Repräsentanten. Dieser Wert ist relevant für die robuste Einhaltung der Spezifikationen. Bei der Visualisierung kommt deshalb eine *worst case* Farbkodierung zum Einsatz.

Die simultane Darstellung von Eigenwertkriterien und Frequenzbereichs-Spezifikationen erlaubt die Berücksichtigung von strukturierten und unstrukturierten Unsicherheiten, wie sie zum Beispiel bei flexiblen Grossraumflugzeugen auftreten, im Entwurfsprozess.

Entwurfsanforderungen wie Störunterdrückung, gutes Führungsverhalten oder Robustheit gegenüber unmodellierten hochfrequenten Systemanteilen lassen sich im Frequenzbereich durch Bedingungen an die Sensitivitätsfunktion  $S$  und komplementäre Sensitivitätsfunktion  $T$  ausdrücken. Bei der Abbildung von Spezifikationen an  $S$  und  $T$  bietet es sich an, Spezifikationen an  $S$  durch eine rot-grün Farbpalette darzustellen, während für  $T$  das komplementäre Spektrum von grün bis violett verwendet wird, wobei auch hier grün den guten Fall kennzeichnet. Beim Entwurf wird man nun versuchen, sowohl in der Abbildung von  $S$ , als auch in der Abbildung von  $T$  intuitiv nach grünen Farbtönen zu streben. Praktisch kann der Benutzer dabei durch einen Slave Cursor unterstützt werden, der gleichzeitig in beiden Abbildungen an Punkten mit identischen Parameterwerten positioniert wird. Damit ist ein interaktiver Entwurf möglich der simultan für mehrere Betriebsfälle Forderungen an  $S$  und  $T$  sowie die Eigenwertlagen berücksichtigt.

Bei Entwürfen mit mehr als zwei festzulegenden Reglerparametern verwendet man Schnittebenen im höherdimensionalen Raum der Reglerparameter. Die Darstellung in einer Ebene kann hierbei genutzt werden, um eine geeignete Schnittebene im Raum der Reglerparameter zu bestimmen. Hierzu wird die Information in der bisherigen Schnittebene genutzt, um interaktiv zwei Punkte festzulegen, durch die die Schnittebene für den nächsten Entwurfsschritt verläuft.

Insbesondere die symbolische Berechnung der farbkodierten Gebiete wird betrachtet. Die Anwendbarkeit und Effizienz der Verfahren wird an einem Beispiel demonstriert.

## Literatur

- [1] Ackermann, J.; Bartlett A.; Kaesbauer D.; Sienel W.; Steinhauser R.: Robuste Regelung. Analyse und Entwurf von linearen Regelungssystemen mit unsicheren physikalischen Parametern, Springer, Berlin, 1993.
- [2] Bünte, T.: Grenzyklen in Systemen mit unsicheren Parametern, Regelungstechn. Kolloquium, Boppard, 26.2.1998.
- [3] Odenthal D.; Blue P.: Mapping of frequency response magnitude performance specifications into parameter space, erscheint in Proc. 3rd IFAC Symposium on Robust Control Design, Prague, Czech Republic, 2000.
- [4] Besson, V.; Shenton, A. T.: Interactive control system design by a mixed  $H_\infty$ -parameter space method, IEEE Trans. on Automatic Control, 42, 1997.

# Identifikation nichtlinearer zeitvarianter Prozesse mit Neuronalen Netzen

Michael Tagscherer\*

\*FORWISS

Bayerisches Forschungszentrum für Wissensbasierte Systeme

Am Weichselgarten 7, 91058 Erlangen

Tel.: +49/9131/691211

Fax.: +49/9131/691185

Email: Michael.Tagscherer@forwiss.de

Peter Protzel\*\*

\*\*Technische Universität Chemnitz

Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik

Institut für Automatisierung

09107 Chemnitz

Tel.: +49/371/5313442

Fax.: +49/371/5313352

Email: Peter.Protzel@E-Technik.TU-Chemnitz.de

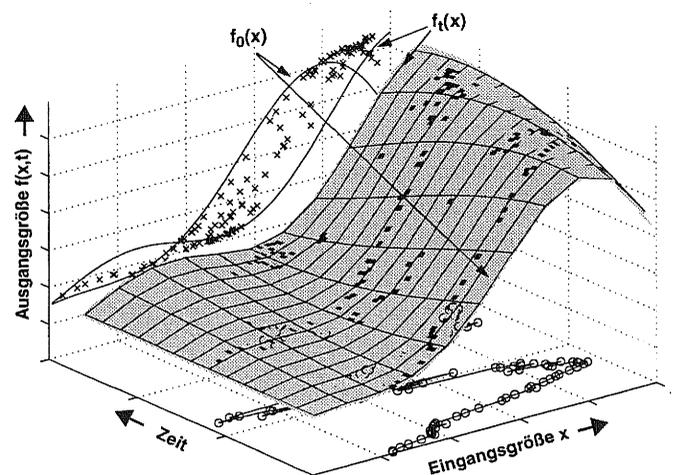
**Schlüsselwörter:** Neuronale Netze, Identifikation, Zeitvarianz, kontinuierliches Lernen

Neuronale Netze werden in der Automatisierung zur datengetriebenen Modellierung (Identifikation) typischerweise dann eingesetzt, wenn kein oder kein ausreichend genaues Streckenmodell existiert, z.B. weil die Nichtlinearitäten des Prozesses analytisch nicht fassbar sind. Ist der Prozess z.B. durch Alterung zusätzlich zeitvariant, ist eine schritthaltende Adaption des Neuronalen Netzes erforderlich (s. Beispiel in Abbildung 1). D.h., das typische einmalige Trainieren vor dem Einsatz ist nicht mehr ausreichend, sondern es muss während des Betriebs kontinuierlich nachtrainiert werden. Im Gegensatz zum zeitlich begrenzten Training bezeichnen wir dies als zeitlich unbegrenztes oder kontinuierliches Lernen [1].

Beim kontinuierlichen Lernen treten eine Reihe von bekannten Problemen auf, insbesondere das Stabilitäts- vs. Plastizitätsdilemma. Die von uns betrachteten Anwendungen in der Stahlindustrie [2] stellen darüber hinaus die folgenden Anforderungen an die Verfahren:

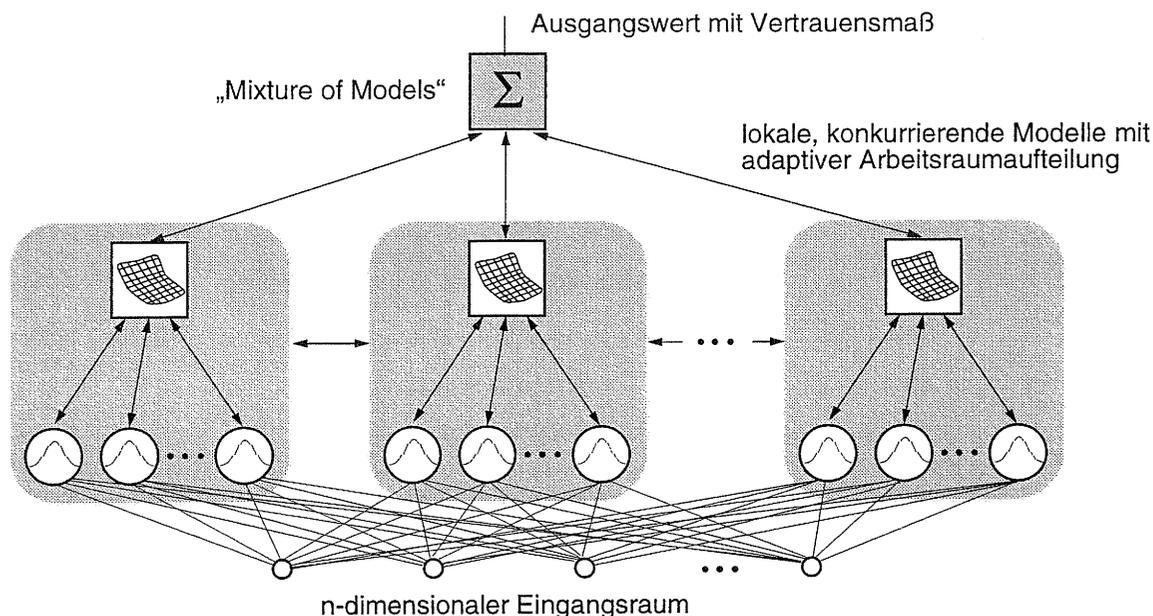
- Das Verfahren muss auch schnellen Änderungen der Prozesscharakteristik folgen und dabei die veränderten Nichtlinearitäten des Prozesses modellieren. Dies kann durch eine Kombination von Modellen mit unterschiedlichen Adaptionsgeschwindigkeiten erreicht werden (z.B. Kurzzeit- und Langzeitadaption).
- Die Stabilität des neuronalen Modells muss durch eine Arbeitsraumaufteilung und lokal adaptive Modelle erhöht werden. Die Arbeitsraumaufteilung sollte sich bei Bedarf ebenfalls an Prozessveränderungen anpassen und sie sollte optimal sein bezüglich der Approximationsgüte der lokalen Modelle und nicht bezüglich der Dichteverteilung in Eingangsraum.
- Das Verfahren muss bereits nach wenigen Trainingspunkten plausible Ergebnisse liefern,

**Abbildung 1:** Beispiel einer nichtlinearen, zeitvarianten Funktion  $f(x,t)$ . Zur Modellierung dieser Funktion stehen Daten entsprechend eines beispielhaften Arbeitspunktverlaufs  $x(t)$  zur Verfügung (dunkle Flächen). Ziel zum Zeitpunkt  $t$  ist jedoch nicht nur die Vorhersage des nächsten Outputs (Punktvorhersage), sondern der kompletten Funktion  $f_{t+1}(x)$  für den gesamten Wertebereich von  $x$  (Modellvorhersage).



Netztopologie und Parameter im weiteren Verlauf selbstständig anpassen und mit zunehmender Datenmenge entsprechend verfeinern.

- Neben dem Ausgabewert muss das Verfahren einen Indikator für die Güte bzw. Vertrauenswürdigkeit der Ausgabe liefern. In Raumbereichen mit bisher wenigen oder keinen Trainingsdaten wird dann z.B. eine Ausgabe des Neuronalen Netzes als wenig vertrauenswürdig markiert.



**Abbildung 2:** Vereinfachte Darstellung der hybriden Netzarchitektur. Doppelpfeile symbolisieren Wechselwirkungen in beide Richtungen zwischen den Komponenten.

In diesem Beitrag wird ein neuartiges neuronales Lernverfahren für eine hybride Architektur vorgestellt, das die o.g. Anforderungen erfüllt. Abbildung 2 zeigt die grobe Struktur der Netzarchitektur. Die Basis des dreischichtigen Netzes bildet eine Clusterebene aus adaptiven RBF-Neuronen. Die Zielfunktion wird durch lokale (lineare oder nichtlineare) Modelle in der zweiten Ebene approximiert. Die Kombination der lokalen Modelle und die Berechnung der Ausgabewerte erfolgt in der dritten Ebene. Das Verfahren basiert auf der Idee, dass alle lokalen Modelle in permanenter Konkurrenz zueinander stehen und dass es eine dauernde Wechselwirkung zwischen den Ebenen in beide Richtungen gibt [3]. Bemerkenswert ist auch, dass die Anzahl der RBF-Neuronen, ihre Position, die Ausdehnung der rezeptiven Felder sowie die Anzahl der lokalen Modelle ohne Vorgaben des Benutzers kontinuierlich während der Datenpräsentationsphase automatisch ermittelt werden.

## Literatur:

- [1] Protzel, P., Kindermann, L., Tagscherer, M., Lewandowski, A.: Adaptive Systemidentifikation mit Neuronalen Netzen zur Profilsteuerung in Walzwerken, Computational Intelligence: Neuronale Netze, Evolutionäre Algorithmen, Fuzzy Control im industriellen Einsatz, VDI Berichte 1381, VDI Verlag, Düsseldorf, 1998, pp. 347-359.
- [2] T. Martinetz, O. Gramckow, P. Protzel u. G. Sörgel, "Neuronale Netze zur Steuerung von Walzstraßen", in atp - Automatisierungstechnische Praxis, 38 Heft 10, 1996, S. 28-42.
- [3] Tagscherer, M.: ICE - an Incremental Hybrid System for Continuous Learning, Proceedings of the 8th International Conference on Artificial Neural Networks (ICANN'98), Skövde, Schweden, Sep 1998, pp. 597-602.

# Schätzung und Fehlererkennung von hybriden Systemen mit gemischt ganzzahlig-kontinuierlicher Optimierung

Domenico Mignone, Manfred Morari

Institut für Automatik  
ETH - Eidgenössische Technische Hochschule Zürich  
CH-8092 Zürich

Tel. + 41 1 632 7626 Fax + 41 1 632 1211

<http://www.control.ethz.ch>

{mignone,morari}@aut.ee.ethz.ch

## Zusammenfassung

In einer kürzlich erschienenen Publikation [4] wurde ein Modellierungsansatz für hybride Systeme vorgestellt, das sogenannte MLD (Mixed Logic Dynamical) Modell. Dieser Ansatz erlaubt die Modellierung verschiedener Klassen von hybriden Systemen, sodass viele Probleme von praktischer Relevanz formuliert und gelöst werden können, wie z.B. die Reglersynthese, die Zustandsschätzung oder die Verifikation. In dieser Arbeit werden wir die Modellierung von hybriden Systemen in MLD Form präsentieren und die Methoden zur Zustandsschätzung ausführlich beschreiben. Das Schätzungsproblem lässt sich als gemischt ganzzahlig-kontinuierliche Optimierung formulieren. Diese Methoden lassen sich zur Implementation eines Fehlerdiagnose-Schemas verwenden. Zur Illustration werden wir das Fallbeispiel des Drei-Tank Systems betrachten.

**Schlüsselwörter:** Hybride Systeme, Gemischt ganzzahlig-kontinuierliche Optimierung, Branch and Bound, Fehlerschätzung

Unter hybriden Systemen verstehen wir Systeme, die sowohl kontinuierliche, als auch diskrete Variablen enthalten. Solche Systeme sind in der Praxis weit verbreitet, z.B. in der Verfahrenstechnik, in der Flugzeugtechnik oder in der Robotik. Die Behandlung von hybriden Systemen setzt eine geeignete Modellierung voraus, welche die dynamische Entwicklung der diskreten und der kontinuierlichen Variablen beschreibt, aber auch die Interaktionen zwischen diesen beiden Typen von Variablen geeignet darstellt. Eine Zusammenfassung von Modellierungsansätzen kann z.B. in [8] gefunden werden.

In einer kürzlich erschienenen Publikation [4] wurde ein neuer Modellierungsansatz für hybride Systeme vorgestellt, das sogenannte MLD (Mixed Logic Dynamical) Modell. Dieses Modell ist von der klassischen, kontinuierlichen, zeitdiskreten Darstellung linearer Systeme inspiriert und modelliert den diskreten Teil mit Variablen, für welche eine Ganzzahligkeitseinschränkung<sup>1</sup> auferlegt wird. Zum MLD Modell gehört weiter einen Satz von linearen Einschränkungen, welche u.a. zur Beschreibung der dynamischen Entwicklung der ganzzahligen Variablen dient. Die allgemeine Form eines MLD Systems [4] ist:

$$x(t+1) = Ax(t) + B_1u(t) + B_2\delta(t) + B_3z(t) \quad (1a)$$

$$y(t) = Cx(t) + D_1u(t) + D_2\delta(t) + D_3z(t) \quad (1b)$$

$$E_2\delta(t) + E_3z(t) \leq E_1u(t) + E_4x(t) + E_5 \quad (1c)$$

---

<sup>1</sup>Typischerweise werden wir die ganzzahligen Variablen als binäre Variablen in der Menge  $\{0,1\}$  betrachten.

Die Zustände werden mit  $x \in \mathbb{R}^{n_c} \times \{0, 1\}^{n_d}$ , die Ausgänge mit  $y \in \mathbb{R}^{n_{yc}} \times \{0, 1\}^{n_{yd}}$  und die Eingänge mit  $u \in \mathbb{R}^{n_{uc}} \times \{0, 1\}^{n_{ud}}$  bezeichnet. Die Variablen  $z \in \mathbb{R}^{n_z}$  und  $\delta \in \{0, 1\}^{n_\delta}$  sind Hilfsvariablen, die eingeführt werden müssen, um die Beziehungen zwischen kontinuierlichen und diskreten Variablen zu modellieren.

Für ein System in MLD Form können zahlreiche Aufgaben bezüglich Analyse, Synthese und Überwachung formuliert und gelöst werden. Es sind dies Probleme wie Reglersynthese [4], Zustandsschätzung [6], Fehlererkennung [3], Verifikation [5] oder theoretische Fragen nach Beobachtbarkeit und Steuerbarkeit [1] des Systems. Die Idee zur Behandlung dieser Fragen ist die Formulierung des jeweiligen Problems als gemischt ganzzahlig-kontinuierliche Optimierung. Die mathematischen Werkzeuge zur Lösung dieser Aufgaben sind als Software Pakete vorhanden [7].

In dieser Arbeit wird speziell die Zustandsschätzung für MLD Systeme vorgestellt. Die Grundidee besteht darin, die gemessenen Daten mit einem Least Squares Verfahren dem Modell anzupassen. Um die Grösse des Optimierungsproblems konstant zu halten, dürfen nur die Daten in einem Fenster bestimmter Länge für die Schätzung verwendet werden. Ein solches Verfahren wurde erfolgreich für die Fehlererkennung im Drei-Tank Beispiel angewandt [9, 3].

Die Stabilität des Estimators kann dadurch gewährleistet werden, dass die vernachlässigten Daten vor dem betrachteten Fenster mit einer geeigneten Kostenfunktion approximiert werden. In [6] wird gezeigt, dass man eine solche Approximation als quadratische Funktion ansetzen kann. Damit können effiziente Algorithmen zur Lösung des resultierenden gemischt ganzzahlig-quadratischen Programms [7] verwendet werden.

Die worst-case Komplexität der Optimierungsprobleme, die wir in Echtzeit lösen, steigt exponentiell an mit der Anzahl binärer Variablen. Allerdings kann die durchschnittliche Rechenzeit reduziert werden, wenn man heuristische Betrachtungen für das Lösen des Optimierungsproblems miteinbezieht [2].

Weiterführende Arbeiten werden die Schätzverfahren mit Reglerentwurfstechniken kombinieren, um Rekonfigurationsprobleme im Falle von Systemfehler zu lösen.

Danksagung: Alberto Bemporad, Giancarlo Ferrari-Trecate

## Literatur

- [1] A. Bemporad, G. Ferrari-Trecate, and M. Morari. Observability and Controllability of Piecewise Affine and Hybrid Systems. *Proceedings of the Conference on Decision and Control*, 1999.
- [2] A. Bemporad, D. Mignone, and M. Morari. An Efficient Branch and Bound Algorithm for State Estimation and Control of Hybrid Systems. *European Control Conference*, 1999.
- [3] A. Bemporad, D. Mignone, and M. Morari. Moving Horizon Estimation for Hybrid Systems and Fault Detection. In *Proceedings of the American Control Conference*, 1999.
- [4] A. Bemporad and M. Morari. Control of Systems Integrating Logic, Dynamics, and Constraints. *Automatica*, 35(3):407–427, March 1999.
- [5] A. Bemporad and M. Morari. Verification of Hybrid Systems via Mathematical Programming. In *Hybrid Systems: Computation and Control; Second International Workshop*, 1999.
- [6] G. Ferrari Trecate, D. Mignone, and M. Morari. Moving Horizon Estimation for Piecewise Affine Systems. *submitted to ACC 2000*, 1999.
- [7] R. Fletcher and S. Leyffer. Numerical Experience with Lower Bounds for MIQP Branch-And-Bound. *SIAM Journal on Optimization*, 8(2):604–616, 1998. <http://epubs.siam.org/sam-bin/dbq/toclist/SIOPT>.
- [8] G. Labinaz, M.M. Bayoumi, and K. Rudie. A Survey of Modeling and Control of Hybrid Systems. *Annual Reviews of Control*, 21:79–92, 1997.
- [9] J. Lunze. Laboratory Three Tanks System — Benchmark for the Reconfiguration Problem. Technical report, Tech. Univ. of Hamburg-Harburg, Inst. of Control. Eng., Germany, 1998. <http://www.tu-harburg.de/rts/software/cosy/>.

# Online-Überwachung nichtlinearer Black-Box-Modelle für die prädiktive Regelung

Dipl.-Ing. V. Roßmann

Prof. Dr.-Ing. S. Engell

Lehrstuhl für Anlagensteuerungstechnik

Universität Dortmund

44221 Dortmund

Tel.: +49/231/7555127, Fax: +49/231/7555129

Email: ast@ast.chemietechnik.uni-dortmund.de

**Schlüsselwörter:** Prädiktive Regelung, Neuronale Netze

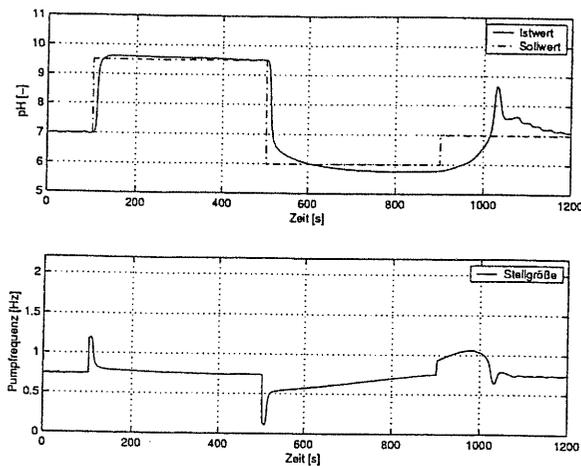
In den vergangenen Jahren hat die prädiktive Regelung eine immer breitere Verwendung gefunden. Insbesondere Dynamic Matrix Control (DMC) und verwandte lineare Verfahren haben industrielle Bedeutung erlangt. Aktuelle Forschungsaktivitäten widmen sich darüber hinaus der nichtlinearen prädiktiven Regelung, wobei vermehrt Neuronale Netze als Prädiktionsmodelle eingesetzt werden. Die zum Training verwendeten Datensätze werden dabei in der Regel durch Aufschaltung eines geeigneten Anregungssignals auf den offenen Kreis gewonnen. Diese Vorgehensweise ist jedoch aufgrund sicherheitstechnischer Überlegungen bei einer Vielzahl von Prozessen speziell in der chemischen Industrie nicht sinnvoll. Eine Alternative besteht in der Identifikation im geschlossenen Kreis. Hierbei wird das Anregungssignal auf den Sollwert des konventionell geregelten Systems geschaltet. Ein prädiktiver Regler, der mit einem auf dieser Datenbasis beruhenden Prozessmodell betrieben wird, zeigt jedoch in der Praxis häufig eine unbefriedigende Regelgüte. Der Grund hierfür ist, dass der beim Training eingesetzte konventionelle Regler prinzipbedingt eine andere Dynamik aufweist als der prädiktive Regler. Der Regelalgorithmus erzeugt somit Stellsequenzen, die das Modell in den Extrapolationsbereich treiben [3]. Es ist daher notwendig, die Modellgüte bereits in der Trainingsphase richtig einzuschätzen und im laufenden Betrieb sicherzustellen, dass das Modell nur dann eingesetzt wird, wenn es in dem entsprechenden Betriebsbereich auch validiert ist, bzw. dass der Regler bei größerer Modellunsicherheit entsprechend vorsichtiger agiert.

In diesem Beitrag wird ein Analysewerkzeug zur a priori Beurteilung der Güte nichtlinearer Black-Box-Modelle für den Einsatz in der prädiktiven Regelung vorgestellt, bei dem auf der Grundlage der zur Identifikation verwendeten Trainings- und Testdaten der Gültigkeitsbereich des Modells sowie der in Abhängigkeit vom Arbeitspunkt zu erwartende Modellfehler abgeschätzt wird. Darauf aufbauend wurde ein Verfahren zur Online-Überwachung des Modells entwickelt, mit dem sichergestellt werden kann, dass das Modell nur innerhalb seines Gültigkeitsbereichs betrieben wird. Darüber hinaus ist es möglich, im abgesicherten Betrieb mit dem prädiktivem Regler neue Trainingsdaten zu gewinnen und somit ein neues Modell mit größerem Gültigkeitsbereich zu identifizieren.

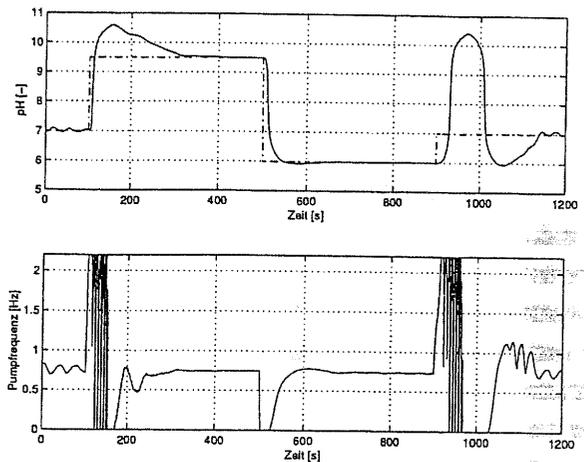
Das Verfahren ist grundsätzlich für alle Modelle in ARX-Struktur anwendbar. Es wird beispielhaft anhand eines Takagi-Sugeno-Fuzzy-Modells erläutert, das mit dem LOLIMOT-Algorithmus nach Nelles [1] trainiert wurde. Als Benchmarkprozess wird die Regelung des pH-Werts in einem kontinuierlichen Neutralisationsreaktor betrachtet [3]. Die Untersuchungen erfolgten anhand eines Simulationsmodells, das in MATLAB/Simulink implementiert wurde. Als Regelungskonzept wird der Extended DMC Algorithmus nach [2] verwendet.

In den Abbildungen sind die Ergebnisse für die Simulation des Führungsverhaltens dargestellt. Dabei ist in der oberen Hälfte jeder Abbildung der Verlauf von Sollwert und

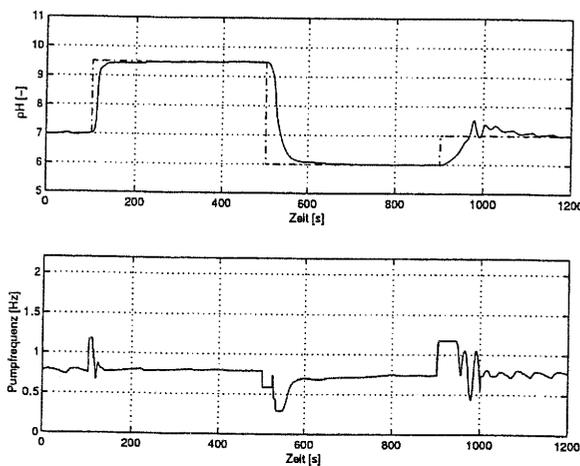
Regelgröße, in der unteren der Stellgrößenverlauf aufgetragen. Im unbeschränkten Fall zeigt der prädiktive Regler aufgrund der Extrapolation des zugrunde liegenden Modells ein deutlich schlechteres Verhalten als der lineare Regler (a und b). Mit zugeschaltetem Überwachungsalgorithmus wird eine deutliche Verbesserung der Regelgüte erreicht (c). Es ist nun möglich, neue Trainingsdaten unter Verwendung des prädiktiven Reglers zu erzeugen. Durch das Neutraining unter Beibehaltung der Modellkomplexität kann nochmals eine deutliche Verbesserung des Regelverhaltens erzielt werden (d).



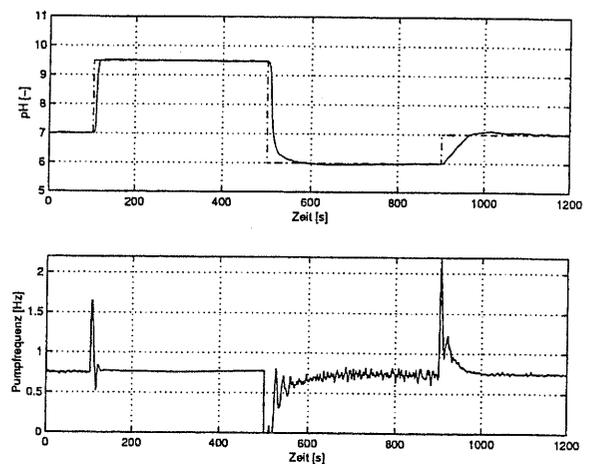
(a) PID-Regler



(b) ExDMC (unbeschränkt)



(c) ExDMC mit Online-Überwachung



(d) ExDMC (unbeschränkt) nach Neutraining

## Literatur

- [1] Nelles, O.: LOLIMOT - Lokale, lineare Modelle zur Identifikation nichtlinearer, dynamischer Systeme, Automatisierungstechnik, Vol. 45, No. 4, 163-174, 1997.
- [2] Peterson, T.; Hernández, E.; Arkun, Y.; Schork, F. J.: Nonlinear Predictive Control of a Semi Batch Polymerization Reactor by an Extended DMC, Proceedings of the 1989 American Control Conference, 1534-1539, 1995.
- [3] Roßmann, V.; Fernholz, G.; Engell, S.: Neuronale Netze als dynamische Prozeßmodelle für die prädiktive Regelung einer Neutralisationsanlage, GMA-Kongress 1998 Meß- und Automatisierungstechnik, 661-668.



# Frequenz-Analyse nicht stationäre Signale mittels Wavelet-Theorie

S. Ellis

Meß-, Steuer- und Regelungstechnik  
Gerhard-Mercator-Universität Duisburg  
47048 Duisburg  
Tel.: +49/203/379-1585, Fax: +49/203/379-3027  
Email: sellis@uni-duisburg.de

**Schlüsselwörter:** Wavelet Transformation, Zeit-Frequenz-Analyse

Der Stand der heutigen Meßtechnik bietet den Ingenieur einen umfangreichen Einblick in das Verhalten und die Zustände eines technischen Prozesses. Doch für viele praktische Aufgaben ist eine zusätzliche Sensorik nicht wirtschaftlich, so daß Methoden benötigt sind, sie aus den ohnehin vorhandenen Meßsignalen zusätzliche Informationen ermitteln können, die auf die Systemzustände zurückschließen läßt.

Die Meßsignale technische Systeme sind oftmals stochastisch oder nicht stationär. Die darin enthaltene transiente und unstetige Vorgänge lassen sich mit konventionelle Fourier-Transformationen schlecht erfassen. Die erstmals vor etwa 20 Jahren in der Geophysik angewendete Wavelet-Theorie [1] ermöglicht eine lokale Transformation einzelne Signalabschnitte und dadurch einen weiteren Einblick in das Verhalten eines Prozesses.

In diesem Beitrag werden die Vorteile der Wavelet-Theorie für die Meß-, und Regelungstechnik vorgestellt. Darüberhinaus werden ein Anwendungsbeispiel und Ergebnisse für die Überwachung von Resonanzfrequenzen in einem nicht stationären Signal dargestellt.

## Literatur

- [1] Mallat, S.: A Wavelet Tour of Signal Processing, Academic Press, 1998, San Diego.
- [2] Louis, A., P. Maaß und A. Rieder: Wavelets, Theorie und Anwendungen, B. G. Teubner, 1994, Stuttgart.

# Einsatz schneller Neuronaler Netze zur modellgestützten Optimierung von Verbrennungsmotoren

Michael Hafner \*

\* Institut für Automatisierungstechnik  
Fachgebiet Regelungstechnik und Prozessautomatisierung  
Technische Universität Darmstadt  
Landgraf Georg Straße 4, 64283 Darmstadt  
Tel.: +49/6151/162114  
Fax: +49/6151/293445  
Email: MHafner@iat.tu-darmstadt.de

**Schlüsselwörter:** Schnelle Neuronale Netze, dynamische Abgasmodellierung, Optimierung, Verbrennungsmotoren, Motorsteuerung

Entwurf und Test von digitalelektronischen Steuerungen und Regelungen erfordern in zunehmendem Maße relativ genaue mathematische Modelle für das statische und dynamische Verhalten von Verbrennungsmotoren. Außer den Stellgrößen Einspritzmenge und Einspritzwinkel kommen z.B. bei Dieselmotoren weitere Stellgrößen hinzu wie Abgasrückführmenge, Turbolader-Leitschaufelstellung und Einspritzdruck bei Common-Rail Systemen. Alle Stellgrößen haben Einfluß auf das Drehmoment, den Verbrauch und die gesetzlich limitierten Abgaskomponenten ( $\text{NO}_x$ , CO,  $\text{CO}_2$ , HC, Ruß), so dass die Zahl der in Motorsteuerungen zu realisierenden Kennfelder stark ansteigt (z.Zt. 80-120), [1]. Künstliche neuronale Netze bieten nun die Möglichkeit, den Einfluß der Stellgrößen auf das Leistungs- und Abgasverhalten des Motors sehr kompakt darzustellen, [2]. Sie eignen sich besonders für Prüfstandsversuche und dienen in diesem Beitrag als Grundlage für modellbasierte Optimierungsverfahren.

Hierfür findet ein schnelles, lokal lineares neuronales Netz Anwendung, [3]. Dieses erweiterte RBF-Netz zeichnet sich u.a. durch sehr schnelle Trainingszeiten, eine automatische, flexible Anpassung der Netzstruktur an die Nichtlinearität des Prozesses, ein beeinflussbares Extrapolationsverhalten und eine Interpretierbarkeit als Takagi-Sugeno Fuzzy-Modell aus. Es kann zur on-line Identifikation von stark nichtlinearen statischen und dynamischen Prozessen eingesetzt werden.

Dieses nichtlineare Identifikationsverfahren wird für die experimentelle Modellbildung des statischen und dynamischen Verhaltens der Emissionen, des Verbrauchs und des Drehmoments eines TDI-Dieselmotors verwendet. Es

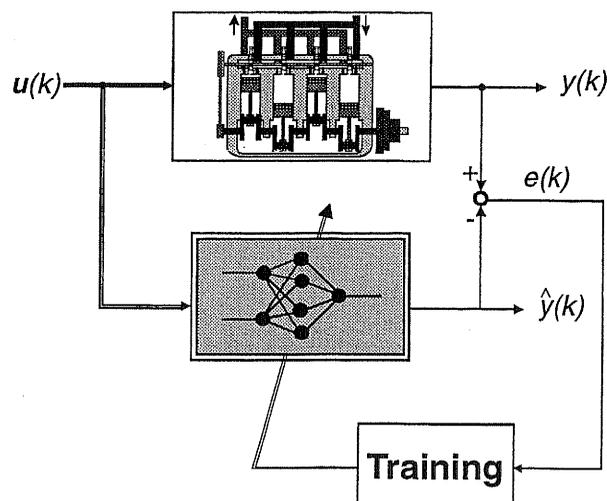


Abbildung 1: Modellbildung von Verbrennungsmotoren durch Neuronale Netze

wird eine multivariable Gesamtoptimierung

vorgestellt, die auf den nichtlinearen neuronalen Netz-Modellen beruht, [4]. Die Verlustfunktion beinhaltet hierbei den Kraftstoffverbrauch und die Abgasemissionen NO<sub>x</sub>, CO, HC und Ruß mit Begrenzungen.

Da bisher durchgeführte Versuche zur Messung von Rasterkennfeldern bei der Zunahme an Stell- und Ausgangsgrößen eine viel zu große Messzeit an den Motorenprüfständen erfordern [5], wird zum Schluss auch auf verbesserte Prüfstands-fahrstrategien eingegangen, die eine schnelle Erfassung des Motorverhaltens ermöglichen.

Die Versuche werden am institutseigenen Motorenprüfstand durchgeführt, dessen Aufbau kurz erläutert wird. Hierbei werden verschiedene Rechnersysteme (VME-Bus, Workstation, PC, Rapid-Control-Prototyping-System) eingesetzt, um unabhängig von Seriensteuergeräten Steuer- und Regelalgorithmen entwerfen und testen zu können.

### **Literatur:**

- [1] Unland, S.; Stuhler, H.; Stuber, A.: Neue effiziente Applikationsverfahren für die physikalisch basierte Motorsteuerung ME7, *Motortechnische Zeitschrift* 59, 1998
- [2] Isermann, R.; Hafner, M.; Müller, N.; Schüler, M.: Der Einsatz neuronaler Netze zur Modellbildung, Steuerung und Regelung von Verbrennungsmotoren, 3. Stuttgarter Symposium Kraftfahrwesen und Verbrennungsmotoren, Stuttgart, 1999
- [3] Nelles, O.: Nonlinear System Identification with Local Linear Neuro-Fuzzy Models, Dissertation an der TU Darmstadt, erschienen im Shaker Verlag, 1999
- [4] Hafner, M.; Schüler, M.; Nelles, O.: Dynamical Identification and Control of Combustion Engine Exhaust, American Control Conference, USA, 1999
- [5] Bredenbeck, J.: Statistische Versuchsplanung für die Online-Optimierung von Verbrennungsmotoren, *Motortechnische Zeitschrift* 60, 1999

# Sensorfusion in der automatischen Sichtprüfung metallischer Oberflächen

Dr.-Ing. F. Puente León

Institut für Meß- und Regelungstechnik  
Universität Karlsruhe (TH)  
Richard-Willstätter-Allee, 76131 Karlsruhe  
Tel.: +49 721 608-3604, Fax: +49 721 661874  
E-Mail: f.puente@ieee.org

**Schlüsselwörter:** automatische Sichtprüfung, Bildverarbeitung, Sensorfusion, Bayessche Fusionstheorie, metallische Oberflächen, Beleuchtung

In der automatischen Sichtprüfung ist es nicht immer möglich, eine zuverlässige Inspektion eines Objektes anhand von einer einzigen Kameraaufnahme durchzuführen. Beschränkungen optischer Systeme, Beleuchtungsprobleme sowie Schwierigkeiten, sämtliche interessierenden Objektbereiche gleichzeitig und mit der geforderten Auflösung zu erfassen, bedingen oftmals die Akquisition mehrerer Bilder unter verschiedenen Aufnahmesituationen. Meistens wird die Nutzinformation anschließend durch getrennte Weiterverarbeitung dieser Einzelbilder gewonnen.

Ein in vielen Fällen erfolgreicherer Ansatz basiert hingegen darauf, zur Extraktion der gewünschten Objekteigenschaften die gesamte Bildserie gleichzeitig auszuwerten. Hierbei können die Meßdaten aus den verschiedenen Bildsensoren mit Methoden der Sensorfusion zu einem oder mehreren Fusionsergebnissen verschmolzen werden, welche die Nutzinformation möglichst kompakt repräsentieren [2]. Dabei ist es für die Formulierung der Fusionsaufgabe zunächst unbedeutend, ob die Ergebnisse selbst weiterhin Bilder, Merkmale oder Symbole darstellen sollen.

In diesem Beitrag wird das Prinzip der Sensorfusion in der automatischen Sichtprüfung anhand von „nichtkooperativen“ metallischen Oberflächen demonstriert. Die hier verwendeten Sensoren sind in dem Sinne virtuell, daß mit einer einzigen CCD-Kamera eine Serie von Bildern mit unterschiedlichen Beleuchtungskonstellationen aufgenommen wird. Methodisch wird das Fusionsproblem in Form eines Energiefunktional formuliert. Dessen Summanden beschreiben gewünschte Eigenschaften, sinnvolle Forderungen und Vorwissen bezüglich der Bildserie, des Fusionsergebnisses und etwaiger problemrelevanter Zwischengrößen sowie ihre wechselseitigen Beziehungen. Durch Minimierung des Energiefunktional erhält man das unter den getroffenen Annahmen optimale Fusionsresultat. Die vorgestellte Fusion mittels Energieminimierung kann als Spezialfall der viel allgemeineren Bayesschen Fusionstheorie aufgefaßt werden, die ihre Aussagen auf die a posteriori Wahrscheinlichkeitsverteilung stützt [1]. In manchen Fällen erlaubt die Struktur der Energiefunktion, die oftmals sehr aufwendige Optimierungsrechnung durch eine effizientere getrennte Minimierung der Einzelterme zu approximieren.

Mittels zweier praxisrelevanter Aufgaben, der Erfassung kriminaltechnisch relevanter Spurenräger sowie der Auswertung kugelgestrahlter Oberflächen, wird die vorgestellte Methodik erläutert; siehe Abb. 1. Das erste Beispiel beschäftigt sich mit dem Einsatz von Datenfusion zur Erzeugung qualitativ hochwertiger Bilder feiner Oberflächenspuren auf Geschossen oder Patronenhülsen [3]. Dafür wird eine Bildserie des Spurenrägers durch Variation des Beleuchtungswinkels erfaßt, so daß die interessierenden Oberflächenbereiche vollständig und mit hohem Kontrast durch die Gesamtheit der Bilder abgedeckt werden.

Daraus werden die besten Bildausschnitte „herausgeschnitten“ und zu einem hochwertigen Resultat zusammengefügt, welches die Vorteile der Einzelbilder vereint. Die Fusionsergebnisse dienen als Grundlage für einen rechnergestützten Vergleich zum Zwecke der Schußwaffenidentifikation [4].

In einem weiteren Beispiel geht es um die automatische Bestimmung des Überdeckungsgrades kugelgestrahlter Oberflächen, wie sie wegen ihrer hohen Ermüdungsfestigkeit u. a. im Flugzeugbau eingesetzt werden [5]. Um eine wohldefinierte Überdeckung der Oberfläche mit Kugeleinschlägen zu erhalten, muß der Kugelstrahlprozeß durch Ermittlung des Überdeckungsgrades als Funktion der Zeit kalibriert werden. Dies erfolgt bisher durch visuellen Vergleich von Testoberflächen mit einem Katalog von Referenzmustern. Aufgrund

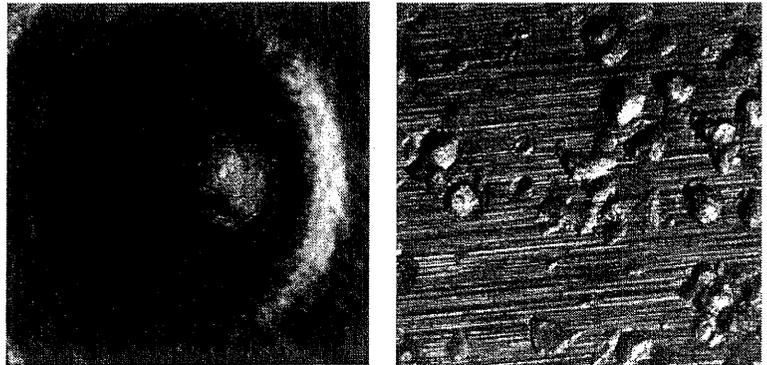


Abbildung 1: Makroskopische Aufnahmen metallischer Oberflächen: (links) Schlagbolzeneindruck einer Patronenhülse; (rechts) kugelgestrahlte Oberfläche.

der komplexen Struktur solcher Oberflächen gelingt oftmals selbst erfahrenen Experten keine eindeutige Unterscheidung zwischen Einschlägen und Hintergrundtextur, was diese Vorgehensweise äußerst subjektiv gestaltet. Im Gegensatz dazu wird im vorgestellten Ansatz eine Bildserie unter systematischer Variation der Oberflächenbeleuchtung aufgenommen und zu einem symbolischen Ergebnis verschmolzen, wodurch eine wesentlich robustere Detektion der interessierenden Bereiche erreicht wird.

Der Beitrag soll verdeutlichen, daß sich durch die systematische Herstellung komplementärer Aufnahmesituationen und den Einsatz von Fusionsverfahren oftmals ein erheblicher Qualitätsgewinn in der automatischen Sichtprüfung realisieren läßt. Dem größeren Aufwand bei der Datenakquisition stehen oftmals eine einfachere bzw. robustere Signalverarbeitung und nicht zuletzt die Möglichkeit der Lösung neuer Sichtprüfungsaufgaben gegenüber.

## Literatur

- [1] Clark J. J.; Yuille, A. L.: *Data Fusion for Sensory Information Processing Systems*, Kluwer Academic Publishers, Boston, 1990.
- [2] Gros, X. E.: *NDT Data Fusion*, Arnold, London, 1997.
- [3] Puente León, F.; Beyerer, J.: „Datenfusion zur Gewinnung hochwertiger Bilder in der automatischen Sichtprüfung“, *Automatisierungstechnik* 45 (10), 480–489, 1997.
- [4] Puente León, F.: *Automatische Identifikation von Schußwaffen*, Fortschritt-Berichte VDI Reihe 8, Nr. 787, VDI Verlag, Düsseldorf, 1999.
- [5] Wagner, C.: *Automatische Bestimmung des Überdeckungsgrades von kugelgestrahlten Oberflächen mit Bildverarbeitungsmethoden*, Diplomarbeit am Institut für Meß- und Regelungstechnik, Universität Karlsruhe (TH), 2000.

# Einsatz eines Neuronalen Netzes für die Regelung einer Zykloidfeuerungsanlage

Amer Noureldin \*

\* Lehrstuhl für Regelungssysteme und Leittechnik  
Brandenburgische Technische Universität Cottbus  
Universitätsplatz 3 / 4, 03044 Cottbus  
Tel.: +49/355/69 – 28 10  
Fax: +49/355/69 – 24 53  
Email: noureldin@tu-cottbus.de

**Schlüsselwörter:** Neuronales Netz, Verbrennungsprozeß

Am Energieressourcen-Institut der BTU Cottbus wurde eine Zykloidfeuerungsanlage mit einer Feuerungsleistung von 500 kW für Forschungs- und Entwicklungszwecke errichtet. Ziel der Arbeiten ist die Schaffung belastbarer Designdaten für hochmoderne, dezentrale Feuerungsanlagen im Bereich von 5 bis 20 MW für Trockenbraunkohle, wobei Klärschlamm und Biomasse zugemischt werden können. Solche Anlagen werden per Tankfahrzeug staubfrei ver- und entsorgt und sollen in der Regel ohne Bedienpersonal arbeiten. Neben den mehr kraftwerkstechnischen Aufgaben sind dabei auch interessante leittechnische und regelungstechnische Probleme zu lösen, wobei hier nur letztere betrachtet werden.

Kernstück der Zykloidfeuerung ist eine vertikal stehende, zylindrische Brennkammer, die sich unten konusförmig verjüngt. Der Brennstoff Trockenbraunkohle, ggf. gemischt mit Holz, wird seitlich über Dosierschnecken eingetragen. Klärschlamm kann über eine Pumpe seitlich eingespritzt werden. Hinzu kommt noch die Dosierung eines Additivs zur Schwefeleinbindung. Die Verbrennungsluft (Frischlufte und einstellbar rezirkulierte Abgase) wird der Brennkammer tangential zugeführt, primär am Boden über einen Drallerzeuger und sekundär in verschiedenen Höhen der Brennkammer. Hierdurch bildet sich eine ausgeprägte, nach oben führende Rotationsströmung, die für das Ausbrandverhalten und für das Emissionsverhalten sehr vorteilhaft ist [1].

Die vorhandene Versuchsanlage wird konventionell gesteuert und geregelt, wobei eine sicherheitsgerichtete Steuerung, eine normale SPS und ein Kleinleitsystem mit unterlagerten Einzelreglern zum Einsatz kommen. Die Regelung des Prozesses erfolgt bisher aber überwiegend manuell durch erfahrene Versuchsingenieure, die sich öfters auch iterativ an geeignete Einstellungen herantasten müssen.

Die Schwierigkeiten resultieren aus dem nichtlinearen Prozess, für den keine verlässlichen Modelle existieren. Darüber hinaus erschweren Wechsel der Brennstoffzusammenstellung und Qualitätsschwankungen der einzelnen Brennstoffe die Regelung. Nicht zuletzt müssen auch noch Anfahr- und Abfahrvorgänge, sowie Lastwechselzustände (Volllast, Teillast) automatisch beherrscht werden. Aus messtechnischer Sicht sind mit vertretbarem Aufwand ein Teil der relevanten Eingangsgrößen und Ausgangsgrößen, sowie wenige Hilfsgrößen verfügbar.

Es liegt nahe, den Einsatz neuronaler Netze zur Modellierung bzw. Regelung dieses Prozesses zu untersuchen [2,3,4]. Vergleichende Untersuchungen führten zur Wahl eines „Radialen Basisfunktions-Netzes“ (RBFN) zu Modellierung des Prozesses.

In einem ersten Schritt wurde ein RBFN zur Prozeßmodellierung erstellt. Eingangsdaten sind die Zufuhrstoffströme Kohle, Additiv, Klärschlamm sowie sechs verschiedene Luftströme und der Rezirkulationsstrom. Ausgangsgrößen sind vier Emissionswerte (CO, NO, SO<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>), sowie fünf Temperaturwerte (Profil längs der Brennkammer) und die Rauchgastemperatur. Ergebnisse und Einflüsse für verschiedene Situationen werden dargestellt und diskutiert.

In einem zweiten Schritt erfolgt der off-line Entwurf eines Fuzzyreglers unter Verwendung des RBFN als E/A-Prozeßmodell. Erste Teilergebnisse werden vorgestellt.

Im noch ausstehenden letzten Schritt soll das RBFN-Prozeßmodell on-line gekoppelt werden, um eine wechselseitige Überwachung (Prozeß und Modell) und eine ggf. notwendige Nachführung zu ermöglichen.

### **Literatur:**

- [1] Schrader, A., Thielen, W., Paulick, G., Krautz, H.J.: Verbrennung von Klärschlamm und Trockenbraunkohle in der LCS-Zykloidfeuerung. 18. Deutsch-Niederländischer Flammentag, 28.-29. August 1997, Delft.
- [2] Hunt, K. L., Sbarbaro, D., Zbikowski, R., Gawthrop, P. J.: Neural networks for control systems-A survey. *Automatica* 28 (1992), S. 1083-1112.
- [3] Schäffner, C.: Analyse und Synthese neuronaler Regelungsverfahren. Dissertation, TU München, 1995.
- [4] Narendra, K.S., *Neural Networks for Control: Theory and Practice*. Proceedings of the IEEE, Vol. 84, No. 10, 1996.



# Some Perspectives on Nonlinear Control of Mechanical Systems

Mark W. Spong<sup>\*)</sup>

Coordinated Science Laboratory  
University of Illinois at Urbana-Champaign  
Urbana, IL 61801 U.S.A.

currently at  
Lehrstuhl fuer Steuerungs- und Regelungstechnik  
TU-Muenchen, 80290 Muenchen  
Tel.: +49 89 289 28395  
Fax: +49 89 289 28340

## Abstract

In this talk we will give an overview on some recent ideas on the nonlinear control of Lagrangian and Hamiltonian mechanical systems. We will stress the fundamental importance of both energy/passivity methods and hybrid/switching control for this class of systems.

There are many control problems for mechanical systems that are difficult to pose as regulation or tracking problems and for which linear methods are inadequate, for example in problems involving unilateral constraints and impacts, such as bipedal locomotion. In these applications it may be more natural to control the energy, which is strongly related to the concept of passivity, rather than track trajectories.

Also, recent results in nonlinear control, such as backstepping, apply only to a limited class of nonlinear systems. We will show that switching control in conjunction with passivity methods, provides an attractive alternative for systems that do not satisfy the conditions for other types of nonlinear control methods.

We will discuss the application of these ideas in the control of impacts, bipedal locomotion, robot gymnastics, and a novel air hockey playing robot and show some interconnections among these applications. Both theoretical and experimental results will be presented and a video will be shown.

---

<sup>\*)</sup>Träger eines Humboldt-Forschungspreises

# Selbsteinstellender prädiktiver Kompaktregler

J. Hücker \*

H. Rake \*\*

\* Institut für Regelungstechnik  
Rhein.-Westf. Technische Hochschule Aachen  
Steinbachstr. 54, 52056 Aachen  
Tel.: +49/241/807482  
Fax: +49/241/8888296  
Email: hu@irt.rwth-aachen.de

\*\* Institut für Regelungstechnik  
Rhein.-Westf. Technische Hochschule Aachen  
Steinbachstr. 54, 52056 Aachen  
Tel.: +49/241/807500  
Fax: +49/241/8888296  
Email: ra@irt.rwth-aachen.de

**Schlüsselwörter:** Selbsteinstellung, Prädiktive Regelung, Kompaktregler

Das Institut für Regelungstechnik der RWTH Aachen entwickelt in Zusammenarbeit mit einem Industriepartner eine neue Software zur Selbsteinstellung von digitalen Kompaktreglern. Diese Regler sind weit verbreitet und kommen vorwiegend zur Regelung von thermischen Regelkreisen (z.B. Heizen, Heizen/Kühlen,...) in der untersten Automatisierungsebene zum Einsatz. Durch den allgemein zunehmenden Automatisierungsgrad von Anlagen werden Kompaktregler immer häufiger für komplexere Regelungsaufgaben eingesetzt, die durch die klassische PID-Struktur nicht mehr zur vollen Zufriedenheit gelöst werden können. Aus diesem Grund ist der Einsatz einer prädiktiven Reglerstruktur in Kompaktreglern vielversprechend.

Um dem allgemeinen Wunsch der Industrie nach möglichst vollständiger Entlastung des Bedienerpersonals nachzukommen wurde ein Selbsteinstellungsverfahren erarbeitet, das für Prozesse mit Ausgleich ohne weiteres Vorwissen auskommt. Sowohl bei der Selbsteinstellung als auch bei der folgenden prädiktiven Regelung muss im besonderen auf die sehr geringe Rechen- und Speicherkapazitäten Rücksicht genommen werden, da die Hardwarekosten aufgrund hoher Stückzahlen sehr gering gehalten werden müssen.

Das entwickelte Verfahren lässt sich in drei Stufen einteilen. In der ersten Stufe, der Voridentifikation, wird der zu identifizierende Prozess aus einem stationären Zustand heraus mit einem Blockimpuls angeregt, dessen Länge von der Prozessreaktion abhängig ist. Die Impulsantwort des Prozesses wird genutzt, um die drei Parameter eines  $PT_1T_1$ -Modells zu bestimmen. Dabei wird der integrale Zusammenhang zwischen Gewichtsfunktion und Übergangsfunktion genutzt, um eine rasche Bestimmung aller charakteristischen Modellparameter zu ermöglichen. Somit ist dieses Verfahren auf Grund des geringeren Zeitbedarfs einer Sprungantwortauswertung überlegen und kann gleichzeitig den Nachteil des nicht prädizierbaren Überschwingverhaltens bei Relay-Feedback-Methoden vermeiden. Im Anschluss daran kann ein PID-Regler ausgelegt und der Regelkreis geschlossen werden.

In der zweiten Stufe erfolgt eine parametrische Identifikation des Prozesses. Der Prozess wird dazu durch kleine Sollwertsprünge im geregelten Betrieb angeregt. Die Messdaten von Stell- und Regelgröße werden in einer an die bereits bekannte Prozessdynamik angepassten Abtastzeit erfasst und jeweils identisch gefiltert im Schätzalgorithmus verarbeitet. Die Bandpaßfilter, deren Eckfrequenzen ebenfalls an die Prozessdynamik angepasst sind, verhindern den Einfluß von hochfrequente Störsignal- und niederfrequente Offsetanteilen, sowie Driftanteilen, die sich häufig bei thermischen Prozessen zeigen und anderenfalls zu problematischen Schätzung von integrierendem Verhalten führen.

Das eingesetzte Least-Square-Schätzverfahren ist als rekursive Q-R-Zerlegung ausgeführt. Dabei kommen orthogonale Transformationen, hier in Form der Givensreflexion, zum Einsatz, die kurze Rechenzeit bei gleichzeitig großer numerischer Stabilität vereinen.

Bei der Identifikation von Heizen/Kühlenprozessen wird davon ausgegangen, dass für beide Teilprozesse im wesentlichen die gleichen internen thermischen Vorgänge vorliegen und mit einem gemeinsamen, in der Ordnung erweiterten, homogene Teil der Differentialgleichung abgebildet werden können. Der Schätzalgorithmus wird zur Schätzung des unterschiedlichen partikulären Teils erweitert. Die Anregung des zweiten Teilprozesses erfolgt am Arbeitspunkt durch gleichzeitigen Betrieb von PID-geregeltem Heizen und Zweipunkt-geregeltem Kühlen mit jeweils geringfügig unterschiedlichen Sollwerten.

Im Anschluss an die parametrische Identifikation erfolgt eine Gütebestimmung unter Verwendung abgespeicherter Messdaten. Mit Hilfe eines a-posteriori Luenberger-Beobachters, der nach den analytischen T-Polynom-Ansätzen ([1], [4]) ausgelegt wird, erfolgt ein Abgleich der Modellzustände. Als Gütemaß dient die Varianz des Simulationsfehlers, normiert auf die Anregungsvarianz.

Im dritten Schritt erfolgt die prädiktive Regelung, die den PID-Regler ablöst. Dabei kommt das GPC-Verfahren zum Einsatz, welches zur Vorhersage das in ARIMAX-Form umgewandelte, identifizierte lineare zeitdiskrete Prozessmodell verwendet. Mit diesem Prozessmodell kann aufgrund des differenzierenden Eingangs auf die Schätzung von Offsets verzichtet werden. Die Differentiation des Eingangssignals ist hier unbedenklich, da diese Werte vom Kompaktregler selbst erzeugt werden und damit in ungestörter Form vorliegen.

Die prädiktive Regelung erfolgt beobachtergestützt (T-Polynom-Ansatz) im Zustandsraum. Die Prädiktion des Regelgrößenverlaufs erfolgt unter Verwendung des Zustandsvektors. Dabei wird ein in eine größere Abtastzeit transformiertes Modell verwendet, um die begrenzten Ressourcen zu schonen. Die Regelung selbst arbeitet in wesentlich kleiner Abtastzeit, um schnell auf Störgrößen- oder Führungsgrößenänderungen reagieren zu können.

Im zu minimierenden Gütefunktional wird die für den Bediener sehr anschauliche Gewichtung der Bestrafung von Regelfehler und Stellgrößenänderung berücksichtigt. Unterer und oberer Prädiktionshorizont werden in Abhängigkeit von der in der Vordidentifikation ermittelten Verzugs- und Nachstellzeit bestimmt. Die Berücksichtigung von schaltenden Stellgliedern und Stellgliedbegrenzungen im Gütefunktional führt in der Regel zu einem Optimierungsproblem, welches nur iterativ und/oder durch quadratische Programmierung gelöst werden kann. Aufgrund des hohen und zum Teil nicht vorhersagbaren Rechenaufwandes bleiben die Nebenbedingungen unberücksichtigt. Somit ist das Minimierungsproblem analytisch lösbar. Der prädiktive Regler lässt sich in dieser Form als Zustandsregler mit prädiktivem Entwurfsverfahren interpretieren, der die zukünftigen Führungsgrößen berücksichtigen kann. Die ermittelte Stellgröße wird schließlich auf den Stellbereich begrenzt, bzw. bei schaltenden Stellgliedern durch eine Fallunterscheidung oder durch eine nachgeschaltete Pulsweitenmodulation bestimmt.

## Literatur:

- [1] Clarke, D.W., Mothadi, C., Tuffs, P.S.: *Generalized Predictive Control - Part I and Part II*, Automatica, Vol. 23, No. 2, S.137-160, 1987.
- [2] Jepsen, O.: *Prozeßidentifikation mit der Methode der Adjusted Least Squares*, Fortschr.-Ber. VDI Reihe 8 Nr.312, Düsseldorf, VDI-Verlag 1993
- [3] Krauss, P.: *Prädiktive Regelung mit linearen Prozeßmodellen im Zustandsraum*, Fortschr.-Ber. VDI Reihe 8 Nr.560, Düsseldorf, VDI-Verlag 1996
- [4] Soeterboeck, R.: *Predictive Control - A Unified Approach*, PHD thesis, Delft University of Technology, 1990

# Verschiebungsvektorfelder zur Arealverfolgung in topographischen Meßdaten am Beispiel der menschlichen Hautoberfläche

Dipl.-Ing. Hermann Hopermann

Institut für Automatisierungstechnik  
Universität der Bundeswehr  
Holstenhofweg 85  
22043 Hamburg  
Tel.: 040-6541-2326  
Fax: 040-6541-2719

e-mail: [Hermann.Hopermann@unibw-hamburg.de](mailto:Hermann.Hopermann@unibw-hamburg.de)

**Schlüsselwörter:** Aktive Bildtriangulation, Template Matching, Verschiebungsvektorfelder

Die menschliche Hautoberfläche ist als äußeres und gleichzeitig größtes Organ des menschlichen Organismus vielfältigen Einflüssen ausgesetzt, welche zu einer sichtbaren Veränderung ihrer Topographie führen können. Insbesondere steigende Umweltbelastungen haben oftmals eine verstärkte Trockenheit, frühzeitige Alterung oder gar Erkrankung der Haut zur Folge. Kosmetische aber auch pharmazeutische Produkte sollen diese unerwünschten Einflüsse ausgleichen bzw. verzögern, weshalb die meßtechnische Erfassung und Beschreibung der Topographie der menschlichen Haut seit geraumer Zeit ein Forschungsgegenstand in diesem Industriezweig ist.

Den derzeit in der kosmetischen Industrie am weitesten verbreiteten Ansatz, um die Hautoberfläche einer meßtechnischen Erfassung zugänglich zu machen, stellt die Anfertigung von Silikon-Negativabdrücken, sogenannten Replikaten, dar. Diese werden dann stellvertretend taktil oder optisch mit Tastschnittgeräten bzw. Laserprofilometern vermessen [1]. Die Anfertigung der Replikate erweist sich insbesondere bei hohen Probandenzahlen als sehr zeitaufwendig und ist immer mit einem in aller Regel unbekanntem Informationsverlust verbunden. Es besteht daher der Bedarf nach einem schnellen System zur Vermessung der menschlichen Haut in vivo, d. h. direkt am Probanden.

Im ersten Teil des Vortrages wird ein solches neues System zur in vivo Vermessung der Mikrotopographie der menschlichen Hautoberfläche vorgestellt. Die Grundlage dafür bildet das Prinzip der aktiven Bildtriangulation unter Verwendung von zeitlichen PhaseShift-Algorithmen [2]. Aufgrund der optischen Eigenschaften der menschlichen Haut und dem Ziel möglichst kurzer Meßzeiten wird in dem vorliegenden Meßsystem eine digitale Mikrospiegelmatrix der Firma Texas Instruments als Projektionseinheit verwendet [3]. Diese bietet die Möglichkeit, nahezu beliebige Intensitätsmuster mit 256 Graustufen und einer Frequenz von 180 Hz auf die Objekt Oberfläche abzubilden. So ist es möglich, die für die in vivo Vermessung der Hautoberfläche erforderlichen, sehr kurzen Meßzeiten zu realisieren.

Nach der Messung und Vorverarbeitung erfolgt die eigentliche Auswertung der gewonnenen topographischen Daten. Ziel dabei ist es, die Charakteristik der gemessenen Mikrotopographie quantitativ zu beschreiben und Behandlungseffekte zu erfassen. Sowohl die Berechnung von Rauheits- und Texturkenngößen als auch von weiteren statistischen Parametern sind hierfür geeignete Verfahren [4]. Da über einen Testzeitraum derzeit nicht gewährleistet wer-

den kann, daß exakt identische Areale vermessen werden, ist eine deutliche Varianz in den Parametern auch ohne eine Behandlung zu beobachten. Diese könnte reduziert werden, indem während eines Testzeitraums korrespondierende Areale aufgefunden und zur Auswertung herangezogen werden. Es wurde daher ein Template Matching Algorithmus realisiert, welcher den Verschiebungsvektor für einen Punkt einer Referenzmessung zu dem korrespondierenden Punkt in der Folgemessung durch Minimierung eines Unähnlichkeits-Funktionalen schätzt. Durch Implementierung von bikubischen Interpolationssplines kann dabei eine Subpixelgenauigkeit erreicht werden.

Während eines Testzeitraums muß die zu untersuchende Körperpartie mehrfach unter dem Meßsystem positioniert werden. Darüber hinaus stellt die menschliche Haut ein elastisches Meßobjekt dar. Die Konsequenz ist, daß neben Translation, welche eine über das Areal konstante Verschiebung zur Folge hat, auch Rotation und Deformation, welche ortsveränderliche Verschiebungen hervorrufen, berücksichtigt werden müssen. Die Verschiebungen zwischen einer Referenz- und einer Folgemessung können daher nicht über einen Vektor, sondern müssen über ein Vektorfeld beschrieben werden [5]. Basierend auf o. g. Template Matching Algorithmen und glatten Interpolationsverfahren wird hier eine Methode zur Ermittlung eines solchen Verschiebungsvektorfeldes vorgestellt. Das Ziel, dieses Vektorfeld mit einer sehr hohen Genauigkeit zu ermitteln, steht dabei dem Streben nach einer Minimierung des numerischen Aufwandes entgegen. Durch einen pyramidalen Algorithmus wird im vorliegenden Fall beiden Aspekten Rechnung getragen.

In Untersuchungen von Meßreihen, welche sowohl auf Replikaten als auch auf der menschlichen Haut in vivo durchgeführt wurden, erweist sich das entwickelte Verfahren als sehr leistungsfähig. Mittels der berechneten Verschiebungsvektorfelder können korrespondierende Areale in Referenz- und Folgemessung ermittelt werden. Verschiebungen wie Rotation und Deformation werden durch das Verfahren erfaßt und können visualisiert werden. Die vorgestellte Methode zur Arealverfolgung in topographischen Meßdaten ist vom Ansatz her nicht auf die menschliche Haut beschränkt. Sie kann sowohl auf synthetische elastische Oberflächen wie Textilfasern, Gummi oder Kunststoff als auch auf andere biologische Oberflächen übertragen werden.

### **Literatur:**

- [1] Schröder, A.: Ein Beitrag zur meßwertgestützten Modellbildung der Oberfläche menschlicher Haut, Dissertation, Universität der Bundeswehr, 1998, Hamburg.
- [2] Srinivasan, V.; Liu, H. C.; Halioua, M.: Automated phase-measuring profilometry of 3-D diffuse objects, Applied Optics, 1984, 3105 – 3108.
- [3] Younse, Jack M.: Mirrors on a chip, IEEE Spectrum, Nov. 1993, 27-31.
- [4] Müller, U.: Strukturuntersuchungen der menschlichen Hautoberfläche, Dissertation, Universität der Bundeswehr, 1995, Hamburg.
- [5] Jähne, B.: Digitale Bildverarbeitung, 2. Auflage, SpringerVerlag, 1991, Berlin.

# Regelungskonzepte für Schwingungsprüfstände

J. Pfeiffer\*

U. Konigorski\*\*

\* Institut für Elektrische Informationstechnik  
Technische Universität Clausthal  
Leibnizstraße 28, 38678 Clausthal-Zellerfeld  
Tel.: +49/5323/722629  
Fax: +49/5323/723197  
Email: pfeiffer@iei.tu-clausthal.de

\*\* Institut für Elektrische Informationstechnik  
Technische Universität Clausthal  
Leibnizstraße 28, 38678 Clausthal-Zellerfeld  
Tel.: +49/5323/723129  
Fax: +49/5323/723197  
Email: koni@iei.tu-clausthal.de

**Schlüsselwörter:** Zustandsregelung, prädiktive Regelung, Betriebsfestigkeit

In den letzten Jahren haben sich die immer höheren Anforderungen an mechanische Bauteile derart ausgewirkt, daß auch wesentlich umfangreichere und komplexere Versuche zur Betriebsfestigkeit notwendig wurden. Im Rahmen dieses Beitrags sollen zwei Regelungskonzepte für hydraulische Schwingungsprüfstände vorgestellt werden, die den erhöhten Anforderungen gerecht werden und die Versuchsdauer erheblich reduzieren können. An einem Beispielprozeß wird die Grundproblematik aufgezeigt und eine Gegenüberstellung von amplitudenadaptiver PID-Regelung, Zustandsregelung sowie prädiktiver Regelung vorgenommen.

Die amplitudenadaptive Regelung stellt das derzeit gängige Verfahren zur Prüfstandsregelung dar. Sie basiert auf PID-Reglern für jeden Belastungsstrang, erweitert um überlagerte PI-Regler zur Sollwertmodifikation [1]. Sie gilt als grundlegender Vergleichsprozess für die folgenden Regelungen.

Die Modellfolgeregelung auf Basis eines Entkopplungsentwurfes mit Polvorgabe stellt dem eine zeitgemäße Zustandsregelung gegenüber (Abb. 1). Sie zeigt, welche Ergebnisse mit modernen Entwurfsverfahren erzielbar sind [2].

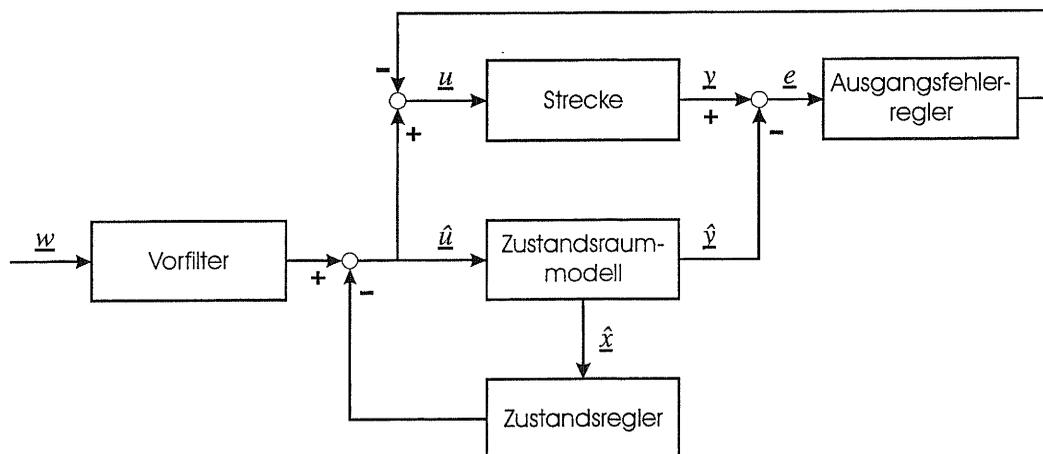


Abbildung 1: Modellfolgeregelung

Die prädiktive Regelung bzw. Steuerung dagegen ist ein speziell an den nichtlinearen Charakter der Prüfstandsdynamik angepaßtes Regelungskonzept (Abb. 2). Ausgehend von dem Streckenmodell wird der Prüfstand so geregelt, wie es insbesondere für grundlegende Betriebsfestigkeitsuntersuchungen erforderlich ist. Es gilt dabei weniger, die exakte Kurvenform einzuhalten, als vielmehr die Sollamplituden unter definiertem Phasenwinkel zu erreichen. Unter diesen Voraussetzungen sind ausgesprochen hohe Prüffrequenzen erzielbar [3].

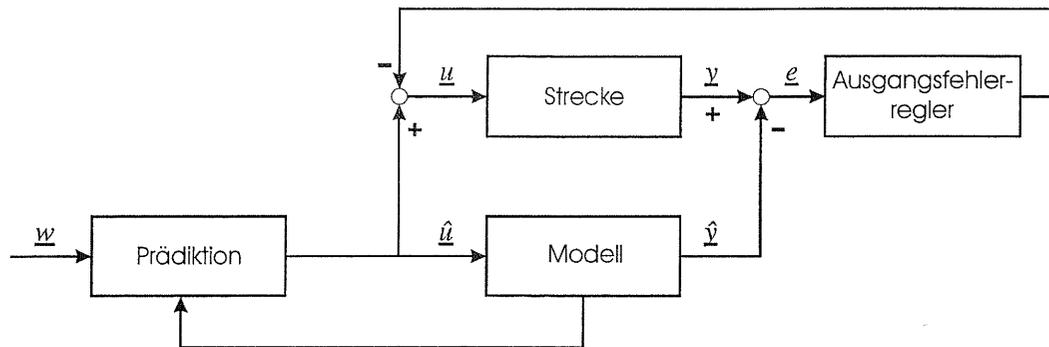


Abbildung 2: prädiktive Regelung

Beiden Verfahren ist gemein, daß sie zum einen für eine breites Spektrum an Prüfständen eingesetzt werden können, zum anderen, daß sie sich ohne großen technischen Aufwand auch nachträglich implementieren lassen.

### Literatur:

- [1] TP Data: MASLINK V1.011, TP Data Ltd, 22 Durnsford Avenue, Sleet Haunts GU13 9 TB, England
- [2] Pfeiffer, J.: Ein Regelungskonzept für komplexe hydraulische Schwingungsprüfstände, GMA-Kongreß Meß- und Automatisierungstechnik Ludwigsburg 1998, VDI Berichte 1397, 357-364.
- [3] Pfeiffer, J.; Söffker, C.: Predictive Control of Bounded First Order System, Novel Intelligent Automation and Control Systems Vol. I, America Latina Formación Académica (1998), Clausthal-Zellerfeld, 179-190.

# Eine neue Methode zur nichtinvasiven Messung von Steifigkeitskoeffizienten an lebendem Gewebe mit multimodalen, bildgebenden Verfahren

H. Maaß \*

\* Institut für Angewandte Informatik  
Forschungszentrum Karlsruhe  
Postfach 3640, 76021 Karlsruhe  
Tel.: +49/7247/82-2269  
Fax: +49/7247/82-5786  
Email: maass@iai.fzk.de

**Schlüsselwörter:** Modellbildung, bildgebende Verfahren, Medizintechnik.

Für die zerstörungsfreie Messung der Schallgeschwindigkeit biologischen Gewebes wurden nichtinvasive Meßmethoden mit bildgebenden, medizinischen Diagnosesystemen entwickelt [1]. Zur Durchführung wurde eine Meßanordnung eingerichtet, die aus einer Kombination aus einem Ultraschallsystem, einem Positionserfassungssystem und Graphikhardware bestand, und entsprechende Software entwickelt. Die Schallgeschwindigkeiten der Niere und der Leber wurden mit der Anordnung zur nichtinvasiven Messung am lebenden Menschen bestimmt. Ein Programm zur Simulation der Ausbreitung von Ultraschall ist im Rahmen dieser Arbeit für die Untersuchung der nichtinvasiven Meßmethode und die Sammlung von Erfahrungen im Umgang mit echographischen Techniken in biologischen Medien entwickelt worden. Das Programm liefert Erkenntnisse in der Bildgewinnung mit Ultraschall in Impulstechnik. Die für ein akustomechanisches Modell [2][3] relevanten Materialeigenschaften wurden an tierischem Gewebe mit verschiedenen Prüfaufbauten ermittelt. Eine Prüfeinrichtung wurde mobil gestaltet, sodaß Messungen während des Schlachthofbetriebs an frisch geschlachteten Tieren und an lebenden Tieren im experimentellen Tier-Operationssaal an Organen in natürlicher Lage möglich waren. Dazu wurde im Rahmen dieser Arbeit ein tragbares Meßsystem für die gleichzeitige Messung der elastischen Eigenschaften und der Schallgeschwindigkeit entwickelt und gebaut. Eigens dafür wurden ein Ultraschallgerät und eine Meßwertkarte für den Parallelport eines PCs konstruiert und Software zur Datenerfassung und -aufbereitung erstellt. Für die Auswertung, die Parametrisierung und die Korrelationsanalyse der Meßwerte wurden spezielle Microsoft-Excel Makromodule programmiert. Es wurde eine große Zahl von Experimenten an tierischem Gewebe durchgeführt. Die mechanischen und akustischen Materialparameter wurden gleichzeitig gemessen und miteinander verglichen. Die Proben stammten hauptsächlich von inneren Organen von Schweinen. Die Gewebeproben zeigten im einaxialen Druckversuch nichtlineares, rheonomes Materialverhalten, ohne daß ein Einfluß der hier applizierten kleinen Belastungsgeschwindigkeiten zu erkennen war. Sämtliche Kennlinien konnten durch einen unteren linearen Teilbereich bis 15% Stauchung und einem organspezifischen, durch ein Polynom 3. Grades zu beschreibenden, oberen Teilbereich charakterisiert werden. Die mit den Prüfaufbauten zur gleichzeitigen Bestimmung der elastischen Eigenschaften gemessenen Schallgeschwindigkeiten sind ähnlich zu den in der Literatur angegebenen Werten. Mit den in dieser Arbeit eingesetzten Prüfeinrichtungen und -methoden und der getroffenen Auswahl der Proben ist kein allgemeiner Zusammenhang zwischen Schallgeschwindigkeit und elastischen Eigenschaften zu erkennen gewesen. Die gemessenen biomechanischen Materialparameter wurden in eine bereits bestehende Software zur elastodynamischen Gewebesimulation [4][5] eingesetzt.

## Literatur:

- [1] Maaß, H. : Untersuchung einer Methode zur nichtinvasiven Messung von Steifigkeitskoeffizienten an lebendem Gewebe mit multimodalen bildgebenden Verfahren, Dissertation, Universität Karlsruhe (1999), *Wissenschaftliche Berichte FZKA 6279*, Forschungszentrum Karlsruhe.
- [2] Fung, Y.C.: "Biomechanics: Mechanical Properties of Living Tissue", *Springer*, 2nd Edition, (1993).
- [3] Duck, F.A.: "Physical Properties of Tissue - A Comprehensive Reference Book", *Academic Press*, (1990).
- [4] Kühnapfel, U., Kuhn, Ch., Hübner, M., Krumm, H.G., Maaß, H., Neisius, B.: The Karlsruhe Endoscopic Surgery Trainer as an example for Virtual Reality in Medical Education, *Minimally Invasive Therapy and Allied Technologies (MITAT) 6*, Blackwell Science Ltd. (1997) , 122-125.
- [5] Kuhn, C., Kühnapfel, U., Krumm, H.-G.: A 'Virtual Reality' based Training System for Minimally Invasive Surgery, *Proc. Computer Assisted Radiology (CAR '96)*, Paris, June (1996), 764-769.

# Eine Anwendung modellgestützter prädiktiver Regelung zur Wasserbewirtschaftung des Mittellandkanals und des Elbe-Seiten-Kanals

H. Linke \*

E. Arnold \*\*

H. Puta \*

\* Fachgebiet Dynamik und Simulation  
ökologischer Systeme  
Technische Universität Ilmenau  
Postfach 100565, 98684 Ilmenau  
Tel.: +49/3677/691423  
Fax: +49/3677/691415  
Email: {Hartmut.Linke,Horst.Puta}  
@systemtechnik.tu-ilmenau.de

\*\* Fraunhofer-IITB  
Anwendungszentrum Systemtechnik  
Ehrenbergstr. 11, 98693 Ilmenau  
Tel.: +49/3677/668625  
Fax: +49/3677/668626  
Email: Eckhard.Arnold@fhg-ast.tgz-ilmenau.de

**Schlüsselwörter:** Prädiktive Regelung, Saint-Venant-Gleichungen, SQP-Verfahren

Das Prinzip der modellgestützten prädiktiven Regelung besteht in der Nutzung eines (nichtlinearen) Modells zur Vorhersage des zukünftigen Prozeßverhaltens. Die Berechnung der Steuergrößen für einen festgelegten Zeithorizont erfolgt entsprechend vorgegebener Güteforderungen und Beschränkungen hinsichtlich der Prozeßvariablen. Prädiktive Regler werden seit ersten Entwicklungen zu Beginn der siebziger Jahre vielfältig eingesetzt [4], sind jedoch aufgrund des Aufwands zur Bestimmung der Steuerwerte (Lösen eines Optimalsteuerungsproblems) nur für hinreichend träge Prozesse geeignet.

Die kurz dargestellte Methodik wird zur Wasserbewirtschaftung eines für die deutsche Binnenschifffahrt wichtigen Kanalsystems, des Mittellandkanals und des Elbe-Seiten-Kanals, angewendet [1]. Dieses System besteht als Teil der Verbindung zwischen den Flußgebieten von Rhein und Elbe aus vier Kanalhaltungen mit einer Gesamtlänge von ca. 430 km. Die Wasserbilanz des Systems wird durch den Wasseraustausch zwischen Haltungen des Kanalsystems bzw. zwischen dem Kanalsystem und Flüssen infolge des Schleusenbetriebes dominiert. Das primäre Ziel der Wasserbewirtschaftung besteht in der Sicherung der Betriebsbereitschaft des Kanalsystems. Hierzu sind zum Teil sehr restriktive Grenzwerte für den Wasserstand mittels einer geeigneten Pumpen- und Entlastungsstrategie (Steuergrößen) einzuhalten. Ausgehend vom aktuellen Zustand ist die Bewirtschaftungsstrategie dabei in Abhängigkeit von vorhergesagten äußeren Einflußgrößen (Schleusungswassermengen, Wind) und der zeitvarianten Elektroenergietarifstruktur der Pumpwerke (Energiekostenminimierung) zu bestimmen.

Die Modellierung der instationären Fließvorgänge im Kanalsystem erfolgt mittels eines strukturtreuen Prozeßmodells auf Basis der Saint-Venant-Gleichungen (nichtlineares partielles Differentialgleichungssystem zur Beschreibung der Erhaltung von Masse und Impuls im System). Dieser aufwendige Modellansatz ist erforderlich, da es bei starkem Wind zu einer die Schifffahrt gefährdenden Schrägstellung des Wasserspiegels im Kanal kommen kann, welcher durch geeignete Steuerentscheidungen Rechnung getragen werden muß. Neben externen Zuflüssen werden im Modell auch die Reibung zwischen Kanalwand und Fluid sowie die durch Windlast hervorgerufene Schubspannung berücksichtigt. Die numerische Lösung erfolgt nach örtlicher und zeitlicher Diskretisierung mit der Godunov-Methode [3], einem expliziten Upwind-Verfahren (Schrittweite ca. 12 km bei einem Zeitschritt von 30 min).

Die Steuerung resultiert aus der Lösung eines zeitdiskreten Optimalsteuerungsproblems. Das Gütefunktional beinhaltet die Elektroenergiekosten für den Pumpenbetrieb (reale

Bewirtschaftungskosten), Terme zur Regularisierung der Steuerung sowie fiktive Entlastungskosten (Selektion zwischen fernsteuerbaren und handbetriebenen Anlagen). Beschränkungen bestehen für den Wasserstand und das Volumen (mittlerer Wasserstand) der Haltungen sowie für die Steuergrößen. Die Zulässigkeit des Optimalsteuerungsproblems wird durch Behandlung der Wasserstandsvorgaben als weiche Beschränkungen gesichert. Das zeitdiskrete Optimalsteuerungsproblem wird in ein sehr großes, nichtlinear beschränktes Optimierungsproblem in den Zustands- und Steuervariablen umgewandelt (ca. 3900 Variable, 1800 Gleichungs- und 4200 Ungleichungsbeschränkungen). Die numerische Lösung erfolgt mit dem Verfahren der sequentiellen quadratischen Programmierung (SQP), wobei in jeder Iteration eine linear-quadratische Approximation des nichtlinearen Problems zur Bestimmung der Suchrichtung verwendet wird. Ein Interior-Point-Verfahren, welches sich aufgrund polynomialer Berechnungskomplexität besonders für Problemstellungen mit sehr vielen Ungleichungseinschränkungen eignet, wird zur Lösung des QP-Problems eingesetzt [5]. Durch Ausnutzung der Struktur wird eine lineare Abhängigkeit des numerischen Lösungsaufwands vom Optimierungshorizont erreicht [2]. Die wertkontinuierliche Steuerstrategie wird nachfolgend in Anzahl und Laufzeit zu betreibender Pumpen umgesetzt, wobei Forderungen nach einer Mindestlaufzeit Rechnung getragen wird.

Die Adaption der Steuerstrategie an den realen Prozeßzustand sowie die aktuellen Prognosen erfolgt nach jeweils 2 h. Hierzu wird zuerst der Zustand des Kanalsystems unter Nutzung von Pegel- und Windmeßwerten (ca. 30 Meßstellen) über den Zeitraum der vergangenen 6 h mittels eines least-squares-Verfahrens bestimmt. Innerhalb der Zustandsschätzung wird weiterhin ein globaler Zuflußparameter für jede Haltung ermittelt, um den aktuellen Einfluß nicht gemessener Bilanzkomponenten wie Versickerung, Verdunstung oder Niederschlag zu erfassen.

Nach dem erfolgreichen, verschiedene Betriebssituationen umfassenden simulativen Test des entwickelten Regelungsverfahrens wird die Wasserbewirtschaftung des Kanalsystems seit Juni 1998 unter Nutzung der durch den prädiktiven Regelalgorithmus berechneten Steuerstrategien durchgeführt. Im Ergebnis jeder Bewirtschaftungsrechnung werden dem Bediener des Prozeßleitsystems Entscheidungsvorschläge zur Verfügung gestellt, die nach dessen Bewertung zu realisieren sind.

## Literatur

- [1] E. Arnold, H. Linke, und W. Siebert. Ein modell-prädiktives Regelungsverfahren zur optimierten Wasserbewirtschaftung des Mittellandkanals und des Elbe-Seitenkanals. *at*, Seiten 399–407, September 1999.
- [2] E. Arnold, P. Tatjewski, und P. Wołochowicz. Two methods for large scale nonlinear optimization problems and their comparison on a case study example of hydropower optimization. *Journal of Optimization Theory and Applications*, 81(2):221–248, 1994.
- [3] R. J. LeVeque. *Numerical Methods for Conservation Laws*. Birkhäuser Verlag, 1992.
- [4] S. J. Quin und T. A. Badgwell. An overview of nonlinear model predictive control applications. In *Nonlinear MPC Workshop*, Ascona, Switzerland, 1998.
- [5] C. V. Rao, S. J. Wright, und J. B. Rawlings. Application of interior-point methods to model predictive control. Preprint anl/mcs-p664-0597, Mathematics and Computer Science Division, Argonne National Laboratory, 1997.

# Beitrag zur Regelung der neuromuskulären Blockade

O. Simanski\*, W. Drewelow\*, B. Lampe\*,  
R. Hofmockel\*\*, B. Pohl\*\*

\*Institut für Automatisierungstechnik,

\*\*Klinik und Poliklinik für Anästhesiologie und Intensivtherapie,  
Universität Rostock

## 1 Einleitung

Bei der Allgemeinanästhesie handelt es sich um einen reversiblen, in den einzelnen Regionen unterschiedlich stark ausgeprägten Lähmungszustand des zentralen Nervensystems, der mit Bewußtseinsverlust, Schmerzfreiheit, Muskelentspannung und Reflexdämpfung einhergeht [1]. Die Muskelentspannung, im folgenden als Muskelrelaxation bezeichnet, schafft die erforderlichen Arbeitsbedingungen für den Chirurgen. In Abhängigkeit vom Grad der Muskelentspannung (Grad der neuromuskulären Blockade) injiziert der Anästhesist die erforderliche Menge an Muskelrelaxans (Medikament zur Muskelentspannung) in Form von Bolusgaben. Durch die Einführung immer kürzer wirkender Muskelrelaxanzien ist ein Übergang von der Bolusinjektion zur kontinuierlichen Applikation der Relaxanzien erforderlich. Eine wesentliche Voraussetzung dafür ist die klinisch praktikable und sichere Überwachung der neuromuskulären Blockade.

Für die intraoperative Erfassung der neuromuskulären Blockade stehen nur wenige den Anforderungen entsprechende Meßgeräte zur Verfügung. In einer Kooperation mit der Firma MesSen Nord GmbH wurde ein neues Meßsystem entwickelt. Relaxometrische Meßverfahren sind die Elektromyographie (EMG), die Acceleromyographie (AMG) und die Mechanomyographie (MMG). Während bei der Elektromyographie die biphasischen Summenaktionspotentiale unmittelbar vor Muskelkontraktion gemessen werden, zeichnet die MMG die Kraft und die AMG die Beschleunigung, z.B. des Daumens, auf.

Das entwickelte Meßsystem bildet die Grundlage für die Regelung des neuromuskulären Blockadegrades.

## 2 Realisierung

Mit dem entwickelten Meßsystem ist es möglich, die drei Meßverfahren EMG, AMG und MMG simultan einzusetzen und die Ergebnisse entsprechend quantitativ zu vergleichen [3]. Dazu wurden neben dem kommerziellen Beschleunigungssensor auch ein biaxialer Sensor und ein Miniatorsensor für die AMG eingesetzt. Aufgrund der erschwerten Handhabung ist das Standardverfahren Mechanomyographie nicht für den klinischen Alltag geeignet. Eine klinische Studie [3] hat gezeigt, daß die Acceleromyographie

myographie mit geeigneten Sensoren gleichwertig zur Mechanomyographie ist. Der Einsatz der AMG für die Regelung ist noch zu verifizieren. Das entwickelte Meßsystem ermöglicht eine online Darstellung der gemessenen Signale. Mit supramaximalen Impulsen erfolgt die Stimulation des Nervus ulnaris [4]. Der Grad der neuromuskulären Blockade wird durch die Muskelreaktion repräsentiert. Es wird die Single-Twitch-Stimulation mit Einzelimpulsen im Abstand von 12 Sekunden eingesetzt.

Ziel der intraoperativen Regelung des Relaxationsgrades war die Einstellung des Blockadeniveaus von 90 %. Dieses Blockadeniveau sollte auch bei auftretenden chirurgischen und Bewegungsartefakten, welche zu deutlichen Störungen in den Meßsignalen führen, weitgehend gehalten werden. Als Meßwert der Regelgröße wird das EMG-Signal eingesetzt. Unter Anwendung der Pharmakokinetik und der Pharmakodynamik kann die Wechselwirkung zwischen der Relaxansdosis und dem Effekt der neuromuskulären Blockade beschrieben werden. Für die Regelung wurde ein vereinfachtes dynamisches Modell eingesetzt.

Wegen der starken Individualität der Patienten und der möglichen intraoperativen Veränderungen des Patientenverhaltens hinsichtlich Totzeit und Dynamik wurde unter anderem eine adaptive Regelung unter Verwendung des Generalised Predictive Controllers (GPC) [2] implementiert. Hierbei wird dem GPC in jedem Abtastschritt ein aktualisiertes Patientenmodell übergeben. Dieses Modell wird mittels online Parameterschätzung laufend aktualisiert.

### 3 Vortrag

Im Vortrag werden die eingesetzte Meß- und Regelungskonzepte beschrieben, sowie Ergebnisse der Simulation und der klinischen Praxis präsentiert. Gleichzeitig soll ein Einblick in die gegenwärtige Forschungsarbeit an diesem Thema gegeben werden.

### Literatur

- [1] G. Benad and M. Schädlich. *Grundriß der Anästhesiologie*. Verlag Volk und Gesundheit, Berlin, 3 über. edition, 1987.
- [2] D.W. Clarke, C. Mothadi, and P.S. Tuffs. Generalised Predictive Control - Part I and II. *Automatica*, 23:137–160, 1987.
- [3] R. Hofmockel. *Quantitatives neuromuskuläres Monitoring mit simultaner Anwendung der Mechano-, Elektro- und Acceleromyographie*. Habilitationsschrift, Universität Rostock, Medizinische Fakultät, Klinik und Poliklinik für Anästhesiologie und Intensivtherapie, 1997.
- [4] O. Simanski, W. Drewelow, B.P. Lampe, R. Hofmockel, and B. Pohl. Ein System zur Regelung der Relaxation. In *AUTOMED'99 Beiträge zum Workshop "Automatisierungstechnische Verfahren in der Medizin"*, volume 17 Biotechnik/Medizintechnik Nr.183 of *Fortschritt-Bericht VDI*, pages 39–40, Darmstadt, 25.02.-26.02. 1999.

# Flachheitsbasierte Folgeregelung eines Platte-Kugel-Systems

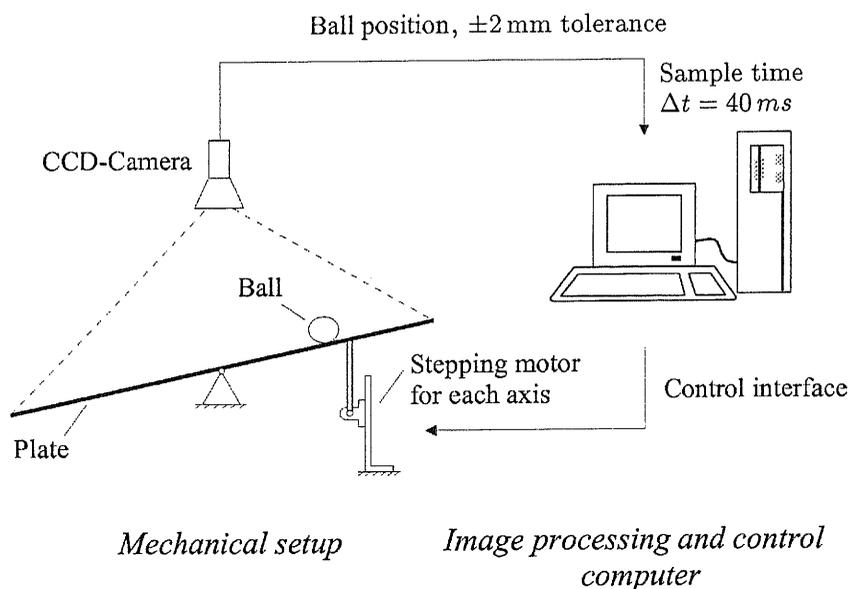
T.Meurer, F.Marquardt, M.Zeitz

Institut für Systemdynamik und Regelungstechnik, Universität Stuttgart  
Pfaffenwaldring 9, 70569 Stuttgart  
Tel.: +49/711/685-6313,-6306, Fax: +49/711/685-6371  
Email: {meurer, flynn, zeitz}@isr.uni-stuttgart.de

**Schlüsselwörter:** Flachheit, nichtlinearer Folgeregler, nichtlinearer Folgebeobachter, Benchmark-Experiment

Das in Abb.1 dargestellte Kugel-Platte-System ist als Benchmark-Experiment für den Einsatz und die Demonstration neuer regelungstechnischer Methoden besonders geeignet. Einerseits stehen für dieses instabile System unterschiedlich komplexe lineare und nichtlineare Modelle für den Reglerentwurf zur Verfügung. Andererseits kann die Güte einer untersuchten Stabilisierung oder Regelung durch die Bewegung der Kugel auf der Platte sehr gut veranschaulicht und beurteilt werden. Bei dem in Stuttgart aufgebauten

Abbildung 1:  
Versuchsaufbau [3]



Kugel-Platte-System wird die Neigung der beiden Plattenachsen über zwei Schrittmotoren verstellt. Die messtechnische Bestimmung der Kugelposition auf der Platte erfolgt mit Hilfe einer CCD-Kamera und einer Bildverarbeitung in dem angeschlossenen Rechner. In dem Rechner wird auch der jeweils untersuchte Regler in Realzeit implementiert [2].

In diesem Beitrag werden Entwurf, Simulation und Experiment einer flachheitsbasierten Folgeregelung auf der Grundlage zweier nichtlinearer kinematischer Modelle 8. Ordnung für das Kugel-Platte-System vorgestellt [3]. Dabei wird die bei mechanischen Systemen häufig anzutreffende Eigenschaft der Flachheit ausgenutzt und die Dynamik der Regelung - wie bei der in der Robotik bekannten "Methode der berechneten Momente (computed torque)" - mit linearen Methoden dimensioniert [1], [4], [5]. Mit Hilfe des nichtlinearen Folgereglers soll die Kugel beispielsweise entlang einer Sequenz von spiral- und kreisförmigen Bahnen auf der Platte bewegt werden, wie dies in Abb.2 anhand von gemessenen Bahnkurven dargestellt ist.

Die im einzelnen erläuterten Entwurfsschritte betreffen die Flachheitsanalyse der nichtlinearen Kinematik-Modelle, den Entwurf der nichtlinearen Folgeregelung, die Dimensionierung der zeitvarianten Verstärkung des nichtlinearen Folgebeobachters sowie die Implementierung von Regler und Beobachter. Um die Leistungsfähigkeit der entworfenen Folgeregelung zu unterstreichen, wurde diese in Simulationen und im Experiment untersucht und mit einem linearen Folgeregler verglichen. Die in Abb.2 gezeigten Messungen der Kugelbewegung auf der Platte belegen, dass die Folgeregelung für geometrisch schwierige Sollbahnen auch trotz der quantisierten Mess- und Stellsignale recht robust funktioniert.

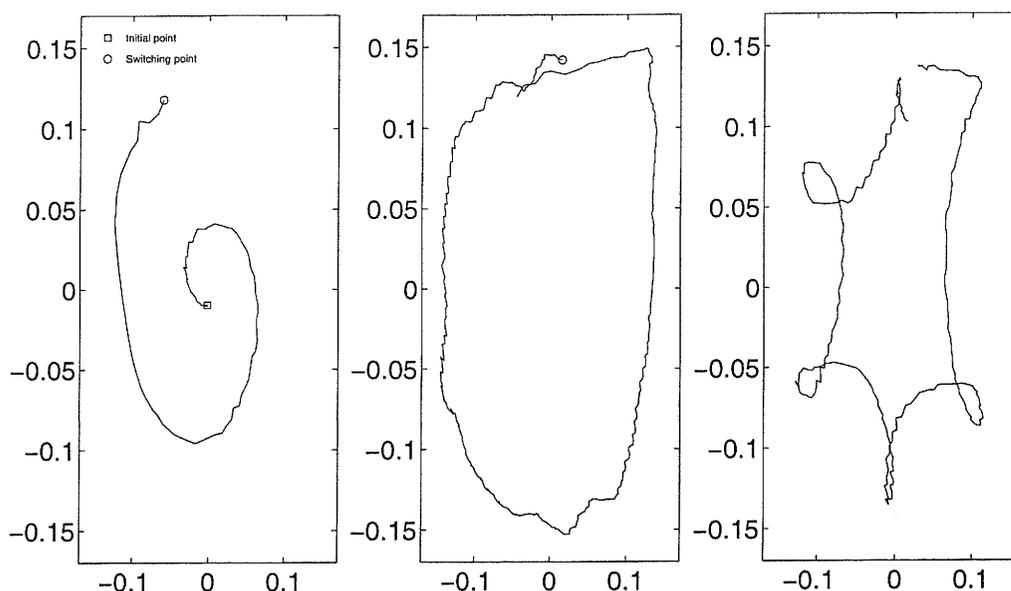


Abbildung 2: Gemessene Bahnkurven der geregelten Kugelbewegung bei einer Sequenz von Spirale, Kreis und Trochoide als Sollbahn [3].

## Literatur

- [1] Fliess, M.; Lévine, J.; Martin, P.; Rouchon, P.: Flatness and defect of nonlinear systems: Introductory theory and examples. *International Journal of Control* 61 (1995), 1327-1361.
- [2] Marquardt, F.: Konzeption und Bildverarbeitung für den Praktikumsversuch "Lageregelung einer Kugel auf einer Ebene". Diplomarbeit, Universität Stuttgart 1995.
- [3] Meurer, T.; Marquardt, F.; Zeitz, M.: Flatness based tracking control of a ball and plate system. In: Kecskemèthy, A., Schneider, M., Woernle, C. (Edits.): *Proceedings "Advances in Multibody Systems and Mechatronics"*, Gerhart-Mercator-Universität Duisburg, 25. September 1999, Hochschülerschaft TU Graz GmbH 1999, 297-308.
- [4] Rothfuß, R.: Anwendung der flachheitsbasierten Analyse und Regelung nichtlinearer Mehrgrößensysteme. *Fortschritt-Berichte Nr. 8/664*, VDI-Verlag 1997.
- [5] Rothfuß, R.; Rudolph, J.; Zeitz, M.: Flachheit: Ein neuer Zugang zur Steuerung und Regelung nichtlinearer Systeme. *Automatisierungstechnik* 45 (1997), 517-525.

# Optimierung von Fuzzy-Systemen mittels Evolutionsstrategien unter Verwendung von Lerndatensätzen

A. Nabout

Lehrstuhl für Automatisierungstechnik / Regelungstechnik (Univ.- Prof. Dr.-Ing. B. Tibken)  
 Bergische Universität-GH Wuppertal, FB 13  
 Fuhlrottstrasse 10, 42097 Wuppertal  
 Tel.: +49/202/439-3817  
 Fax: +49/202/439-2953  
 Email: [nabout@uni-wuppertal.de](mailto:nabout@uni-wuppertal.de)

**Schlüsselwörter:** Fuzzy-Systeme, Optimierungsmethoden, Evolutionsstrategien

Fuzzy-Systeme werden mit dem Ziel eingesetzt, für eine gegebene Situation die bestmögliche Aktion durch Auswertung von Fuzzy-Regeln auszuführen. Die Fuzzy-Regeln (WENN Prämisse DANN Schlußfolgerung) werden häufig aus Expertenwissen abgeleitet oder mit Hilfe von Lerndaten unter Verwendung von Neuronalen Netzen (Neuro-Fuzzy) bzw. mittels heuristischer Methoden generiert. Einen entscheidenden Einfluß auf das Verhalten eines Fuzzy-Systems haben dabei die Fuzzy-Sets (FS) am Ein- und Ausgang des Systems.

Geht man davon aus, daß für eine vorgegebene Aufgabe die Anzahl, die Lage und der Überlappungsgrad der FS's am Ein- und Ausgang des Systems grob bekannt sind, so kann die Aufgabe des Auffindens von geeigneten FS's als ein Optimierungsproblem aufgefaßt und mit Hilfe von Evolutionsstrategien (ES) [1] unter Verwendung von Lerndatensätzen gelöst werden.

Da die Chromosomen in den Evolutionsstrategien Vektoren reeller Zahlen sind und die Lage und Form der FS's durch reelle Parameter beschrieben werden, läßt sich die Codierung von linguistischen Variablen durch Chromosome und ihre FS's durch Gene realisieren. Ein Individuum ist eine Zusammenfassung dieser Chromosomen und entspricht demnach einem Fuzzy-System. Dieser Zusammenhang ist in Abbildung 1 exemplarisch dargestellt.

Die in Abbildung 1 verwendeten Abkürzungen stehen für die linguistischen Ein- und Ausgangsvariablen  $X_1, \dots, X_M, Y_1, \dots, Y_N$  sowie für die Parameter der trapezförmigen Fuzzy-Sets  $LB_{ij}$  = left bottom,  $LT_{ij}$  = left top,  $RT_{ij}$  = right top,  $RB_{ij}$  = right bottom) und Singletons ( $b_{ij}$ ).

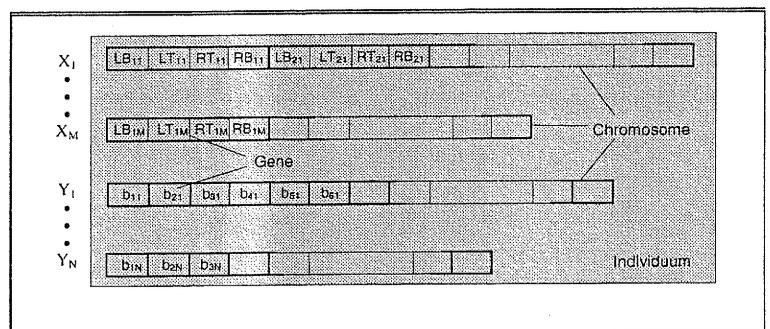


Abbildung 1: Fuzzy-System als Individuum

Die Qualität eines Individuums wird durch den mittleren quadratischen Fehler ausgedrückt, welcher sich aus den Differenzen der vorgegebenen Ausgangswerte  $y_i$  zu den Systemausgangswerten  $f_{FS}(x_i)$  ergibt.

$$Q = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^D |d_i|^2}{N \cdot D}}; d_{ni} = \frac{f_{FSn}(x_i) - y_{ni}}{\max(Y_n) - \min(Y_n)}, n = 1 \dots N.$$

Q = Qualität, N = Anzahl der Ausgangsvariablen  $Y_n$ , D = Größe des Lerndatensatzes,  $f_{FSn}(\underline{x}_i)$  = n-te Komponente von  $f_{FS}(\underline{x}_i)$  (Istausgangswert),  $y_{ni}$  = Sollausgangswert.

Die Mutation der Chromosomen wird nicht wie gewöhnlich durch die Verwendung normalverteilter Zufallszahlen  $N(0, \sigma)$  realisiert, sondern der Einfachheit halber durch Zufallszahlen mit dreieckförmiger Verteilung  $\Lambda(0, \sigma)$ .

Die Realisierung der adaptiven Schrittweitenregelung wird durch Veränderung der Streuung der zu generierenden Zufallszahlen in Abhängigkeit von dem aktuellen Erfolg der Suche erzielt. Der Sucherfolg S wird in den hier verwendeten  $(1+\lambda)$ -ES nach der Formel

$$S_{g+1} = I \cdot S_g + (1-I) \cdot \frac{\lambda_s}{\lambda} \quad ; S_0 = 0.2 ; I \in [0,1]$$

berechnet. Das Maß für den Erfolg ergibt sich also als gleitender Mittelwert aus dem bisherigen Erfolg  $S_g$  und dem Erfolg  $\lambda_s/\lambda$  der aktuellen Generation g.  $\lambda_s$  ist dabei die Anzahl der Nachkommen, welche eine bessere Qualität aufweisen. I ist ein konstant vorzugebender Parameter, der die Trägheit (engl. inertia) bestimmt, mit dem auf eine Veränderung des Erfolges reagiert wird.

In diesem Beitrag werden an Hand eines automatisch generierten Fuzzy-Systems, welches den Verlauf einer chaotischen Zahlenfolge approximiert, zwei Evolutionsstrategien auf ihre Eignung zur Optimierung von Eingangs- und Ausgangs-FS's untersucht. Diese sind die  $(1+\lambda)$ -ES [2], welche ein Eltern sowie  $\lambda$  Kinder in dem Evolutionsprozeß berücksichtigt und  $(1,\lambda)$ -ES [3], bei der lediglich die Kinder für die Bewertung herangezogen werden, mit  $\lambda = 1 \dots 20$ .

Die ES-Optimierung wird ebenfalls für das Fuzzy-Modell eines diskontinuierlichen Schaufelkneters, welcher in der Chemieindustrie zur Herstellung von Siliconmasse verwendet wird, gezeigt [4]. Weiterführende Arbeiten im Bereich der Datenverwaltung in einem Web Browser werden kurz vorgestellt [5].

## Literatur:

- [1] Rechenberg I., Evolutionsstrategie, Friedrich Frommann Verlag Stuttgart, 1972.
- [2] Abou-Nabout, A.; Fischer, F.; Nour Eldin, H.A.; Automated Generation of Fuzzy Rule Base for Complex System Modelling with Experimental Verification for Turbogenerators“ Proc. of the 15th IMACS World Congress, Berlin, Germany, August 24-29, 1997, Vol. IV, pp. 419-424.
- [3] Schwefel H.-P., Evolutionsstrategie und numerische Optimierung (Dissertation), Technische Universität Berlin Mai 1975.
- [4] Abou-Nabout, A.; Automatische Fuzzy Modellierung dynamischer Prozesse höherer Ordnung mittels Mehrfachrückführung, 43. Internationales Wissenschaftliches Kolloquium- IWK '98; Ilmenau, 21.-24.9.1998.
- [5] Lekova, A.; Abou-Nabout, A.; Boyadjiev, D.; A Web Learning Agent for Querying the Server Databases, Proc. Of the 14th ISCIS Symposium, Kusadasi, Turkey, October 18-20, 1999, pp. 66-73.

# Regelungskonzept für nichtlineare Strecken auf der Grundlage linearer parameterveränderlicher (LPV-) Systeme

Steffen Sommer

Lehrstuhl für Regelungstechnik  
Institut für Automatisierungstechnik  
Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg  
Uni-Platz 2, 39106 Magdeburg  
Tel.: +49/391/6712269  
Fax: +49/391/6711186

Email: steffen.sommer@e-technik.uni-magdeburg.de

**Schlüsselwörter:** Nichtlineare Regelung, Nichtlineare Zustandstransformation, LPV-System, quadratische Stabilität, LPV-Regelung, LMI

Der Reglerentwurf für nichtlineare Strecken läßt sich auf den Entwurf an LPV-Systemen zurückführen, wenn das nichtlineare System eine bestimmte Struktur aufweist und somit als LPV-System betrachtet werden kann. Der Vorteil dieser Herangehensweise liegt darin, daß die Stabilität für bestimmte Bereiche der Zustandsgrößen (Klasse von nichtlinearen Strecken), unabhängig vom Eingangssignal des Regelkreises, garantiert werden kann. Gefordert wird hierbei eine formal lineare Struktur der nichtlinearen Strecke (FL-System<sup>1</sup>), bei der die Zustandsraummatrizen zustandsabhängige Terme enthalten. Werden diese Terme (Nichtlinearitäten) durch Parameterfunktionen ausgedrückt, ergibt sich ein System, welches die gleichen Eigenschaften wie ein LPV-System besitzt. Ein solches soll hier als formal lineares parameterveränderliches System (FLPV-System<sup>2</sup>) bezeichnet werden. Der Unterschied zum reinen LPV-System liegt in den zustandsabhängigen Parameterfunktionen des FLPV-Systems. Innerhalb des Reglerentwurfs wird dieses FLPV-System als LPV-System betrachtet.

Aufbauend auf dieser Grundidee sollen innerhalb dieses Beitrages zwei Forschungsaktivitäten und deren bisherige Ergebnisse dargelegt werden. Der erste Punkt setzt sich mit der Möglichkeit einer eindeutigen Umwandlung von einem allgemeinen nichtlinearen System (ALS-System<sup>3</sup>) in ein FLPV-System auseinander.

Als zweites steht die Auswahl von Reglerentwurfverfahren für LPV-Systeme, bei denen sich die resultierenden Reglerstrukturen für den Einsatz an den hier betrachteten ALS-Systemen eignen, im Mittelpunkt.

Für die Umwandlung des ALS-Systems in ein FLPV-System wird hier eine nichtlineare Zustandstransformation eingeführt. Diese ermöglicht die Umformung in eine Normalform mit Hilfe einer eindeutigen Berechnungsvorschrift. Dies hat den Vorteil, daß sich der Reglerentwurf immer an einem LPV-System mit der selben Struktur zurückführen läßt. Hinzu kommt die affine Darstellungsmöglichkeit der parameterabhängigen Zustandsraummatrizen, was eine Vereinfachung des Stabilitätsnachweises ermöglicht.

---

<sup>1</sup> siehe [3]

<sup>2</sup> oft auch 'quasi-LPV'

<sup>3</sup> ALS=analytisch, lineare Stellgröße

Im folgenden werden einige Entwurfsverfahren und Reglerstrukturen aufgegriffen, die sich besonders für die spezielle Struktur des LPV-Entwurfssystems und den Einsatz an der zu regelnden nichtlinearen Strecke eignen. Regelstrecken bei denen nicht alle Zustandsgrößen meßbar sind, die für die Berechnung der Parameterfunktionen notwendig sind, erfolgt der Einsatz robuster Regler. Der Reglerentwurf basiert auf der Untersuchung der quadratischen Stabilität [2] einer strukturbeschränkten Zustandsrückführung [1]. Diese Betrachtung läßt sich auf die klassischen Konstruktionen PI-Regler, dynamische Ausgangsrückführung und PI-Ausgangsregelung erweitern [7]. Sind alle benötigten Zustandsgrößen meßbar, kann auch die Strategie eines parameterveränderlichen Reglers (LPV-Regler) aufgegriffen werden. Hierbei verändern sich die Reglermatrizen in Abhängigkeit von den aktuellen Werten der Parameter. Eine Möglichkeit ist die sogenannte Self-Scheduled  $H_\infty$ -Regelung [4, 6, 5].

Die Problemformulierung der hier erwähnten Reglerentwurfsmöglichkeiten erfolgt mit Hilfe diverser linearer Matrixungleichungen (LMI's) [2, 1, 4], für deren Lösung eine Vielzahl von Softwarepaketen existiert.

Mit der nichtlinearen Zustandstransformation und den verschiedenen ausgewählten Entwurfsmöglichkeiten eröffnet sich eine Konzeption zur Regelung nichtlinearer Strecken mit breiterem Anwendungsbereich.

Diese Strategie wird anhand einer Substratregelung in einem Bioreaktor demonstriert.

## Literatur

- [1] César A. R. Crusius and Alexandre Trofino. Sufficient LMI Conditions for Output Feedback Control Problems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 44(5):1053–1057, May 1999.
- [2] Stephen Boyd, El Laurent Ghaoui, Eric Feron and Venkataramanan Balakrishnan. *Linear Matrix Inequalities in System and Control Theory*. SIAM, 1994.
- [3] Otto Föllinger. *Nichtlineare Regelungen*, volume I+II. Oldenbourg, 1993.
- [4] Pierre Apkarian, Pascal Gahinet and Greg Becker. Self-scheduled  $H_\infty$ -Control of Linear Parameter-varying Systems: a Design Example. *Automatica*, 31(9):1251–1261, 1995.
- [5] Pascal Gahinet, Arkadi Nemirovski, Alan J. Laub and Mahmoud Chilali. *LMI Control Toolbox User's Guide*. The Math Works, Inc., May 1995.
- [6] A. Rehm and F. Allgöwer. Self-Scheduled Nonlinear Output Feedback  $H_\infty$ -Control of a Class of Nonlinear Systems. *IfA Technical Report, AUT96-25*, 1996. ETH Zürich.
- [7] Günter Roppenecker. *Zeitbereichsentwurf linearer Regelungen*. R. Oldenbourg Verlag GmbH, München, 1990.

# Robustheitsuntersuchungen an Fuzzy-Regelkreisen mittels Empfindlichkeitstheorie

P. Klotzek

Fachgebiet Meß- und Regelungstechnik  
(Prof. Dr.-Ing. Dr.h.c. mult. P.M. Frank)  
Gerhard-Mercator-Universität-GH Duisburg  
Bismarckstraße 81 BB, 47048 Duisburg  
Tel.: +49/203/379 2925  
Fax: +49/203/379 2928  
Email: p.klotzek@uni-duisburg.de

**Schlüsselwörter:** Empfindlichkeitstheorie, Fuzzy-Regelungen, Kaskadenregelungen, Zustandsrückkopplung, Invertiertes Pendel

Eine bekannte Schwierigkeit beim Einsatz von Fuzzy Reglern ist die Analyse von Robustheit bzw. Empfindlichkeit bezüglich Parameteränderungen im System. Da Fuzzy-Regler wissensbasiert beschrieben sind, ist die Anwendung von analytischen Methoden für Analyse und Design im Hinblick auf diese Eigenschaft nicht möglich. Um jedoch trotzdem auf die Erfahrung im Umgang mit klassischen Methoden zurückgreifen zu können, muß der Fuzzy-Regler in den mathematischen Bereich transformiert werden. Diese Transformation birgt desweiteren die Möglichkeit, zu untersuchen, welche Nichtlinearitäten bei einem Fuzzy-Regler auftreten können.

In diesem Beitrag wird der Einfluß von Parameteränderungen auf den Fuzzy-Regelkreis mit Hilfe von Empfindlichkeitsfunktionen [1] untersucht. Die Nichtlinearitäten des Fuzzy-Reglers werden analytisch beschrieben und deren Einfluß auf Fuzzy-Regelkreise anhand des Empfindlichkeitsmodells analysiert. Dazu wird die Verknüpfung der Ein- und Ausgangsgrößen von Fuzzy-Reglern einer bestimmten Klasse analytisch angegeben. Diese Klasse von Fuzzy-Reglern ist gekennzeichnet durch zwei Eingangsgrößen  $e_1$  und  $e_2$ , fuzzifiziert durch sich komplementär überschneidende Dreiecke und Rampen an den äußeren Enden der Eingangsintervalle, und einer Ausgangsgröße  $u$ , fuzzifiziert durch Singletons. Für die Inferenz wird das algebraische Produkt (Fuzzy-Und) und die absolute Summe (Fuzzy-Oder) angewendet. Die Defuzzifizierung wird mit der *Center of Gravity*-Methode für Singletons durchgeführt. Ein Fuzzy-Regler aus dieser Klasse kann dann als eine stückweise definierte Funktion der folgenden Form (siehe auch [2]) dargestellt werden.:

$$FC_{ij}(e_1, e_2) = \tilde{k}_{1_{ij}} \cdot e_1 \cdot e_2 + \tilde{k}_{2_{ij}} \cdot e_1 + \tilde{k}_{3_{ij}} \cdot e_2 + \tilde{k}_{4_{ij}} \quad (1)$$

Die Koeffizienten  $\tilde{k}_{1_{ij}}$ ,  $\tilde{k}_{2_{ij}}$ ,  $\tilde{k}_{3_{ij}}$  und  $\tilde{k}_{4_{ij}}$  bestimmen einen bilinearen, zwei lineare und einen konstanten Anteil und sind abhängig von entsprechenden Intervallen  $I_{1_i}$  und  $I_{2_j}$ , in denen sich  $e_1$  bzw.  $e_2$  befinden, d.h. der Regler ist von *variabler Struktur*. Die Abhängigkeiten der Koeffizienten von den Parametern des Fuzzy-Reglers sind ebenfalls hergeleitet worden, sodaß es dadurch möglich ist, den Einfluß der Parameter auf die mathematische Funktion (1) nachzuvollziehen.

Werden die Parameter des Fuzzy-Reglers so gewählt, daß die bilinearen und konstanten Koeffizienten  $\tilde{k}_{1_{ij}}$  bzw.  $\tilde{k}_{4_{ij}}$  gleich Null gesetzt und für alle Intervalle  $I_{1_i}$  und  $I_{2_j}$  die Koeffizienten  $\tilde{k}_{2_{ij}}$  und  $\tilde{k}_{3_{ij}}$  den gleichen Wert haben, so entsteht ein linearer Fuzzy-Regler. Dieser kann als erster Entwurf einer Fuzzy-Regelung betrachtet werden und durch Modifizierung der Parameterwerte in einen nichtlinearen Fuzzy-Regler überführt werden.

Um einen Vergleich zwischen einer klassischen Zustandsrückkopplung und einer Fuzzy-Kaskadenregelung (Abbildung 1) durchführen zu können, wurde die Stellgröße  $u^f$  der Fuzzy-Kaskadenregelung hergeleitet — wobei die Führungsgröße als  $x_r = 0$  vorausgesetzt und die beiden kaskadierten Fuzzy-Regler  $FC^1$  und  $FC^2$  durch die Verknüpfung der Ein- und Ausgangsgrößen nach Gleichung (1) mathematisch dargestellt werden.

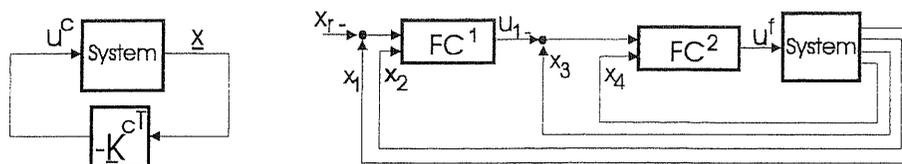


Abbildung 1: Zustandsrückkopplung und kaskadierter Fuzzy-Regelkreis

Dabei zeigt sich, daß die kaskadierte Kombination von zwei Fuzzy-Reglern einer nicht-linearen Zustandsrückführung entspricht. Seien etwa das Modell eines Systems vierter Ordnung (zweifache Kaskadierung) und  $\alpha$  als ein beliebiger Parameter dieses Systems gegeben, so kann die Robustheit des Regelkreises anhand des Empfindlichkeitsmodells untersucht werden, welches im Vortrag vorgestellt wird. Die Empfindlichkeitsmodelle des klassischen und Fuzzy-Regelkreises unterscheiden sich nur in der Ableitung der Stellgröße nach dem Parameter  $\alpha$ , wobei dieser Term für den Fuzzy-Regler die Multiplikation eines Vektors mit der Zustandsempfindlichkeitsfunktion ist. Dieser Vektor ist abhängig von den Koeffizienten der Fuzzy-Regler und den Zuständen des nominalen Systemmodells und kann systematisch aus der gegebenen Konfiguration hergeleitet werden. Wird das so erhaltene Ergebnis mit der Ableitung der Stellgröße der klassischen Zustandsrückkopplung verglichen, so zeigt sich, in welcher Weise die größere Anzahl an Freiheitsgraden auch das Empfindlichkeitsmodell beeinflussen. Somit ist es möglich, die Koeffizienten der Fuzzy-Regler  $FC^1$  und  $FC^2$  durch Wahl der Parameter so zu bestimmen, daß sich der Fuzzy-Regelkreis im Vergleich zum klassischen Regler durch eine höhere Robustheit bezüglich Änderungen der Systemparameter auszeichnet.

Diese Ergebnisse wurden auf das invertierte Pendel angewandt, wobei erst eine lineare Fuzzy-Zustandsrückkopplung entworfen wurde, welche dann durch Veränderung der Parameter in eine nichtlineare Zustandsrückkopplung modifiziert wurde. Durch die Nichtlinearitäten und variable Struktur dieser Regelung konnte der Regelkreis im Hinblick auf Güte *und* Robustheit optimiert werden.

Dabei ist nicht das Ergebnis selbst, d.h. eine der klassischen Regelung überlegene Fuzzy-Regelung entworfen zu haben, der entscheidende wissenschaftliche Beitrag, sondern die Anwendung der Empfindlichkeitstheorie zur Robustheitsanalyse von Fuzzy-Regelungen und die Einsichtnahme in die analytische Struktur des Reglers, welche durch die Herleitung einer mathematischen Verknüpfung von Ein- und Ausgangsgrößen eines Fuzzy-Systems möglich wurde.

## Literatur

- [1] Frank, P.M.: Introduction to system sensitivity theory, New York: Academic, 1978.
- [2] Klotzek, P.; Frank, P.M.: Untersuchungen der Empfindlichkeit von fuzzy-basierter und klassischer PI-Regelung im Vergleich, Proceedings of "Fuzzy Karlsruhe '98", Karlsruhe, Germany, 25. September 1998.

# Nichtlineare zeitdiskrete Regelung eines unteraktuierten Manipulators

Norbert Scherm \*

\* Institut für Regelungstechnik  
Universität Hannover  
Appelstraße 11, 30167 Hannover  
Tel.: +49/511/7624512  
Fax: +49/511/7624536  
Email: scherm@irt.uni-hannover.de

Derzeitige Adresse:  
STN ATLAS ELEKTRONIK, LFE2  
Sebaldsbrücker Heerstraße 235, 28305 Bremen  
Tel.: +49/421/4571554  
Fax: +49/421/4574415  
Email: scherm.n@stn-atlas.de

**Schlüsselwörter:** Nichtlineare zeitdiskrete Regelung, unteraktuierte Systeme

Seit Beginn der neunziger Jahre finden unteraktuierte Manipulatoren ein zunehmendes Interesse im Bereich der Forschung. Ein unteraktuierter Manipulator besitzt mehr Freiheitsgrade als Aktuatoren. Ein Beispiel für ein solches System ist der in Abbildung 1 dargestellte Manipulator mit zwei Freiheitsgraden. Lediglich das untere der beiden Gelenke verfügt über einen Antrieb, so daß es gelingt, die Kosten und das Gewicht des zweiten Aktuators einzusparen. Im passiven Gelenk befindet sich nur ein Meßaufnehmer, Bremsen oder Kupplungen sind nicht vorgesehen [1]. Besonders anspruchsvoll ist die Regelung von unteraktuierten Systemen, die in der waagerechten Ebene arbeiten, denn bei ihnen ist die Wirkung der Schwerkraft nicht nutzbar. Die Steuerbarkeit basiert auf schwachen dynamischen Kopplungen wie etwa Coriolis- und Zentrifugalkräften. Nach einer Linearisierung der Strecke in einer Ruhelage sind diese schwachen dynamischen Kopplungen jedoch häufig nicht mehr im Streckenmodell enthalten, so daß der Reglerentwurf von einem nicht steuerbaren Modell ausgehen muß und damit keine beliebige Vorgabe des Manipulatorverhaltens möglich ist. Erst eine nichtlineare Betrachtungsweise erlaubt es, die Bewegung des Manipulators flexibel zu konzeptionieren.

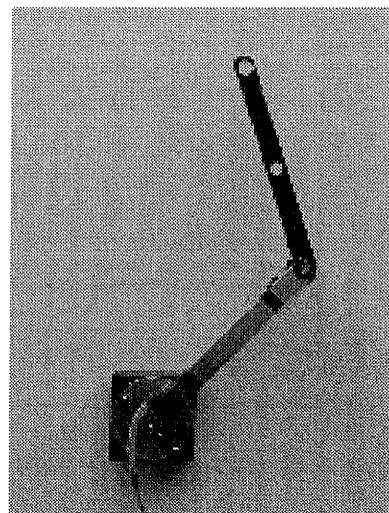


Abbildung 1: Ein unteraktuierter Manipulator mit zwei Freiheitsgraden und einem Antrieb (Draufsicht)

Findet zur Regelung des Manipulators eine bezüglich der Zustände stetige Rückführung bei zeitkontinuierlicher Modellierung Verwendung, so gelingt im allgemeinen keine *asymptotische* Stabilisierung des Systems. Diskontinuierliche Ansätze scheinen jedoch geeignet, dieses Problem zu umgehen [2]. Gegenstand der vorgestellten Forschungsarbeit ist daher die *zeitdiskrete* Regelung des unteraktuierten Systems:

Mittels des Iterationsverfahrens von Levenberg-Marquardt erfolgt zunächst die Berechnung eines stückweise konstanten Stellgrößenverlaufes, der es gestattet, den Manipulator von einem vorgegebenen Anfangspunkt zu einem vorgegebenen Endpunkt zu bewegen (Point-To-Point path planning). Man gelangt zu einer reinen Steuerung (Open-Loop-Control). Um ein konvergentes Verhalten des Systems auch bei Anfangs- und Modellfehlern zu erhalten, wird das Regelungskonzept um einen linearen zeitdiskreten zeitvarianten Zustandsregler ergänzt (Closed-Loop-Control). Aufgrund der vorstehend angesprochenen schwachen Kopplungen ist die Regelungsaufgabe jedoch vielfach schlecht konditioniert. Damit der geschlossene

Regelkreis dennoch ein robustes Verhalten aufweist, ist in den Reglerentwurf ein Regularisierungsverfahren eingegliedert. Es entsteht schließlich ein systematisches Entwurfsverfahren, bestehend aus einer iterativen globalen Point-To-Point Bahnplanung und einem lokalen zeitvarianten Zustandsreglerentwurf. Der Einsatzbereich der Methode ist, nebenbei bemerkt, nicht auf unteraktuierte Systeme beschränkt, sondern erstreckt sich auf eine große Klasse von nichtlinearen Systemen.

Der Point-To-Point Bahnplanung liegt eine affine Approximation und dem Entwurf der Zustandsrückführung eine erweiterte Linearisierung der Strecke entlang der Solltrajektorie zu Grunde. Beide Näherungsdarstellungen basieren auf den Jacobi-Matrizen (z.B. partielle Ableitungen erster Ordnung bezüglich der Stellgröße) des Streckenmodells. Die Berechnung der Matrizen in der zeitdiskreten Form erweist sich auf den ersten Blick als problematisch: Wie sich zeigte, erfordert ein praktikabler Reglerentwurf oftmals lange Abtastzeiten. Gleichzeitig stellt die Regelung des untersuchten Manipulators sehr hohe Anforderungen an die Güte des Diskretisierungsverfahrens. Einfach handhabbare Diskretisierungsverfahren wie z.B. die Euler-Diskretisierung (Polygonapproximation) sind nicht anwendbar, da sie bekanntlich nur für kleine Abtastzeiten auf eine hinreichend genaue Streckenbeschreibung führen. Zur Bestimmung der zeitdiskreten Jacobi-Matrizen findet daher eine Methode aus dem Bereich der Sensitivitätsanalyse Anwendung. Diese gestattet es, zum Einen die benötigten Matrizen mit hoher Genauigkeit zu berechnen und zum Anderen die Abtastzeit in weiten Bereichen zu wählen.

Viele der zur Regelung benötigten Größen sind vor der Ausführung der Bewegung bestimmbar und die während der Bewegung benötigten Algorithmen erfordern keinen hohen Rechenaufwand. Dies erlaubt es, ein Manipulatorsystem beispielsweise mit Hilfe von kostengünstigen Mikrocontrollern zu realisieren.

Anhand von praktischen Experimenten, wie beispielsweise einer sich wiederholenden Pick-and-Place Bewegung, gelang es, die Tauglichkeit der Verfahren für den praktischen Einsatz nachzuweisen.

## **Literatur:**

- [1] Mareczek, J.; Buss, M.; Schmidt, G.: Robuste Regelung eines nicht-holonomen unteraktuierten SCARA-Roboters, at 5/99 S.199-208.
- [2] Scherm, N.; Heimann, B.: Discrete-Time Control of underactuated Manipulation Systems, erschienen im Tagungsband des Tenth World Congress on the Theory of Machines and Mechanisms (IFTOMM), Oulu, Finland, June 20-24, 1999, S. 990-996.

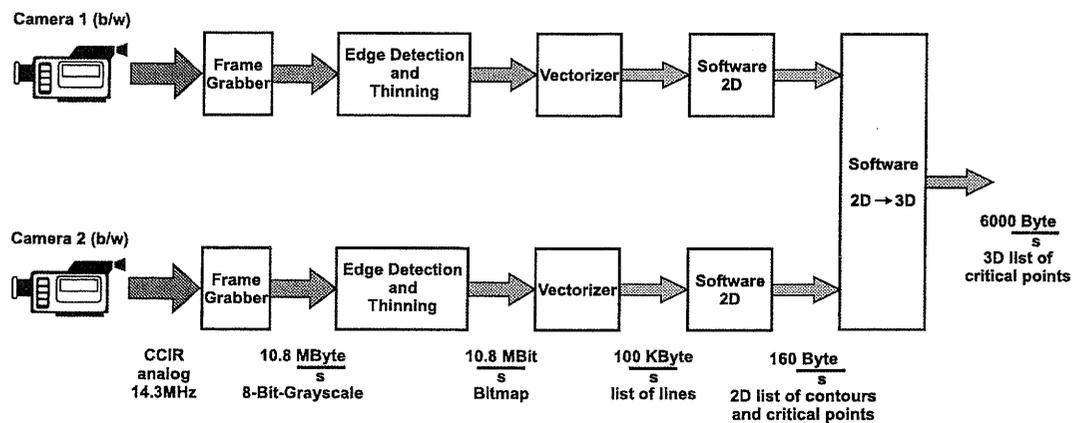
# Fuzzy Kollisionsvermeidung für Industrieroboter

Lehrgebiet für Prozesssteuerung und Regelungstechnik  
 FernUniversität Hagen  
 Postfach 940, D-58084 Hagen  
 Tel.: +49/2331/987 1107, Fax: +49/2331/987 354  
 Email: michael.gerke@fernuni-hagen.de

**Schlüsselwörter:** Fuzzy-Logik, Kollisionsvermeidung, Industrieroboter

In Roboterarbeitszellen kann es trotz sorgfältiger Offline-Bahnplanung für die beteiligten Kinematiken infolge von unvorhersehbaren Ereignissen zu Kollisionsgefahren kommen. Die vorgestellte Fuzzy-Strategie zur Kollisionsvermeidung ist in der Lage, unter Einhaltung der durch die Robotersteuerung vorgegebenen Echtzeitbedingungen, sichere Ausweichtrajektorien für sämtliche beteiligten Kinematiken zu berechnen. Die Strategie wird an einem PUMA 562 Industrieroboter untersucht.

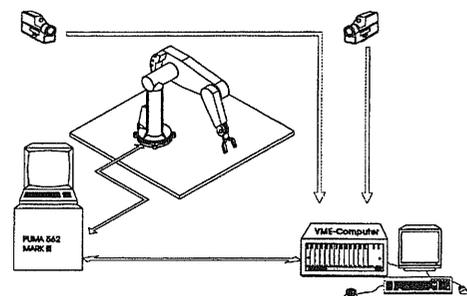
Zur Überwachung der Arbeitszelle des PUMA-Roboters wird ein 2-Kamera-System eingesetzt. Durch massive Bilddaten-Reduktion und Stereo-Bildverarbeitung gelingt es, kollisionskritische Objekte im Arbeitsraum des Roboters in Video-Echtzeit räumlich zu lokalisieren. Diese kritischen 3D-Objektorte werden zur Kollisionsvermeidung benutzt und stehen einem Überwachungsrechner zur Verfügung.



Um die verwendete Strategie auch prinzipiell anwendbar zu gestalten, wurde der Unimation Mark III Controller des PUMA-Roboters nicht durch eine Einzellösung ersetzt. Stattdessen wurde die Echtzeit-Kommunikationsschnittstelle (ALTER-Interface) der ursprünglichen Steuerung verwendet. Diese Schnittstelle ist in ihrer Leistungsfähigkeit zwar eng begrenzt, sie ist jedoch gerade deswegen ein geeigneter Demonstrator für die Realisierbarkeit von Überwachungs- und Reaktionsstrategien auf externen Rechnern, falls die eigentliche Robotersteuerung nicht transparent ('offene Software') vorliegt.

Sowohl Bildverarbeitung wie auch die nachfolgende Kollisionsvermeidung werden auf einem dedizierten Überwachungsrechner (VME-Rechner) durchgeführt.

Die gesamte Datenkommunikation zwischen den Systemkomponenten ist im Bild rechts dargestellt.



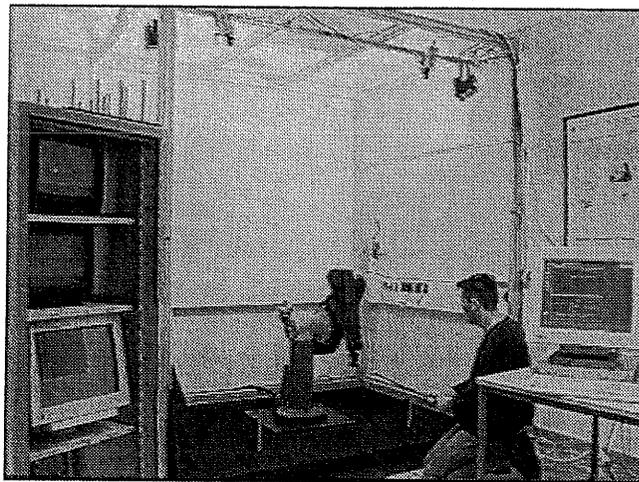
Die Fuzzy-Kollisionsvermeidung ist bereits in [GERKE 1995] und [GERKE 1998] in unterschiedlichen Entwicklungsstadien umfassend beschrieben. In den zitierten Arbeiten wird sie in einer Simulationsumgebung mit zwei PUMA-Robotern analysiert.

In der Folge wurde ein Laborsystem aufgebaut, bei dem ein PUMA-Industrieroboter durch Stereo-Bildverarbeitung überwacht und bei Kollisionsgefahr beeinflusst wird. Dazu waren 3 Teilaufgaben zu lösen:

- Echtzeit-Erfassung dynamischer Hindernisobjekte und Vermessung im 3D-Raum.
- Zuordnung erkannter kritischer 3D-Objekte und aktueller Roboter-Extremitäten (Greifer, Ellbogen, Schulter) zu Fuzzy-Sektoren, die den Arbeitsraum des Roboters unterteilen.
- Verwendung aller relevanten Umweltinformationen in einer Fuzzy-Regelbasis zur Inferenzbildung. Die Regelbasis beinhaltet Einzelregeln zur Kollisionsvermeidung aber auch zur Bahn-Rückführung bei sich verminderndem Kollisionskonflikt.

Das Gesamtproblem ist inzwischen gelöst, wobei im Bereich der echtzeitfähigen Stereo-Bildverarbeitung Spezialhardware zur Erzeugung von 2D-Konturlisten eingesetzt wurde. Die nachfolgende 3D-Korrespondenzauflösung und Vermessung erfolgte durch selbstentwickelte Software. Vorhandene Strategien zur Fuzzy-Kollisionsvermeidung mußten problemspezifisch adaptiert werden.

Ein Szenenbeispiel aus dem in Boppard (Februar 2000) präsentierten Video-Mitschnitt einer Kollisionsvermeidung im Falle eines bewegten Hindernisses ist im abschließenden Bild dargestellt.



## Literatur

- [GERKE 1995] M. Gerke and H. Hoyer, FUZZY Collision Avoidance for Industrial Robots, Proceedings 1995 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, IROS'95, Pittsburgh, Pennsylvania, August 1995
- [GERKE 1998] M. Gerke and M. Tarokh, Fuzzy Logic Real-Time Collision Avoidance of Multi-Robots, Proceedings: World Automation Congress WAC'98, 7th ISORA, Anchorage, Alaska, May 1998



# Die Schrecksekunde: Regelung kann helfen

J. Ackermann

Institut für Robotik und Mechatronik  
DLR Oberpfaffenhofen  
82230 Wessling  
Tel.: +49/8153/282423  
Fax: +49/8153/281847  
Email: Juergen.Ackermann@dlr.de

**Schlüsselwörter:** Aufgabenteilung in Mensch-Maschine-Systemen

Bei schnellen dynamischen Vorgängen ist der Mensch als Regler bisweilen überfordert, er reagiert erst nach einer Schrecksekunde und dann ist es möglicherweise eine Überreaktion. Beispiele sind Situationen die zum Schleudern oder Kippen eines Autos führen, oder die den Piloten nach einem Triebwerksausfall zum Eingreifen in die automatische Regelung veranlassen. Es werden Beispiele von Fahrer- und Piloten-Unterstützungssystemen vorgestellt, das sind Regelungssysteme die durch schnelles Eingreifen Schleudern oder Kippen vermeiden bzw. das Auftreten größerer Gierraten nach einem Triebwerksausfall verhindern. Nach dieser Soforthilfe sollte das zusätzliche Rückführsignal auf Null zurückgehen, so daß der Mensch nach wenigen Sekunden die Regelungsaufgabe wieder voll übernimmt; er hat sozusagen etwas Zeit gewonnen. Ein wichtiger Aspekt ist die Robustheit eines solchen Regelungssystems, d.h. daß die dem Menschen verbleibende Regelungsaufgabe möglichst nicht von unsicheren Betriebsparametern abhängt, beispielsweise soll die Spurführungsaufgabe des Autofahrers möglichst unabhängig vom Kraftschluß zwischen Reifen und Straße sein. Der Triebwerksausfall mit Piloten-Panikreaktionen ist für die Strukturdynamik eine auslegungskritischer Fall. Durch Vermeiden dieser Situation kann beachtliches Gewicht im Seitenleitwerk des Airbus eingespart werden.

