

# **36. REGELUNGSTECHNISCHES KOLLOQUIUM**

**BOPPARD**

**20.-22. FEBRUAR 2002**

**PROGRAMM  
KURZFASSUNGEN**



36. REGELUNGSTECHNISCHES KOLLOQUIUM IN BOPPARD  
20.-22. FEBRUAR 2002

## Programm und Kurzfassungen

### Mittwoch, 20. Februar 2002

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

### Donnerstag, 21. Februar 2002

**08:45 – 09:00 Eröffnung und Begrüßung (Raum 1)**  
*Prof. Dr.-Ing. Dr.h.c. M. Zeitz, Universität Stuttgart*

	Raum 1	S.	Raum 2	S.
<b>09:00 – 10:30</b>	<b>Automatisierungssysteme</b> Sitzungsleitung: <i>Prof. Dr.-Ing. U. Eppler</i>		<b>Kraftfahrzeug-Anwendungen</b> Sitzungsleitung: <i>Prof. Dr.-Ing. U. Konigorski</i>	
09:00 – 09:30	Adaptive Internetanbindung von Feldbussystemen <i>S. Eberle (Univ. Stuttgart, Göhner)</i>	1	Planung von Geschwindigkeitsprofilen für automatisch geführte Fahrzeuge <i>O. Bauer (Univ. Siegen, Mayr)</i>	8
09:30 – 10:00	Einsatz formaler Methoden bei der Feldinstrumentierung von verteilten Automatisierungssystemen <i>R. Simon (Institut für Automation und Kommunikation Magdeburg, Neumann)</i>	4	Aktive Kompensation von Aggregatschwingungen im Kfz <i>F. Svaricek (Univ. d. Bundeswehr München)</i>	10
10:00 – 10:30	Ein prozessorientiertes Konzept zur Produktionsregelung in der Fertigung <i>C. Ament (Univ. Bremen, Goch)</i>	6	Simultane Regelung von Ladedruck und AGR-Rate beim Pkw-Dieselmotor <i>J. Rückert (RWTH Aachen, Abel)</i>	11

**10:30 – 11:00 Kaffee-/Teepause**

<b>11:00 – 12:30</b>	<b>Wissensbasierte Systeme</b> Sitzungsleitung: <i>Prof. Dr.-Ing. J. Lunze</i>		<b>Optimierung und Anwendungen</b> Sitzungsleitung: <i>Prof. Dr.-Ing. M. Buss</i>	
11:00 – 11:30	Teilprozessübergreifende Qualitätsvorhersage mit Methoden der Computational Intelligence <i>M. Langer (Univ. Wuppertal, Vogel-Heuser)</i>	13	Nichtlineare optimale Rückkopplungs-Steuerung: Numerische Synthese mit direkten Optimalsteuerungsverfahren und Neuroapproximation <i>M.H. Breitner (TU Clausthal) / O. v.Stryk (TU Darmstadt)</i>	19
11:30 – 12:00	Neuro-Fuzzy-basierte, selbstanpassende Bewegungsregelung eines Bohrhammers <i>A. Jacubasch (FhG Karlsruhe, Steusloff)</i>	15	Optimierungsbasierte Berechnung von Schrittprimitiven und -sequenzen für kamerageführte zweibeinige Roboter <i>J. Denk (TU München, Schmidt)</i>	21
12:00 – 12:30	Qualitative dynamische Modelle für die Werkstoffentwicklung von Hochtemperatur-Brennstoffzellen <i>K. Schmid (Univ. Karlsruhe, Krebs)</i>	17	Anschlussoptimierende und ressourcenschonende Steuerung des Stadtschnellbahnbetriebes: Ein mehrkriterieller Ansatz zur Echtzeit-Optimierung <i>S. Dettich (TU Dresden, Strobel)</i>	23

**12:30 – 15:00 Mittagessen / Pause zum Spaziergang mit Gesprächen am Rheinufer!**



# 36. REGELUNGSTECHNISCHES KOLLOQUIUM IN BOPPARD

20.-22. FEBRUAR 2002

	Raum 1	S.	Raum 2	S.
<b>15:00 - 16:30</b>	<b>Rechnerwerkzeuge</b> Sitzungsleitung: <i>Prof. Dr.techn. K. Janschek</i>		<b>Modellbasierte Verfahren</b> Sitzungsleitung: <i>Prof. Dr.-Ing. R. King</i>	
15:00 – 15:30	EU-Forschungsprojekt zur Multi-Agenten-basierten Fehlerdiagnose <i>B. Köppen-Seliger (Univ. Duisburg, Ding)</i>	25	Modellbasierte Prädiktion der Granulopoese bei akuter und chronischer Verstrahlung <i>F. Lehn (Univ. Ulm, Hofer)</i>	31
15:30 – 16:00	Werkzeugkopplung im Systementwurf: Konzept, Umsetzung und Anwendung <i>S. König (TU Braunschweig, Schnieder)</i>	27	Automatisierungstechnik in der Anästhesie <i>K.S. Stadler (ETH Zürich, Glattfelder)</i>	33
16:00 – 16.30	Bestimmung der Lastcharakteristiken von Elektroenergiesystemen mit Fortsetzungsmethoden <i>I. Winzenick (Univ. d. Bundeswehr Hamburg, N.N. NF Franke)</i>	29	Objekt-Orientierte Modellierung und Optimierung für Abwasserreinigungsprozesse <i>G. Reichl (TU Ilmenau, Puta)</i>	35
<b>16:30 – 17:00</b>	<b>Kaffee-/Teepause</b>			
<b>17:00 – 18:00</b>	<b>Plenarvortrag</b>			
	Regelungstechnik in der Kardiomedizin <i>Prof. Dr.-Ing. J. Werner, Lehrstuhl für Biomedizinische Technik, Ruhr-Universität Bochum</i>			37

**18:30**                    **Abendessen**

## Freitag, 21. Februar 2002

<b>08:30 – 10:00</b>	<b>Robotik</b> Sitzungsleitung: <i>Prof. Dr.-Ing. W. Schumacher</i>		<b>Regelung</b> Sitzungsleitung: <i>Prof. Dr.-techn. K. Schlacher</i>	
08:30– 09:00	Projektive Virtuelle Realität: Der Brückenschlag zwischen Computergrafik und Automatisierungstechnik <i>J. Roßmann (Univ. Dortmund, Freund)</i>	38	Trajektorienfolgeregelung elektromagnetisch gelagerter Spindeln <i>J.v. Löwis (TU Dresden, Reinschke)</i>	43
09:00 – 9:30	Dynamisch stabiles Gehen für eine autonome, zweibeinige Laufmaschine <i>A. Albert (Univ. Hannover, Gerth)</i>	40	Entwurf zeitvarianter Filter für iterativ lernende Regelungen auf Basis der Wavelettransformation <i>H. Hengen (Univ. Kaiserslautern, Pandit)</i>	45
09:30 – 10:00	Stabilization of the Double Inverted Pendulum on a Cart Based on Passivity and Lyapunov Desgin <i>W. Zhong (Univ. Kiel, Röck)</i>	42	$H_{\infty}$ -Regelung eines Kristallisationsprozesses <i>U. Vollmer (Universität/MPI Magdeburg, Raisch)</i>	47

**10:00 – 10:30**    **Kaffee-/Teepause**



# 36. REGELUNGSTECHNISCHES KOLLOQUIUM IN BOPPARD

20.-22. FEBRUAR 2002

	Raum 1	S.	Raum 2	S.
<b>10:30 – 12:00</b>	<b>Hybride Systeme</b> Sitzungsleitung: <i>Prof. Dr.-Ing. H.-M. Hanisch</i>		<b>Nichtlineare Systeme</b> Sitzungsleitung: <i>Prof. Dr.-Ing. F. Allgöwer</i>	
10:30– 11:00	Beschreibung und Analyse deterministischer Automaten über endlichen Körpern <i>J. Reger (Univ. Erlangen-Nürnberg, Roppenecker)</i>	49	Zwei Suchverfahren für das Optimierungsproblem bei der Strukturvereinfachung nichtlinearer Systeme <i>M. Buttelmann (Univ. Bremen, Lohmann)</i>	55
11:00 – 11:30	Integration ereignis-diskreter Modelle in Modelica zur Simulation diskret/kontinuierlicher Systeme <i>M.A. P. Remelhe (Univ. Dortmund, Engell)</i>	51	Nichtlineare Beobachter – ein Zugang, der nichtglatte Systeme einschließt <i>R. Engel (Univ. Kassel, Kreißelmeier)</i>	57
11:30 – 12:00	Toolgestützte Validierungsmethodik komplexer hybrider technischer Systeme <i>M. Ünlü (Univ. Bochum, Reinig)</i>	53	Beobachterstruktur für nichtlineare Deskriptorsysteme mit linearer Fehlerdynamik <i>J. Menke (Univ. Paderborn, Gausch)</i>	59

**12:00 – 12:30**    **Abschluss / Preisverleihung / Aufruf für Boppard 2003**

**13:00 – 14:00**    **Mittagessen**

**14:00**            **Ende des Kolloquiums**



# Adaptive Internetanbindung von Feldbussystemen

S. Eberle

Institut für Automatisierungs- und Softwaretechnik  
Universität Stuttgart  
Pfaffenwaldring 47, 70550 Stuttgart  
Tel.: +49/711/685-7304  
Fax: +49/711/685-7302  
Email: eberle@ias.uni-stuttgart.de

**Schlüsselwörter:** Feldbus, Schnittstelle, Kommunikation, Information, Durchgängigkeit, Interoperabilität, XML

Nach der Mikroelektronik schickt sich nun auch das Internet an in alle Lebensbereiche des Menschen vorzudringen. Auch in der Automatisierungstechnik ist diese Tendenz deutlich spürbar. Innovationen wie vertikale Integration oder das Wahrnehmen leittechnischer Aufgaben aus der Ferne rücken in greifbare Nähe und versprechen hohe Kosteneinsparungen. Technisch gesehen ist das Erreichen dieser Ziele stets an dieselbe Voraussetzung geknüpft: der durchgängige Informationsfluss von der IT-Welt bis hinunter in die Feldebene.

Demgegenüber ist zu beobachten, dass automatisierungstechnische Einrichtungen und deren Bestandteile in verschiedenen Anwendergruppen aus völlig unterschiedlichen Blickwinkeln betrachtet werden. Bezogen auf Feldbussysteme bedeutet dies, dass entsprechend unterschiedliche Anforderungen an die Feldbusanwendungsschnittstelle bestehen. Obwohl sich die Aufgaben im Umgang mit Feldbussen im Kern stets ähnlich sind, herrscht heute ein geradezu babylonisches Gewirr verschiedenartiger Anwendungsschnittstellen und Feldbuswerkzeuge.

Sobald über die Grenzen eines Feldbussystems hinaus kommuniziert werden soll, erweist sich diese Schnittstellenvielfalt als schwer überwindbares Hindernis. Von Durchgängigkeit des Datenaustausches und Interoperabilität zwischen Geräten und Anwendungen kann keine Rede sein. Ist die Feldebene erst einmal über das Internet zugänglich, so steigt die Zahl der Anwendergruppen und individuellen Sichtweisen um Größenordnungen an. Parallel dazu eröffnen sich neuartige Anwendungsfelder (vertikale Integration). Die Verschiedenartigkeit von Feldbusanwendungsschnittstellen und -werkzeugen wird künftig somit noch größer ausfallen.

Vor diesem Hintergrund ist eine beachtliche Vielzahl von Aktivitäten im Gange den Datenzugriff auf die Feldebene zu harmonisieren (RACKS/NOAH [9]), zu standardisieren (MMS [4], OPC [8], IDA [3]) oder De-facto-Standards zu schaffen (PROFInet [10]). Kern aller Bestrebungen ist die Herstellung von Durchgängigkeit und Interoperabilität durch Einschwören der Anwendergemeinde auf eine universelle Anwendungsschnittstelle. Besonders auch seit der Erfindung der XML-Technologie (*eXtensible Markup Language*) [12] fühlt man sich diesem Ziel wieder sehr nahe. Dennoch zeigt sich, dass XML zwar den Umgang mit Daten in mancherlei Hinsicht erleichtert, den lang gehegten Wunsch nach einem universellen Datenaustauschformat jedoch ebenfalls nicht erfüllt.

Der vorliegende Beitrag stellt einen Ansatz vor, mit dem das Ziel der Durchgängigkeit und Interoperabilität von einer völlig anderen Richtung her angegangen wird. Nicht der Anwender soll gezwungen sein sich an eine per Standard vorgegebene Sichtweise bzw. Anwendungsschnittstelle zu halten. Vielmehr muss die Technik, sprich das Feldbussystem, in die Lage versetzt werden, sich an die Bedürfnisse und Vorlieben verschiedener Anwender anzupassen. Es soll ein adaptiver Informationsaustausch geschaffen werden, sodass individuell ausgeprägte Anwenderanfragen verstanden und auf zutreffende Art und Weise verarbeitet werden.

Den Ausgangspunkt dieser Überlegung bilden zwei grundlegenden Aspekte, die beim Zugriff auf Feldbussysteme von außen eine Rolle spielen: Information und Kommunikation. Im praktischen Umgang treten Informationen [2] nie in isolierter Form auf, sondern lediglich als Nachrichten [1], die ein materialisiertes Abbild der Information darstellen. Informationen an sich sind ein nicht-physikalisches Phänomen [7]. So vollzieht sich auch die Übermittlung von Informationen letztendlich durch Kommunikation von Nachrichten.

Ein Vergleich der Kommunikation mit Feldbussystemen [5], [7] und der zwischen Menschen [6] fördert einen entscheidenden Unterschied zu Tage. Die viel diskutierte Anwendungsschnittstelle, die den Zugriff auf Feldbussysteme vereinfachen soll, gleichzeitig aber neue Probleme aufwirft, kommt in der menschlichen Kommunikation schlichtweg nicht vor. Der Grund hierfür liegt in der Natur der Nachrichten, die in Feldbussystemen zum Einsatz kommen. Feldbusnachrichten sind Daten und Daten stellen eine nur unvollständiges Abbild der übermittelten Information dar. So ist zur Interpretation einer Datennachricht stets zusätzliches Wissen über deren Beschaffenheit notwendig. Genau dieses Wissen wird in der Praxis in Form von Standards definiert und statisch in der Anwendungsschnittstelle implementiert. Zwangsläufig kann nur eine endliche Menge vorab bekannter Nachrichten verstanden und verarbeitet werden. Sobald davon abweichende Nachrichten verwendet werden, kommt es zu Fehlinterpretationen und der Informationsaustausch schlägt fehl.

Eine nahe liegende Möglichkeit Abhilfe zu schaffen ist, dem Vorbild der menschlichen Kommunikation zu folgen und auch Datennachrichten so zu gestalten, dass sie ein vollständiges Informationsabbild mit sich tragen. Damit eröffnet sich die Möglichkeit, die Interpretation nicht mit zusätzlichem Wissen sondern auf der Basis von Interpretationsvorschriften zu vollziehen. Nachrichten und Verarbeitungsweisen brauchen nicht mehr starr miteinander verknüpft zu werden. Stattdessen kann die zutreffende Verarbeitungsweise durch Nachschlagen in einer Interpretationsvorschrift ermittelt werden. Somit entfällt die Notwendigkeit, sich vorab auf die Gestaltungsweise der Nachrichten festzulegen, mit denen Informationen an ihr Ziel gebracht werden. Solange eine passende Interpretationsvorschrift verfügbar ist, können beliebige Nachrichten verstanden und verarbeitet werden.

Überträgt man dieses Prinzip auf die Kommunikation mit Feldbussystemen, so bedeutet dies einen Übergang von der Standard-basierten zur adaptiven Feldbusanwendungsschnittstelle. Der Anwender hat die Freiheit seine Sichtweise auf das Feldbussystem selbst zu bestimmen, die Anwendungsschnittstelle ist der Lage sich entsprechend anzupassen. Spezifische Anwenderanfragen werden als vollständige Nachrichten an das Feldbussystem übermittelt. So kann die Verarbeitung auf der Basis austauschbarer Interpretationsvorschriften erfolgen, die im Internet hinterlegt und dynamisch heruntergeladen werden. Durchgängigkeit und Interoperabilität können somit auch ohne eine per Standard verordnete Gleichschaltung aller Informationsflüsse erzielt werden. An Stelle dessen erfolgt eine dynamische Adaption des Informations-verarbeitenden Systems an verschiedenartige Informationsflüsse, die in heterogenen Einsatzumgebungen unvermeidbar sind.

Die technologische Umsetzung dieses Ansatzes erfolgt auf Grundlage der XML-Technologie. Diesmal wird XML jedoch nicht als universelles Datenaustauschformat angesehen, sondern als Wegbereiter zum individuellen Informationsaustausch. XML bringt nämlich die letztendlich entscheidende Ergänzung zur seitherigen Datendarstellung mit sich. Durch XML werden Daten zum vollständigen Abbild der zum Ausdruck gebrachten Information. Genau dieser Punkt dürfte wohl auch die Essenz dessen sein, was XML ganz allgemein in der elektronischen Datenverarbeitung zu leisten vermag; eine Erkenntnis, die in dieser Form bisher nur wenig hervorgehoben wurde.

## Literatur:

- [1] Goos, G.: Vorlesungen über Informatik, Bd. 1 Grundlagen und funktionales Programmieren, Springer-Verlag, Berlin, 1997.
- [2] Hyvärinen, L. P.: Information Theory for System Engineers, Springer-Verlag, Berlin, 1970.
- [3] IDA-Group: IDA – Interface for Distributed Automation, White Paper, Revision 1.0, <http://www.ida-group.org>, 2001.
- [4] International Organisation for Standardization: Industrial automation systems - Manufacturing Message Specification, ISO 9506, Genf, Schweiz, 2000.
- [5] International Organisation for Standardization: Information technology - Open Systems Interconnection - Basic Reference Model, ISO/IEC 7498, Genf, Schweiz, 1994.
- [6] Jakobson, R.: Essais de linguistique générale, Édition de Minuit, Paris, Frankreich, 1963.
- [7] Lauber, R. J.: Was ist Information?, in Computer Aided Design of Dynamic Systems, Scientific Papers of Donezk State Technical University, Vol. 29, Sevastopol, Ukraine, 2001, S. 18-35.
- [8] OPC Foundation: OPC Overview, Version 1.0, <http://www.opcfoundation.org>, USA, 1998.
- [9] Patz, M.; Quade, J.: Feldbusunabhängige Anwendungsschnittstellen - Die Esprit-Projekte "RACKS" und "NOAH", im Kongressband i-Net '97, 1997, S. 175-183.
- [10] PROFIBUS International: PROFInet – Architecture Description and Specification, Version 1.0, <http://www.profibus.com>, Karlsruhe, 2001.
- [11] Reißerweber, B.: Feldbussysteme, Oldenburg Verlag, München, 1998.
- [12] World Wide Web Consortium: Extensible Markup Language (XML) 1.0 (Second Edition), Technical Report REC-xml-20001006, <http://www.w3c.org>, USA, 2000.



# Einsatz formaler Methoden bei der Feldinstrumentierung von verteilten Automatisierungssystemen

René Simon \*

\* Institut für Automation und Kommunikation  
Magdeburg

Steinfeldstraße 3 (IGZ), D-39179 Barleben

Tel.: +49/39203/81060

Fax: +49/39203/81100

Email: rsi@ifak.fhg.de

**Schlüsselwörter:** Verteiltes Automatisierungssystem, Engineering, Lebenszyklus, Instrumentierung, Feldgerät, Gerätemodell, Gerätebeschreibung, Feldbus, Durchgängigkeit

Neben der funktionalen Betrachtung von Prozeßleitsystemen rückt in zunehmenden Maße die Gestaltung ihres Lebenszyklusses (Engineering) in den Mittelpunkt der Betrachtungen. Engineering wird hier entsprechend [1] als: "... sämtliche Aufgaben und Tätigkeiten, die zur Planung, Errichtung, Inbetriebnahme, Betrieb und Instandhaltung bzw. Ertüchtigung von technischen Anlagen bewältigt und durchgeführt werden." in bezug auf das Prozeßleitsystem aufgefaßt. Der Lebenszyklus und das damit verbundene Engineering werden ständig komplexer, da sowohl die Aufgaben als auch die einzusetzenden Geräte und Werkzeuge komplexer und vielfältiger werden. Auf diesem Gebiet existiert ein hohes Einsparungspotential. Der genannten Komplexität und dem Zwang zur rationellen Arbeitsweise kann nur mit formalen Methoden und wissenschaftlicher Herangehensweise an die Instrumentierungsaufgabe begegnet werden.

Das durchgängige Engineering von heterogenen Komponenten auf der Basis einheitlicher Informationsmodelle bzw. formaler/formalisierter Beschreibungstechniken stellt eine neue Qualität in Prozeßleitsystemen dar und ist eine wesentliche Anforderung an die Gestaltung von Prozeßleitsystemen einer neuen Generation; diese werden hier als Verteilte Automatisierungssysteme (VASE, Distributed Control System - DCS) bezeichnet. Dabei spielt insbesondere die Instrumentierung von intelligenten Feldgeräten (Zusammenfassung aller Aktivitäten im Lebenszyklus des VASs, in denen mit dem Feldgerät umgegangen wird) eine immer wichtigere Rolle, da diese Feldgeräte neue Aufgaben, die bisher den Leitsystemen vorbehalten waren, übernehmen.

Im Vortrag wird allgemein in den Informationsaustausch zwischen Anwendungen bzw. Werkzeugen zur Unterstützung des Lebenszyklusses von VASen eingeführt. Existierende Ansätze zur Beschreibung des Lebenszyklusses werden vorgestellt. Parallel dazu werden vorhandene Techniken für den Umgang mit Feldgeräten beschrieben.

Darauf aufbauend werden ein Kernmodell Feldgerät und ein Gerätemodell für die Instrumentierung entwickelt sowie grundlegende Überlegungen zur Gestaltung einer notwendigen Werkzeugkette angestellt. Das aufgestellte Gerätemodell geht über die aktuellen Ansätze der bekannten Gerätebeschreibungstechniken hinaus. Dabei handelt es sich insbesondere um die Einbeziehung der Aspekte Modularisierung, Funktionsblöcke, Management sowie Technische Daten und Bestellangaben.

Das Gerätemodell für die Instrumentierung von Feldgeräten vereint in sich verschiedene (Nutzungs-) Sichten und unterstützt den Austausch von Daten zwischen Instrumentierungsschritten [2]. Die folgende Abbildung zeigt dieses Modell (Darstellung als UML-Packages). Zur besseren Hervorhebung werden alle Elemente mit dem Präfix DI (Device Instrumentation) eingeleitet.

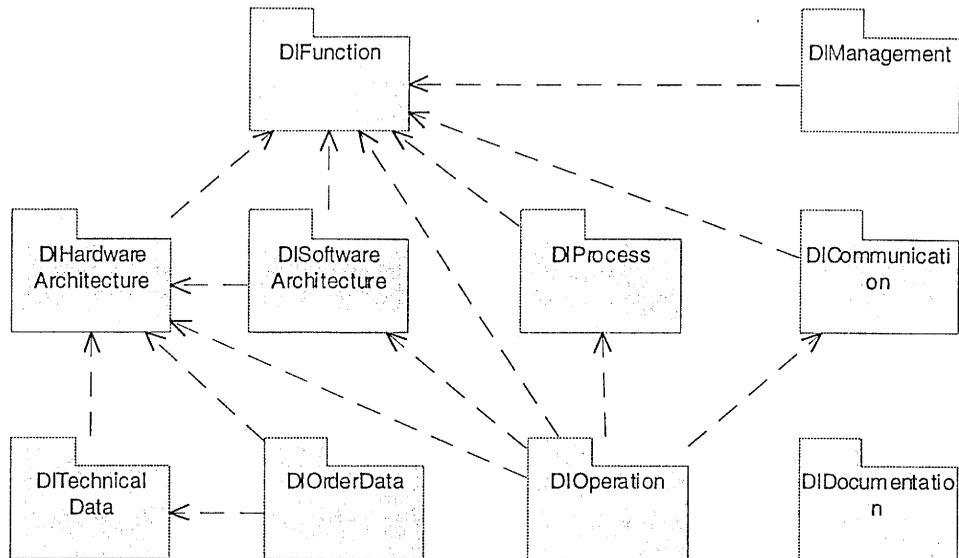


Abbildung 1: Gerätemodell Instrumentierung

Das Gerätemodell für die Instrumentierung wird in einer Reihe von Realisierungen verwendet, die jeweils Bestandteil der Werkzeugkette sind. Bei diesen Realisierungen handelt es sich um eine konkrete Gerätebeschreibungssprache, einen Geräte-Manager, ein Inbetriebnahmewerkzeug sowie die Integration von Feldgeräten z. B. in Engineeringssysteme. Diese Realisierungen setzen jeweils einen Ausschnitt des Gesamtmodells um. Sie validieren das Modell durch ihre Umsetzung in Standards und Produkten, die jeweils angegeben sind.

Die Arbeiten bezüglich der systematischen Instrumentierung von Feldgeräten müssen über die vorliegenden Ansätze hinaus fortgeführt werden. Dies umfaßt sowohl den notwendigen Standardisierungsprozeß als auch die Ausschöpfung der technischen Möglichkeiten hinsichtlich des verwendeten Modells und der abgedeckten Anwendungsgebiete. Diese technischen Möglichkeiten werden abschließend umrissen.

## Literatur:

- [1] Alznauer, R.: Semantisches Informationsmodell für ein ganzheitliches, rechnergestütztes Engineering am Beispiel der Prozeßtechnik, Dissertation Rheinisch Westfälische Technische Hochschule Aachen, 1998.
- [2] Simon, R.: Methoden zur Feldinstrumentierung von Verteilten Automatisierungssystemen, Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, 2001.

# Ein prozessorientiertes Konzept zur Produktionsregelung in der Fertigung

C. Ament

G. Goch

Fachgebiet Mess-, Steuerungs- und Regelungstechnik  
Universität Bremen

Hochschulring 20, Postfach 33 05 60, 28335 Bremen

Tel.: +49/421/218 5561

Tel.: +49/421/218 5515

Fax: +49/421/218 5625

Fax: +49/421/218 5625

Email: am@biba.uni-bremen.de

Email: gg@biba.uni-bremen.de

**Schlüsselwörter:** Produktionsregelung, Verteilte Systeme, Holon

Auf dem Weg vom Halbzeug zum Endprodukt durchläuft ein Werkstück sequenziell eine Reihe von Teilprozessen  $i=1, \dots, i_{\max}$  innerhalb der Fertigung, in denen jeweils die Qualitätsmerkmale des Werkstücks beeinflusst werden. Für das Endprodukt müssen gegebene Qualitätsforderungen erfüllt werden, wobei dies mit minimalen Kosten (z.B. durch Ausschuss fehlerhafter Produkte, für die Lagerung, für benötigte Ressourcen) erreicht werden soll. Für diese Aufgabe wird ein Konzept zur Produktionsregelung entwickelt, das zunächst den Einzelprozess durch eine lokale Rückführung stabilisiert, um dann durch eine übergeordnete, globale Regelung eine Abstimmung innerhalb der Prozesskette zu erreichen (Bild 1).

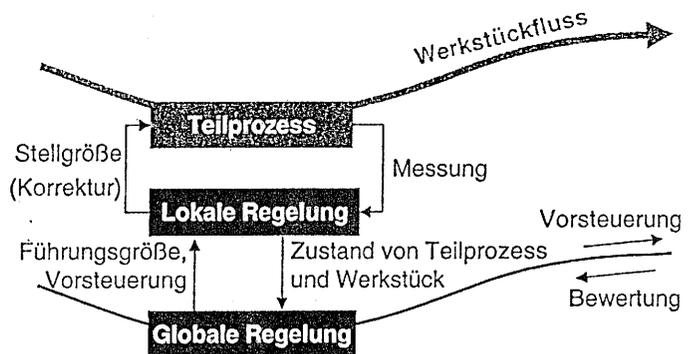


Bild 1: Stabilisierung eines Teilprozesses durch eine lokale und eine übergeordnete globale Prozessregelung.

**Lokale Regelung** – Um eine definierte Produktqualität in Fertigungsprozessen zu garantieren, ist es notwendig, die Stellgrößen der Fertigungsmaschinen unmittelbar dann zu korrigieren, wenn Abweichungen der Qualitätsmerkmale am Produkt gemessen werden. Etablierte Methoden des technischen Qualitätsmanagements sind aber nur in der Lage, Qualitätsabweichungen zu beobachten (z. B. durch die Statistische Prozesslenkung, SPC) bzw. Fehlerursachen offline unter Mitwirkung von Experten zu ermitteln (z. B. durch die Fehlermöglichkeits- und -einflussanalyse, FMEA) [1].

Auf Basis der Stellgröße und der resultierenden Messgröße zurückliegender Werkstückbearbeitungen wird ein Neuronales Netz im Takt der Fertigung trainiert, das für das aktuelle Werkstück bei gegebener

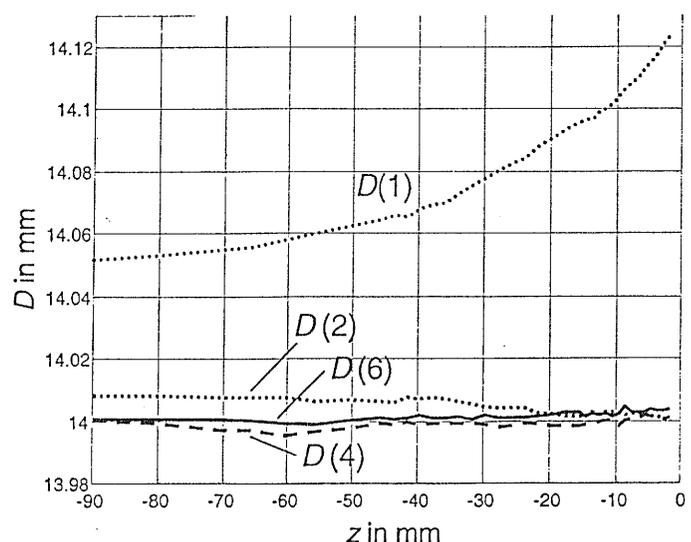


Bild 2: Optimierung des Durchmessers eines einseitig in  $z = -100\text{mm}$  gespannten Drehteils auf  $D_{\text{soll}} = 14\text{mm}$ ; dargestellt sind die Fertigungsschritte  $k=1,2,4,6$ .

Führungsgröße die notwendige Stellgröße bestimmt. Das verwendete Radial-Basis Netzwerk konvergiert innerhalb weniger Fertigungsschritte, da eine einfache lineare Parameteroptimierung durchgeführt wird, und ist dennoch in der Lage, die in der Regel nichtlinearen und mehrdimensionalen Funktionszusammenhänge zu beschreiben.

Bild 2 zeigt das Beispiel einer Außendrehbearbeitung: Durch die Passivkraft der Schneide kommt es zur Biegung des Werkstücks während der Bearbeitung, so dass eine Abweichung vom Soll Durchmesser entsteht. Die lokale Regelung ist (ohne Vortraining) in der Lage, diesen Geometriefehler innerhalb weniger Fertigungsschritte zu kompensieren.

**Globale Regelung** – Sie ergänzt die lokale Regelung um die Fähigkeit, mit den Regelungen anderer Teilprozesse zu kommunizieren. Für den Gesamtprozess entsteht so ein verteiltes Regelungssystem. Die eigenständigen, dezentralen Einheiten entsprechen der Definition eines „Holons“ [2]. Der Informationsaustausch erfolgt in zwei Richtungen parallel zum Werkstückfluss:

- Gleichsinnig zum Werkstückfluss werden die gemessenen Qualitätsmerkmale des Teilprozesses  $i$  an die Regelung des folgenden Prozesses  $i+1$  weitergeleitet. Diese werden dort im Sinne einer Vorsteuerung im Regelgesetz einbezogen, um auf entstandene Abweichungen in den Qualitätsmerkmalen des Werkstücks aus vorangegangenen Prozessschritten reagieren zu können (Bild 3).
- Die lokale Führungsgröße ist abhängig von den Anforderungen nachfolgender Stationen. Für eine Menge möglicher Führungsgrößen werden daher die jeweiligen verallgemeinerter „Gewinne“ bestimmt und die Führungsgröße ausgewählt, die den maximalen Gewinn erzielt. Die Berechnung geschieht rekursiv von Teilprozess zu Teilprozess, in dem die entstehenden lokalen Kosten von dem erzielbaren Gewinn des Endproduktes abgezogen werden. Der Gewinn des Endproduktes wird in Abhängigkeit der geforderten Qualitätsmerkmale definiert; die Kostenfunktionen werden auf Basis von zurückliegenden Messwerten trainiert.

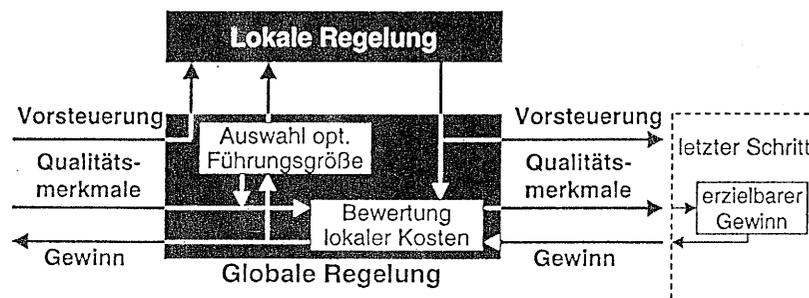


Bild 3: Struktur der globalen Regelung (vgl. Bild 1).

Die Aufgabe kann als ein Problem der dynamischen Programmierung mit (durch die Zahl der Fertigungsschritte) endlichem Horizont verstanden werden, das durch einen Ansatz des Reinforcement Learnings gelöst wird [3]. Das Verfahren wurde unter Verwendung von Funktionsblöcken in Anlehnung an die IEC 61499 in Matlab implementiert [4] und wird am Beispiel der Fertigung von Passungen vorgestellt.

## Literatur:

- [1] Pfeifer, T: Qualitätsmanagement, 2. Auflage, Hanser, 1996, München.
- [2] van Brussel, H.; Bongaerts, L.; Wyns, J.; Valckenaers, P.; van Ginderachter, T. (1999) A conceptual framework for holonic manufacturing: Identification of manufacturing holons. J. of Manufacturing Systems 18, S. 35-52.
- [3] Sutton, R.S.; Barto, A.G.: Reinforcement Learning, MIT Press, 1999, Cambridge.
- [4] Technical Agreement for IEC 61499 Feasibility Demonstrations, [www.holobloc.com](http://www.holobloc.com)

# Planung von Geschwindigkeitsprofilen für automatisch geführte Fahrzeuge

O. Bauer

R. Mayr

Institut für Regelungs- und  
Steuerungstechnik  
Fachbereich 12  
Universität Siegen  
Hölderlinstr. 3  
D-57068 Siegen

Institut für Regelungs- und  
Steuerungstechnik  
Fachbereich 12  
Universität Siegen  
Hölderlinstr. 3  
D-57068 Siegen

oleg.bauer@rst.e-technik.uni-siegen.de

mayr@rst.e-technik.uni-siegen.de

In unserer Gesellschaft besitzt der Bereich der Kraftfahrzeugtechnik hinsichtlich der Mobilität eine zentrale Bedeutung. So wurde in den letzten Jahren eine Reihe von Forschungsprogrammen durchgeführt, bei denen neuartige Technologien sowohl in das einzelne Fahrzeug wie auch in das gesamte Verkehrsgeschehen Eingang fanden. Im Rahmen der europäischen Verbundprojekte DRIVE (Dedicated Road Infrastructure for Vehicle Safety in Europe) [1] und PROMETHEUS (Programme for European Traffic with Highest Efficiency and Unprecedented Safety) [2] wurden schwerpunktmäßig Methoden entwickelt, die Eingriffe in den Verkehrsfluß sowie in die Fahrzeugtechnik erlauben. Ähnliche Ansätze werden auch in anderen Ländern, insbesondere in den USA verfolgt.

In der vorliegenden Arbeit wird ein Planungsmodul für das Geschwindigkeitsprofil eines mit einem Automatisierungssystem ausgestatteten Fahrzeugs vorgestellt. Hierbei wird die Zielsetzung der Entwicklung einer intelligenten Strategie verfolgt, die es ermöglicht, vor kritischen Stellen auf der Fahrbahn, wie beispielsweise vor Kurven, die Geschwindigkeit rechtzeitig zu drosseln. Wie in Abbildung 1 gezeigt, soll dies dadurch ermöglicht werden, daß die augenblicklichen Werte für die Position des Fahrzeugs sowie für die Fahrtrichtung mittels Satellitennavigation permanent erfaßt werden [3]. Durch die Verknüpfung dieser Meßwerte mit den in einer Datenbank tabellarisch abgelegten Informationen über die Infrastruktur des Straßennetzes und dabei insbesondere über die Lage von Kurven, Einmündungen, Kreuzungen, Geschwindigkeitsbeschränkungen etc. kann ein entsprechendes Profil für die maximal erlaubte Geschwindigkeiten generiert werden. Hierbei ist insbesondere darauf zu achten, daß die Manöver zur Geschwindigkeitsreduzierung bereits in einem gebührenden Abstand vor der jeweiligen kritischen Stelle eingeleitet werden, so daß diese Stelle sicher durchfahren werden kann. Ein solches System kann auch lediglich Warnmeldungen bei aktuell zu hohen Fahrgeschwindigkeiten auslösen oder in bereits vorhandene Systeme zur automatischen Abstandshaltung zu einem vorausfahrenden Verkehrsteilnehmer integriert werden [4],[5].

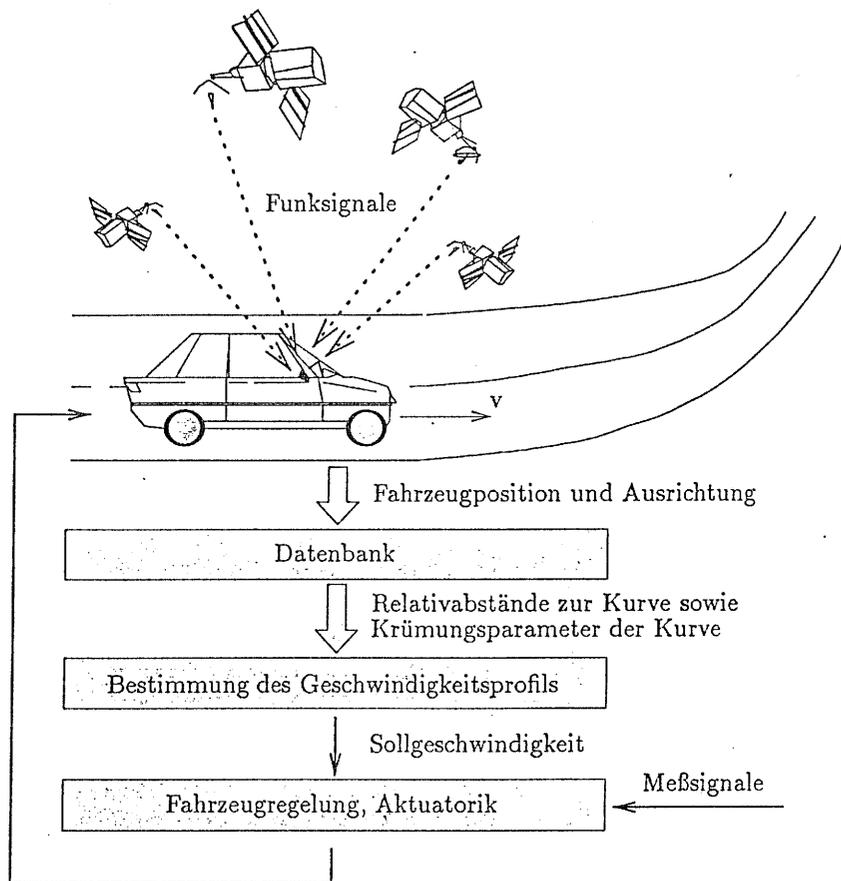


Abbildung 1: Die Funktionsweise des Planungsmoduls

## Literatur

- [1] Karamitsos, F.: "DRIVE", Concise Encyclopedia of Traffic & Transportation Systems, Editor: M. Papageorgiou, Pergamon Press, S. 107-112, 1991.
- [2] Voy, Chr.; Hamm, L.; Panik, F.; Reister, D.: "PROMETHEUS, ein europäisches Forschungsprojekt zur Gestaltung des Straßenverkehrs der Zukunft", VDI-Berichte Nr. 612, S. 1-13, 1986.
- [3] Angermann, D.: "Anwendung des Global Positioning Systems (GPS) im Berliner Vermessungsnetz", Berichte, Forschung Aktuell Berlin.
- [4] Mayr, R.: "Regelungsstrategien für die automatische Fahrzeugführung", 179 Seiten, ISBN 3-540-67518-3, beim Springer-Verlag in 2001 erschienen.
- [5] Bauer, O.; Mayr, R.: "Extension of Intelligent Cruise Control Systems by Velocity Profile Planning Components", Proceedings of the 2001 IEEE International Conference on Systems, Man & Cybernetics (SMC2001), Tucson, USA, S. 652-657, Oktober 2001.

# Aktive Kompensation von Aggregateschwingungen im Kfz

Ferdinand Svaricek

Institut für Systemdynamik und Flugmechanik  
Universität der Bundeswehr München  
85577 Neubiberg  
Tel.: +49/89/6004-2077  
Fax: +49/89/6004-2082  
Email: ferdinand.svaricek@unibw-muenchen.de

**Schlüsselwörter:** Aktive Schwingungskompensation, Adaptive Filter, LMS-Algorithmus, Rapid Prototyping.

Moderne Steuer- und Regelungsverfahren werden im Kraftfahrzeug auch im Komfortbereich eine zunehmende Bedeutung erlangen. Eine interessante Anwendung ist der Bereich der Aggregatelagerung von Kraftfahrzeugen, da hier die konventionelle, passive Lagerungstechnik immer mehr an ihre Grenzen stößt. Der Vortrag wird einen aktuellen Einblick über die Möglichkeiten der aktiven Schwingungskompensation im Bereich der Aggregatelagerung von Kraftfahrzeugen geben.

Nach einer kurzen Darstellung der Anforderungen und Aufgaben einer modernen Aggregatelagerung wird zunächst ein Blick auf die Geschichte der aktiven Schall- und Schwingungskompensation geworfen. Anschließend werden Steuer- und Regelungskonzepte vorgestellt und diskutiert, die sich bei der aktiven Schall- und Schwingungskompensation bewährt haben [1-3]. Der Vortrag schließt mit der Darstellung des Aufbaus und der Wirkungsweise eines aktiven Tilgersystems zur Kompensation von periodischen Aggregateschwingungen.

## Literatur:

- [1] F. Svaricek, H.-J. Karkosch, R.A. Shoureshi und J.L. Vance: Automotive Applications of Active Vibration Control. *European Control Conference, (1999)*, Karlsruhe.
- [2] F. Svaricek, C. Bohn, H.-J. Karkosch und P.M. Marienfeld: Automotive Applications of Rapid Prototyping for Active Vibration Control. *IFAC Workshop "Advances in Automotive Control"*, (2001), Karlsruhe, 191-196.
- [3] F. Svaricek, C. Bohn, H.-J. Karkosch und V. Härtel: Aktive Schwingungskompensation im Kfz aus regelungstechnischer Sicht. *Automatisierungstechnik* 49, (2001), 249-259.



# Simultane Regelung von Ladedruck und AGR-Rate beim Pkw-Dieselmotor

J. Rückert \*

\* Institut für Regelungstechnik  
Rhein.-Westf. Technische Hochschule Aachen  
Steinbachstr. 54, 52056 Aachen  
Tel.: +49/241/8027509  
Fax: +49/241/8022296  
Email: J.Rueckert@irt.rwth-aachen.de

D. Abel \*\*

\*\* Institut für Regelungstechnik  
Rhein.-Westf. Technische Hochschule Aachen  
Steinbachstr. 54, 52056 Aachen  
Tel.: +49/241/8027500  
Fax: +49/241/8022296  
Email: D.Abel@irt.rwth-aachen.de

**Schlüsselwörter:** Prädiktive Regelung, Modelgestützte Regelung, Gain Scheduling, Dieselmotor, Abgasturbolader, Abgasrückführung.

In diesem Beitrag wird ein Modellgestützter Prädiktiver Regler (MPR) vorgestellt, der es ermöglicht, Ladedruck und AGR-Rate an einem Dieselmotor simultan zu regeln. In einem gemeinsamen Forschungsvorhaben wurde am Institut für Regelungstechnik der RWTH Aachen in Zusammenarbeit mit dem Lehrstuhl für Verbrennungskraftmaschinen der RWTH Aachen ein nichtlineares Simulationsmodell des Motors (Abb.1) unter Matlab/Simulink® aufgebaut [5]. Das Regelungsverfahren wurde in der Simulation entwickelt und erprobt, um dann anschließend in Zusammenarbeit mit dem Lehrstuhl für Verbrennungskraftmaschinen Aachen an einem Prüfstandsmotor umgesetzt zu werden.

Dieselmotoren mit Direkteinspritzung haben in den letzten Jahren als Pkw-Antrieb zunehmend an Bedeutung gewonnen. Voraussetzung dafür war ein intensiver Entwicklungsprozess, als dessen Ergebnis der direkteinspritzende Dieselmotor heute trotz stetig verschärfter Emissionsbestimmungen in Bezug auf Fahrleistung und Kraftstoffverbrauch Maßstäbe setzt. Von großer Bedeutung für die Emissionen ist die Abgasrückführung (AGR), die eine deutliche Verringerung der kritischen Stickoxidemission erlaubt. Zudem konnte durch Weiterentwicklung der Aufladetechnik, hier ist der Turbolader mit variabler Turbinengeometrie (VTG-Lader) zu nennen, das Vollastverhalten sowie das Ansprechverhalten weiter verbessert werden.

Eine koordinierende Regelung von Abgasrückführrate und Ladedruck spielt dabei nicht nur für die Fahrdynamik, sondern auch für die Erfüllung der immer strengeren Emissionsgrenzwerte eine wichtige Rolle. Dabei handelt es sich um im regelungstechnischen Sinne gekoppelte Regelkreise, da die Turbinenstellung über die Größen Ladedruck und Abgasgegendruck auch das Druckgefälle in der AGR-Leitung und damit die rückgeführte Abgasmenge beeinflusst. Umgekehrt wirkt sich die rückgeführte Abgasmenge auf den Abgasmassenstrom durch den Turbolader und damit den Enthalpiestrom bzw. den Ladedruck aus. Als Ersatz für die derzeit noch nicht messbare Abgasrückführrate wird der mit einem Heißfilmmessgerät gut messbare Frischluftmassenstrom als Regelgröße verwendet.

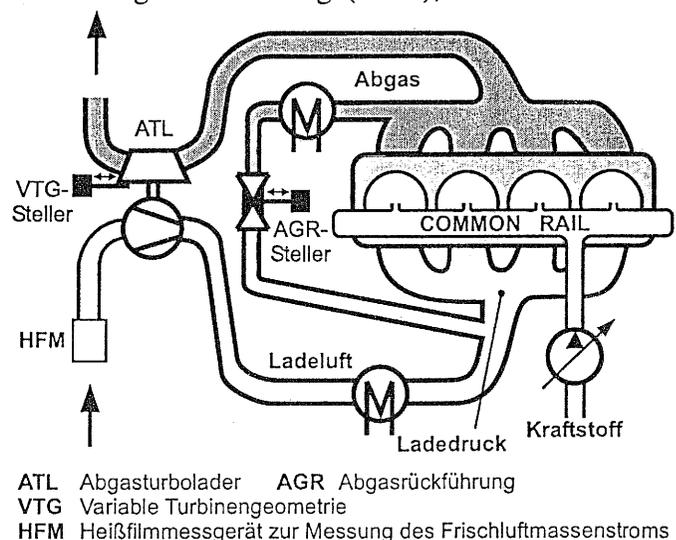


Abbildung 1: Prinzipskizze Dieselmotor

Abbildung 1 zeigt die prinzipielle Anordnung eines Dieselmotors mit Abgasrückführung (AGR) und Aufladung. Die Skizze zeigt einen Dieselmotor mit einer COMMON RAIL Einspritzung. Ein Abgasturbolader (ATL) ist über eine AGR-Leitung mit dem Motor verbunden. Ein VTG-Steller (Variable Turbinengeometrie) steuert den Turbolader. Ein HFM (Heißfilmmessgerät) misst den Frischluftmassenstrom. Ein Ladedruckmesser und ein Kraftstoffmesser sind ebenfalls angeschlossen. Die AGR-Leitung führt von der Abgasrückführung zum Turbolader und zurück zum Motor.

Eine entkoppelnde Regelung ist auch mit konventionellen Regelstrukturen möglich. Als Vergleichsregler zu dem hier vorgestellten Modellgestützten Prädiktiven Regler dient der Ansatz einer entkoppelnden PID-Reglerstruktur. Diese Struktur ist eine Erweiterung der in Steuergeräten bereits eingesetzten Reglerstrukturen. Die Einzelregelkreise für Ladedruck und Frischluftmassenstrom werden um Entkopplungsterme erweitert, mit denen erreicht werden soll, dass durch die VTG Stellung am Ausgang des Ladedruckreglers nur der Ladedruck und durch die AGR Stellung als Ausgang des Frischluftreglers nur der Frischluftmassenstrom beeinflusst wird [4]. Die Einzelregelkreise werden nach Ziegler und Nichols ausgelegt und dann um aus dynamischen Modellen der Regelstrecke gewonnenen Entkopplungsterme erweitert. Bei einem solchen Ansatz können die übergeordneten Regelungsziele Bereitstellung des gewünschten Drehmoments bei gleichzeitiger Einhaltung der Emissionsgrenzen nur durch Sollwertvorgaben (Kennfelder) festgelegt werden. Diese Kennfelder beschreiben die Stationärabstimmung des Motors. Bei einem modellgestützten prädiktiven Regelungsansatz können die übergeordneten Regelungsziele darüber hinaus auch noch direkt in der Kostenfunktion berücksichtigt werden, wenn für diese ein Modell und/oder eine Messung (z.B. Emissionsmessung durch einen NO<sub>x</sub>-Sensor) verfügbar ist. Schwerpunkt der durchgeführten Forschungsarbeiten war der Entwurf eines modellgestützten Regelungskonzeptes, sowie die Erprobung dieses Konzeptes im Vergleich zu einer entkoppelnden PID-Reglerstruktur in der Simulation und am Motorprüfstand.

Der hier eingesetzte Modellgestützte Prädiktive Regler (MPR) basiert auf dem Generalized-Predictive-Control-Ansatz (GPC) [1] und verwendet für die Prädiktion ein Zustandsraummodell [3]. Um eine bleibende Regelabweichung zu vermeiden, wird das Zustandsraummodell um einen Integrierer erweitert, so dass der geschlossene Regelkreis insgesamt integrierendes Verhalten aufweist. Zur Korrektur des Zustandsvektors wird ein mit einem T-Polynom-Ansatz ausgelegter Beobachter benutzt [2],[6]. Durch die Verwendung des linearen Modells kann die Kostenfunktion analytisch gelöst werden, so dass eine deterministische Rechenzeit für das Steuergerät garantiert werden kann. Die Verstärkungsfaktoren dieses linearen Modells werden an das nichtlineare Verhalten der Strecke angepasst (Gain Scheduling).

## Literatur:

- [1] Clarke, D. W.; Mohtadi, C.; Tuffs, P. S.: Generalized Predictive Control - Part I and Part II, Automatica, Volume 23, Nr. 2, (1987).
- [2] Hücker, Jan: Selbsteinstellende und prädiktive Kompaktregler. Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 8, Nr. 855, VDI-Verlag, (2000), Düsseldorf.
- [3] Krauss, Peter: Prädiktive Regelung mit linearen Prozessmodellen im Zustandsraum, Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 8, Nr. 560, VDI-Verlag, (1995), Düsseldorf.
- [4] Rückert, J.; Kinoo, B.; Krüger, M.; Schlosser, A.; Rake, H.; Pischinger, S.: Simultane Regelung von Ladedruck und AGR-Rate beim Pkw Dieselmotor, Motortechnische Zeitschrift 62, 2001, 11, 956-965.
- [5] Schloßer, Axel: Modellbildung und Simulation zur Ladedruck- und Abgasrückführregelung an einem Dieselmotor, Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 8, Nr. 860, VDI-Verlag, (2000), Düsseldorf.
- [6] Soeterboeck, R.: Predictive Control – A Unified Approach, PHD thesis, Delft University of Technology, (1990).

# Teilprozessübergreifende Qualitätsvorhersage mit Methoden der Computational Intelligence

Dipl.- Ing. Michael Langer \*

Prof. Dr.- Ing. Birgit Vogel-Heuser \*\*

\* Lehrstuhl für  
Automatisierungstechnik/ Prozessinformatik  
Universität Wuppertal  
Fuhlrottstrasse 10, 42119 Wuppertal  
Tel.: +49/202/439-2942  
Fax: +49/202/439-2944  
Email: langer@uni-wuppertal.de

\*\* Lehrstuhl für  
Automatisierungstechnik/ Prozessinformatik  
Universität Wuppertal  
Fuhlrottstrasse 10, 42119 Wuppertal  
Tel.: +49/202/439-2945  
Fax: +49/202/439-2944  
Email: vogel@lfa.uni-wuppertal.de

**Schlüsselwörter:** Prozessmodellierung , Computational Intelligence, Stoffflusssimulation

Die Betreiber von Produktionsanlagen aller Branchen sind aus wirtschaftlichen Gründen vielfach gezwungen, hochwertige Automatisierungssysteme einzusetzen. Es entsteht hierbei Bedarf nach Methoden und Werkzeugen, die es gestatten, komplexe Produktionsabläufe auf Rechnern abzubilden und mit Hilfe mathematischer Modelle die Prozessführung zu optimieren.

Die am Lehrstuhl für Automatisierungstechnik/ Prozessinformatik der Universität Wuppertal entstandene Arbeit verfolgt das Ziel, komplexe verfahrenstechnische Prozesse mit Methoden der Automatisierungstechnik für eine Qualitätsvorhersage werkzeuggestützt abzubilden. Es werden klassische Methoden, wie die Modellierung des Materialflusses aus den Erkenntnissen einer regelungstechnischen Systemanalyse ebenso wie ein Adaptives-Neuro-Fuzzy-Inferenzsystem als Kombination von Methoden der Computational-Intelligence zur teilprozessübergreifenden Modellierung eingesetzt.

Durch den globalen Modellansatz kann eine effektive Vorhersage der Qualität für den Prozess einer Bandsinteranlage für Eisenerze erreicht werden.

Der vorgestellte Prozess steht stellvertretend für eine Klasse von stark zeitbehafteten Prozessen bei denen die Beeinflussung von qualitätsbestimmenden Zielgrößen in weiten Teilen lediglich deskriptiv beschrieben werden kann. Mit den genannten Methoden und in Verbindung mit einer geeigneten Softwareplattform (Matlab) wird der gesamte Sinterprozess mit Blick auf qualitätsbestimmende Einflussgrößen abgebildet.

Dazu sind:

- die Zusammenhänge zwischen den physikalischen-, chemischen und metallurgischen Einflußgrößen und den wesentlichen qualitätsbestimmenden Zielgrößen für den Fertigsinter zu erarbeiten und abzubilden,

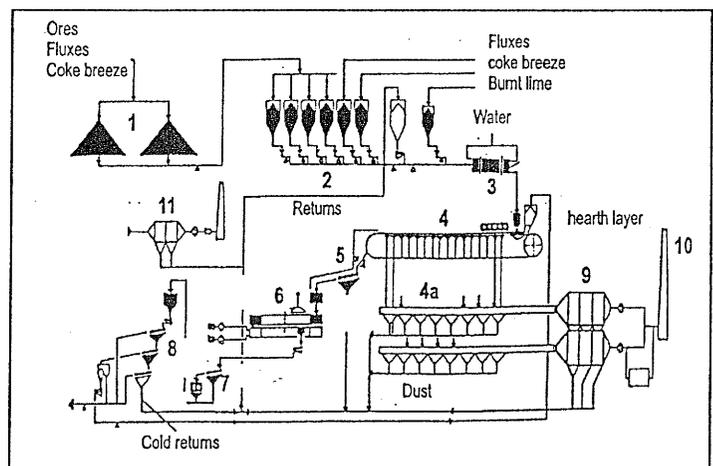


Abbildung 1: Sinteranlage für Eisenerze

- die gesammelten Prozeßdaten mit Hilfe eines Stoffflußmodells, welches die Totzeiten der Anlage berücksichtigt, einander zeitlich richtig zuzuordnen und
- die mit Methoden der Computational Intelligence entwickelten Modelle zur Vorhersage von Prozeßzielgrößen mit den aufbereiteten Prozeßdaten zu trainieren.

Die qualitativen Zusammenhänge zwischen den physikalisch-/chemischen und metallurgischen Einflußgrößen und den wesentlichen qualitätsbestimmenden Zielgrößen werden durch Expertenbefragung ermittelt und mit Hilfe eines Wirkplans dargestellt. Der Wirkplan ist Grundlage für die Modellsynthese mit Hilfe eines Neuro-Fuzzy Ansatzes.

Um den hybriden Modellansatz trainieren zu können, sind zeitlich einander korrekt zugeordnete Betriebsdaten des Prozesses erforderlich. Prozessdaten, die zu einem bestimmten Zeitpunkt von verschiedenen Messstellen aus unterschiedlichen Anlagenteilen stammen, bilden keinen logisch zusammengehörigen Datensatz. Hierfür müssen die Prozessdaten um die jeweilige Transport- oder Verweiltotzeit zwischen den Messstellen verschoben werden. Je nach betrachtetem Aggregat oder Anlagenteil ist diese Totzeit dynamisch (Sintermaschine, Drehkühler usw.).

Zu diesem Zweck wird eine regelungstechnische Systemanalyse durchgeführt, welche den Materialfluss in der Anlage beschreibt. Die Systemanalyse ist Grundlage für die Implementation eines Softwarewerkzeugs zur zeitlich korrekten Zuordnung der Betriebsdaten. Mit den zeitrichtig aufbereiteten Betriebsdaten lässt sich anschliessend der Neuro-Fuzzy Modellansatz trainieren und für eine globale, teilprozess-übergreifende Vorhersage von Qualitätszielgrößen einsetzen.

Ziel der Arbeit ist es, dass Bedienpersonal mit Hilfe eines Modellrechners bei der Führung des Prozesses derart zu unterstützen, dass qualitätsbestimmende verfahrenstechnische Größen physikalischer-, chemischer- und metallurgischer Art vorhergesagt werden können. Die Prädiktion dieser Größen trägt zur Vergleichmäßigung des Prozessgangs bei, indem die Anzahl notwendiger qualitätsbeeinflussender Stelleingriffe minimiert wird.

Einige Ergebnisse aus dem Bereich der Vorhersage qualitativer Zielgrößen für den Sinterprozess werden gezeigt.

## **Literatur:**

- [1] Iwamoto, Munetake: Application of Fuzzy Control for Iron Ore Sintering Process. Transactions of the iron and steel institute- Band 28, (1988), Japan
- [2] Er, M.-J.; Liao, J.; Lin, J: Fuzzy Neural Networks-Based Quality Prediction System for Sintering Process. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, Vol. 8, No. 3, (2000), USA
- [3] McNamara, Alan R.; Lock Lee, Laurie G.; Teh, Kee Chye: Experiences in developing an intelligent operator guidance system. Heidelberg: Springer-Verlag, 1990
- [4] Jang, J.; Sun, C.; Mizutani, E.: Neuro-Fuzzy and Soft Computing. New Jersey: Prentice-Hall, 1997

Bohrhammer-Arbeitspunktes. Dabei setzt sich das Online-Diagnoseverfahren aus zwei aufeinanderfolgenden Schritten zusammen, der Merkmalgenerierung und der Merkmalauswertung. Ähnliche neuro-fuzzy-basierte Online-Diagnoseverfahren werden am IITB erfolgreich zur Überwachung von anderen Mechatroniksystemen [3], [4] und verfahrenstechnischen Industrieprozessen [1], [2] eingesetzt.

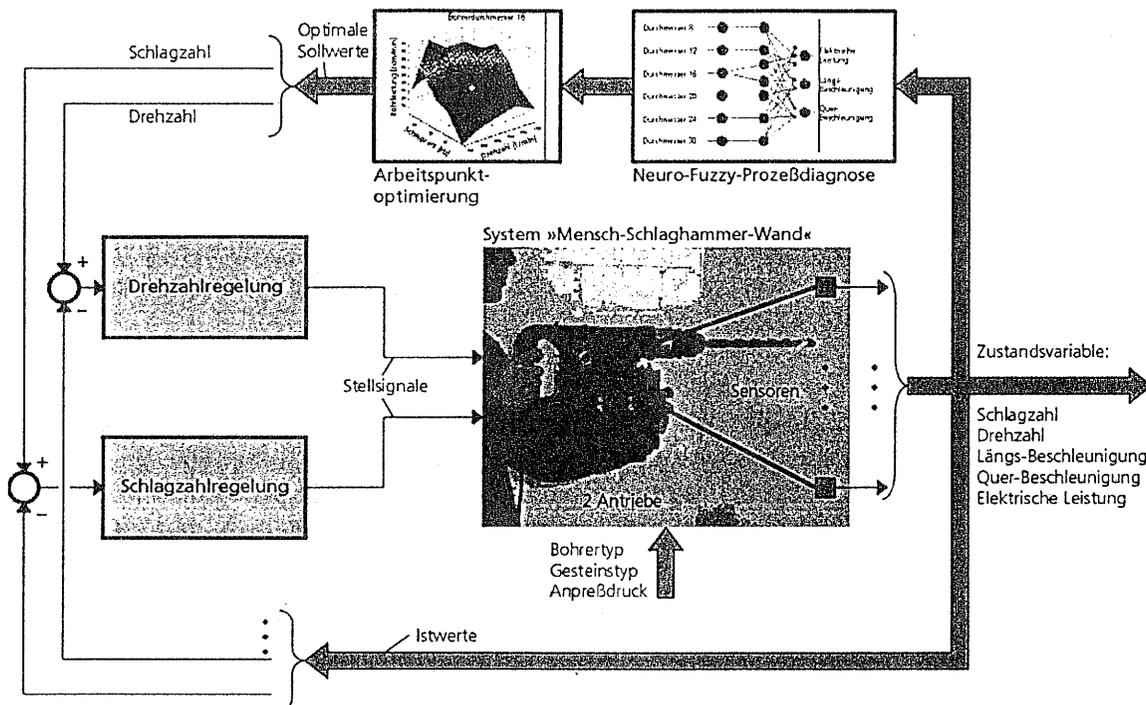


Abbildung: Schematische Darstellung der multisensoriellen Arbeitspunktoptimierung

Im zweiten Teilschritt wird für den aktuellen Bohrer- und Gesteinstyp der dazu gehörige optimale Arbeitspunkt bestimmt. Die für die Arbeitspunktoptimierung benötigten Kennfelder werden in Versuchsreihen ermittelt und in Lookup-Tafeln gespeichert. Die Optimierung beinhaltet die Minimal- bzw. Maximalwertbildung des Kennlinienfeldes auf der Grundlage geeigneter Optimierungsalgorithmen. Das Ergebnis der Optimierung sind schließlich optimale Schlag- und Drehzahlen, d.h. optimale Arbeitspunkte.

Zur Realisierung optimaler Arbeitspunkte eröffnen sich je nach Konstruktionsart des verwendeten Bohrhammers unterschiedliche Möglichkeiten. Bei einem Gerät mit zwei getrennt ansteuerbaren elektrischen Antrieben kann jede optimale Schlag- und Drehzahl automatisch eingestellt werden. Bei den klassischen einmotorigen Bohrhämmern mit mehrstufigem oder stufenlosem Getriebe muss der optimale Arbeitspunkt manuell, z.B. unter Verwendung eines Anzeigedisplays, angenähert werden.

- [1] Frey, C.; M. Sajidman and H.-B. Kuntze: "A Neuro-Fuzzy Supervisory Control System for Industrial Batch Processes". Proc. 9th IEEE Int. Conf. on Fuzzy Systems FUZZ'2000, May 7-10, 2000 San Antonio (USA), pp. 116-121
- [2] Frey, C.; Kuntze, H.-B.: "A neuro-fuzzy supervisory control system for industrial batch processes, IEEE Transactions on Fuzzy Systems, Vol. 9 (2001) No. 4, August, pp. 570-577
- [3] Kuntze, H.-B.; Haffner, H.: "Experiences with the development of a robot for smart multisensoric pipe inspection". In: Proc. 1998 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Leuven/Belgium, May 16-20, 1998, Vol. 2, pp. 1773-1778
- [4] Munser, R.; Kuntze, H.-B.; Hartrumpf, M.; Frey, Chr. W.: Ein modulares Multisensorsystem für Rohrinspektions- und Rohrsanierungsroboter. In: Proceedings 16. Fachgespräch "Autonome Mobile Systeme" (AMS 2000), Karlsruhe, 20.-21.11.2000

# Neuro-Fuzzy-basierte, selbstanpassende Bewegungsregelung eines Bohrhammers

Chr. W. Frey, A. Jacobasch, H.-B. Kuntze  
Fraunhofer-Institut für Informations- und Datenverarbeitung IITB  
Fraunhoferstraße 1, 76131 Karlsruhe  
Tel.: +49-721-6091-332, Fax: +49-721-6091-413, E-Mail: frey@iitb.fhg.de

## Motivation

Die Mechatronik findet zunehmend auch in Produkten des Konsumgütermarktes Anwendung, wo leistungsfähige Regelungs- und Steuerungsverfahren mittels sehr preiswerter Sensoren, Prozessoren und Aktoren implementiert werden können. Dies gilt besonders für den Markt semi-professioneller Produkte, der sich durch die Bereitschaft seines wachsenden Kundenkreises auszeichnet, für neue, nützliche Funktionen und Eigenschaften mehr Geld auszugeben. Ein Vertreter dieser Produktgruppe ist der Bohrhämmer.

Um mit einem Bohrhämmer einen optimalen Bohrverlauf zu erzielen, ist es notwendig, die beiden Stellgrößen "Drehzahl des Bohrers" und "Schlagzahl des Hammerwerkes" des von einem Menschen (oder auch einem Roboter) geführten Gerätes so zu steuern, dass mit minimaler Führungs- und Rückschlagkraft eine maximale Bohrgeschwindigkeit im Gesteinsloch erzielt wird. Die "Mechanik" des führenden Menschen (oder Roboters), des Bohrhammers und des Gesteins bildet beim Schlagbohrvorgang ein ganzheitliches Mehrkörpersystem, das bei einer bestimmten Kombination von Drehzahl und Schlagzahl jeweils ein Optimum bezüglich der Bohrgeschwindigkeit aufweist. Änderungen des Bohrerdurchmessers und der Materialhärte ergeben eine Verstimmung des Mehrkörpersystems, die durch intelligentes Nachstellen der beiden Servoantriebe jeweils wieder nachoptimiert werden muss.

Zur flexiblen und automatischen Anpassung der Schlag- und Drehzahl des Bohrhammers an veränderte Material- und Werkzeugtypen wurde am IITB in Kooperation mit einem Industriepartner eine adaptive, multisensorielle Antriebsregelung entwickelt und prototypisch realisiert. Das zum Patent angemeldete Lösungskonzept geht davon aus, auf der Grundlage einer lernfähigen Neuro-Fuzzy-Komponente aus den Sensorsignalen zunächst die aktuellen Parameter des Gesamtsystems "Mensch-Bohrhämmer-Wand" zu identifizieren. Anschließend werden die jeweils optimalen Schlag- und Drehzahlparameter aus einer Lookup-Table ausgelesen und automatisch eingestellt.

Der multisensorielle intelligente Bohrhämmer ist also in der Lage, für jede Gesteins- und Werkzeugsituation seinen optimalen Arbeitspunkt zu erkennen und automatisch anzupassen. Neben der Maximierung der Bohrleistung können auch andere Güteforderungen, wie z.B. die Energie-minimierung bei akkugespeisten Maschinen, in die Optimierung einbezogen werden. Die Adaption der Bohr- und Schlagzahl des Bohrhammers kann sowohl automatisch über zwei unabhängig ansteuerbare Antriebe als auch manuell (über Display-Anzeige) erfolgen.

## Lösungskonzept

Das neuroadaptive Lösungskonzept besteht aus zwei aufeinander folgenden Teilschritten (s. Abbildung): Im ersten Teilschritt der multisensoriellen Online-Prozessdiagnose werden aus den verschiedenen, zur Verfügung stehenden Sensorsignalen durch Anwendung lernfähiger Neuro-Fuzzy-basierter Online-Diagnoseverfahren schnell und sicher Bohrer- und Gesteinstyp diagnostiziert. Es wird davon ausgegangen, dass der Bohrhämmer mit geeigneten Sensoren insbesondere zur Messung der Schlagzahl, der Drehzahl, der Längs- und Querschleunigung sowie der elektrischen Leistung ausgerüstet ist, was im semi-professionellen Markt preislich akzeptiert wird. Die Informationen der Online-Diagnose, der aktuelle Prozessmode bzw. Abweichungen vom geplanten Prozessverlauf dienen als Eingangsdaten für die Optimierung des

# Qualitative dynamische Modelle für die Werkstoffentwicklung von Hochtemperatur-Brennstoffzellen

K. Schmid \*

V. Krebs \*\*

\* Institut für Regelungs- und Steuerungssysteme  
Universität Karlsruhe (TH)  
Kaiserstraße 12, 76131 Karlsruhe  
Tel.: +49/721/6083179  
Fax: +49/721/6082707  
Email: schmid@irs.etec.uni-karlsruhe.de

\*\* Institut für Regelungs- und Steuerungssysteme  
Universität Karlsruhe (TH)  
Kaiserstraße 12, 76131 Karlsruhe  
Tel.: +49/721/6083180  
Fax: +49/721/6082707  
Email: krebs@irs.etec.uni-karlsruhe.de

**Schlüsselwörter:** Qualitative Modelle, Werkstoffentwicklung, Brennstoffzellen

Hochtemperatur-Brennstoffzellen mit keramischem Festelektrolyt (SOFC: Solid Oxide Fuel Cell) stellen als elektrochemische Energiewandler eine zukunftsweisende Technologie zur wirtschaftlichen und umweltfreundlichen Erzeugung elektrischer Energie dar. Das Kernstück einer SOFC ist eine dreischichtige Einzelzelle, deren Aufbau in Abbildung 1 dargestellt ist. Dieser keramische Werkstoffverbund besteht aus einem Fest-Elektrolyten, auf den die porösen, katalytisch aktiven Elektroden aufgebracht sind. An der Kathode wird Sauerstoff aus dem Oxidationsgas reduziert und gelangt durch den Festelektrolyten zur Anode. Dort wird das Brenngas oxidiert, die freiwerdenden Elektronen fließen über einen äußeren Stromkreis zur Kathode.

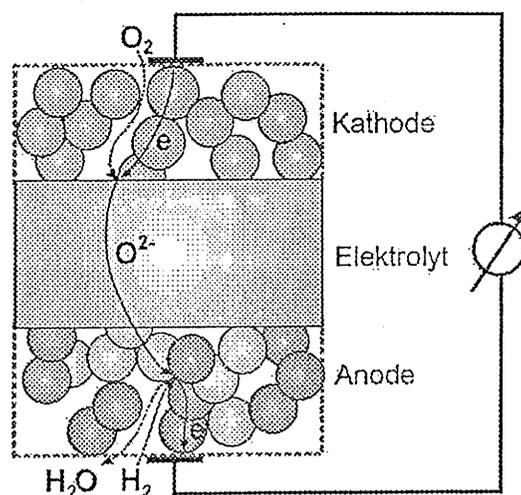


Abb. 1: Mikrostruktur der SOFC.

Die aktuellen Forschungsaktivitäten im Bereich der Werkstoffentwicklung für Brennstoffzellen konzentrieren sich auf die Optimierung der in Abbildung 1 dargestellten Mikrostruktur und auf die Verbesserung der verwendeten Werkstoffe und Herstellungsverfahren. Die dabei verfolgte Vorgehensweise ist charakteristisch für das gesamte Feld der Werkstoffentwicklung: Ausgehend von bekannten Werkstoffen versucht man experimentell, durch Variation der chemischen Zusammensetzung und den Einsatz alternativer Herstellungstechnologien die Anforderungen zu erfüllen. Messung und Analyse liefern jedoch erst nach der Herstellung Erkenntnisse über die erzielte Qualität. Diese iterative Vorgehensweise ist mit einem sehr hohen experimentellen Aufwand verbunden, der lange Entwicklungszeiten und hohe Kosten verursacht. Sind Modelle der Werkstoffeigenschaften verfügbar, kann der experimentelle Aufwand verringert werden, da die gewünschten Werkstoffeigenschaften gezielt optimiert werden können.

In der Werkstoffentwicklung werden Modelle derzeit fast ausschließlich ausgehend von physikalischen Gesetzmäßigkeiten abgeleitet. Damit können zwar sehr einfache Reaktionsmechanismen zufriedenstellend dargestellt werden, bei Werkstoffsystemen wie einer Brennstoffzelle ist jedoch die gegenseitige Abhängigkeit der möglichen physikalischen Teilprozesse so komplex, dass nur der Verzicht auf die Darstellung dynamischer Vorgänge die Entwicklung von Modellen überhaupt ermöglicht. Mit den resultierenden statischen Modellen ist die Optimierung der Werkstoffe dann allerdings nur begrenzt durchführbar.

Die über die theoretische Modellbildung hinausgehenden, in der Systemtheorie und der Regelungstechnik bekannten Modellierungs-Methoden für dynamische Systeme sind in der Werkstoffentwicklung nicht bekannt. Das liegt an der Sicht der jeweils anderen Disziplin in diesen beiden Wissenschaften. Der Werkstoffentwickler sieht die Regelungstechnik als Disziplin, die sich lediglich mit der Automatisierung technischer Anlagen befasst. Das Interesse des Regelungstechnikers dagegen konzentriert sich auf solche Systeme, die ganz offensichtlich einen dynamischen Charakter aufweisen. Bei Werkstoffen und Bauelementen, beispielsweise einem ohmschen Widerstand oder einem Keramikkondensator, ist dies nicht der Fall, sie werden meist als zeitlich unveränderliche, also nicht dynamische Systeme angesehen. Insbesondere bei Systemen wie Brennstoffzellen, deren Funktionalität erst durch das Zusammenwirken verschiedener Werkstoffe ermöglicht wird, trifft diese Sicht jedoch nicht zu.

Für die Regelungstechnik eröffnet sich durch die Perspektive, Werkstoffe als dynamische Systeme zu interpretieren, ein neues Anwendungsfeld. Daher wird in diesem Beitrag beispielhaft aufgezeigt, dass der Einsatz von Modellierungs-Methoden aus der Systemtheorie nutzbringend für die Entwicklung und Optimierung von Werkstoffsystemen eingesetzt werden kann. Als aktuelles technisches Problem wird die Aktivierung von Hochtemperatur-Brennstoffzellen betrachtet, die als letzter Schritt der Zellherstellung wesentlichen Einfluss auf den späteren Wirkungsgrad und die Lebensdauer der Zelle hat. Während der Aktivierung wird die Mikrostruktur der Zelle zwischen Kathode und Elektrolyt entscheidend verändert.

Für die systematische Optimierung der resultierenden Mikrostruktur ist ein dynamisches Modell der Vorgänge während der Aktivierung notwendig. Die elementaren physikalischen Prozesse sind jedoch nur qualitativ bekannt [1]. Beispielsweise wird während der Aktivierung eine Zwischenschicht zwischen Kathode und Elektrolyt abgebaut, wobei Ursache und Ablauf dieses Abbaus unbekannt sind und durch Messungen nicht ermittelt werden können.

Um sowohl qualitatives Erfahrungswissen als auch bekannte Modelle physikalischer Einzelprozesse und vorhandene Messdaten bei der Modellbildung berücksichtigen zu können, wird eine auf Dynamischen Fuzzy-Systemen [2] basierende Modellform eingesetzt. Aus Erfahrungswissen über die Zusammenhänge zwischen den für die Werkstoffentwicklung relevanten Systemgrößen, beispielsweise den Abbau der oben genannten Zwischenschicht, wird die Struktur des Modells qualitativ festgelegt. Unbekannte Parameter dieser Modellstruktur (z.B. die Abbaugeschwindigkeit) werden anschließend anhand gemessener Daten ermittelt. Diese Vorgehensweise ermöglicht die Berücksichtigung der verschiedenen Wissensformen und erlaubt die transparente Darstellung von Unsicherheiten aus Erfahrungswissen und Messdaten.

Das vorgestellte qualitative dynamische Modell beschreibt die Einflüsse von Herstellungs- und Betriebsparametern auf die Aktivierung und ermöglicht das Ersetzen zeit- und kostenintensiver Experimente durch Simulationen. Dies ist insbesondere für die Entwicklung von Brennstoffzellen-Stacks notwendig, in denen inhomogene Betriebsbedingungen zu lokal unterschiedlichen Aktivierungsverhalten führen, die nicht mehr experimentell untersucht werden können. Das Modell ermöglicht erstmals die systematische Entwicklung einer optimalen Betriebsführung der Aktivierung sowohl von Einzelzellen als auch von Brennstoffzellen-Stacks.

## Literatur:

- [1] Weber, A.; Männer, R.; Waser, R.; Ivers-Tiffée, E.: Interaction between microstructure and electrical properties of screen printed cathodes in SOFC single cells, Denki Kagaku, J. of the Electrochemical Society of Japan, Vol. 64 No. 6, 582-589, 1996.
- [2] Schäfers, E.: Dynamische Fuzzy-Systeme zur qualitativen Prozessmodellierung: Eine neue Systemtheorie. Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 8, Nr. 745, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1999.

# Nichtlineare optimale Rückkopplungssteuerung: Numerische Synthese mit direkten Optimalsteuerungsverfahren und Neuroapproximation

M.H. Breitner \*

O. von Stryk \*\*

\* FB Mathematik und Informatik  
Technische Universität Clausthal  
Erzstraße 1, 38678 Clausthal-Zellerfeld  
Tel.: +49/5323722959  
Fax: +49/5323722304  
Email: breitner@math.tu-clausthal.de

\*\* Fachgebiet Simulation und Systemoptimierung  
Technische Universität Darmstadt  
Alexanderstr. 10, 64283 Darmstadt  
Tel.: +49/6151162513  
Fax: +49/6151166648  
Email: stryk@sim.tu-darmstadt.de

**Schlüsselwörter:** optimale Steuerung, direkte Verfahren, Neuroapproximation

Die praktikable Berechnung optimaler, nichtlinearer und zustandsabhängiger Rückkopplungssteuerungen für hochdimensionale, nichtlineare Systemdynamiken unter allgemeinen Ungleichungsrestriktionen und für allgemeine Gütekriterien ist seit der Entwicklung von Methoden für linear-quadratische Systeme vor mehr als dreißig Jahren ein wichtiges Ziel in der theoretischen Regelungstechnik. Trotz neuerer Entwicklungen (z.B. adaptiver Regelungsverfahren wie Neuro-Dynamischer Programmierung mit adaptiven Kritikern [5]) ist dies bisher im wesentlichen eine Vision geblieben.

Direkte Verfahren (DV) zur numerischen (open loop) Lösung deterministischer optimaler Steuerungsverfahren beruhen auf einer Diskretisierung (Kollokation oder Schießen) von Steuer- und Zustandsvariablen sowie strukturausnützenden, nichtlinearen Optimierungsverfahren. DV wurden erfolgreich in der letzten Dekade entwickelt und haben sich als außerordentlich robust und effizient erwiesen [3,4]. Obwohl die Kenntnis der Theorie der optimalen Steuerung (Maximumprinzip, adjungierte Differentialgleichungen etc.) zur Verwendung von DV nicht erforderlich ist, können zuverlässige Näherungen für die adjungierten Variablen von DV mitberechnet werden [4]. Dies ermöglicht nicht nur a posteriori Tests der berechneten Lösung auf Konsistenz mit der Theorie (z.B. Vorzeichen und Verlauf von Schaltfunktionen) sondern auch die systematische Berechnung von Bündeln parametrisierter, optimaler Trajektorien für Zustands-, Steuer- und adjungierte Variablen für unterschiedliche Anfangsbedingungen. Diese Bündel sind Voraussetzung für eine numerische Synthese der optimalen, nichtlinearen Rückkopplungssteuerung mittels globalen Neuroapproximationen oder global geglätteten, lokalen Taylor-Entwicklungen [1]. Verfahren und Vorgehensweise werden an Beispielen der optimalen Steuerung von Roboterbewegungen [4] sowie der robust optimalen Rückkehrflugbahn eines europäischen Raumgleiters [2] demonstriert.

## Literatur:

- [1] Breitner, M.H.: Nichtlineare, multivariate Approximation mit Perzeptrons und anderen Funktionen auf verschiedenen Hochleistungsrechnern. Habilitationsschrift, Technische Universität Clausthal, 2001.
- [2] Breitner, M.H.: Robust optimal on-board reentry guidance of a space shuttle: Dynamic game approach and guidance synthesis with neural networks.

Journal of Optimization Theory and Applications 107 (2000), 483 - 505.

- [3] Buss, M.; von Stryk, O.; Bulirsch, R.; Schmidt, G.: Towards hybrid optimal control. at-Automatisierungstechnik Vol.48, Nr. 9, 2000, 448-459.
- [4] von Stryk, O.: Numerical Hybrid Optimal Control and Related Topics. Habilitationsschrift, Technische Universität München, 2000.
- [5] White, D.A.; Sofge, D.A. (eds.): Handbook of Intelligent Control. New York: Van Nostrand Reinhold, 1992.

# Optimierungsbasierte Berechnung von Schrittprimitiven und -sequenzen für kamerageführte zweibeinige Roboter

J. Denk

Lehrstuhl für Steuerungs- und Regelungstechnik (LSR)  
Technische Universität München  
80290 München  
Tel.: +49-89-289-23417, Fax: +49-89-289-28340  
<http://www.lsr.ei.tum.de>  
Email: [joachim.denk@ei.tum.de](mailto:joachim.denk@ei.tum.de)

**Schlüsselwörter:** Autonomes Gehen, Schrittprimitiv-Datenbank, Optimalsteuerung

Während der letzten Jahre konnten große Fortschritte auf dem Gebiet der Konstruktion und Stabilisierung von zweibeinigen Laufmaschinen erzielt werden. Demonstrationen humanoider Roboter wie H7 (University of Tokyo) oder Asimo (Honda) lassen dabei leicht den Eindruck entstehen, daß alle Probleme des technischen, zweibeinigen Gehens bereits gelöst wären. Tatsächlich jedoch fanden wichtige Aspekte wie etwa das perzeptionsbasierte, autonome Gehen bislang nur wenig Beachtung [1]. Hierbei liefert beispielsweise ein vorausschauendes aktives Stereokamerasystem Umgebungsinformationen, die es einem Schrittsequenzplaner erlauben das Gangmuster des Zweibeiners so anzupassen, daß Hindernisse umgangen oder überschritten werden können. Anders als bei der Bahnplanung für Industrieroboter muß hierbei jedoch der Tatsache Rechnung getragen werden, daß die unilaterale Kontakte zwischen den Füßen und dem Boden ein Umfallen des Roboters zulassen. Die übertragenen Kräfte und damit die Stabilität der Kontaktsituation können nur durch geeignete Ansteuerung der angetriebenen Gelenke des Roboters beeinflusst werden. Die grundsätzliche Stabilität einer Schrittfolge wird deshalb meist durch Vorausberechnung einer Referenztrajektorie gewährleistet. Als Folge der hohen Ordnung und Nichtlinearität des Systems ist die Berechnung eines derartigen Schrittmusters für einen 3-dimensionalen Roboter jedoch im allgemeinen nicht in Echtzeit möglich. Echtzeitfähigkeit ist jedoch Grundvoraussetzung für flüssiges, perzeptionsbasiertes Gehen. Eine Lösung hierfür ist die Offline-Bereitstellung einer Datenbank mit Schrittprimitiven für Einzelschritte mit verschiedenen Parametern, wie Schrittlänge oder Schritthöhe. Die Schrittprimitive werden dabei so erzeugt, daß sie sich zu einer physikalisch realisierbaren Referenztrajektorie verknüpfen lassen. Die Auswahl und Verknüpfung geeigneter Schrittprimitive erfolgt zur Laufzeit unter Auswertung der aktuellen Ergebnisse der Bildverarbeitung durch einen Schrittsequenzplaner, siehe Abb. 1.

Die Generierung von Schrittprimitiven wird in vielen Arbeiten durch Vorgabe kartesischer Solltrajektorien für einzelne Körperteile des Roboters vereinfacht, z.B. [2]. Die Bereitstellung dieser Trajektorien für den konkreten Roboter beruht dabei auf Intuition des Designers und/oder Beobachtungen und biometrischen Messungen menschlicher Gangmuster. Eine Methode, die nicht auf derartiges Vorwissen über die Bewegung angewiesen ist, wird in [3] beschrieben. Durch Minimierung der metabolischen Energie pro zurückgelegtem Weg mittels dynamischer Optimierung konnten zyklische Gangmuster für das Modell eines menschlichen Körpers erzeugt werden. Trotz massiven Einsatzes von Parallel-Computern

war die benötigte Rechenzeit jedoch enorm.

Am LSR wird derzeit an einer allgemeinen Methode gearbeitet, die es durch Vereinigung der Vorteile der zuvor beschriebenen Ansätze erlaubt, Datenbanken mit dynamisch stabilen Schrittprimitiven automatisch und in vertretbarer Zeit zu synthetisieren. Hierzu wird der Suchbereich für ein Schrittprimitiv zunächst durch die Annahme eingeschränkt, daß ein Schritt aus den 3 Phasen *Pre-Swing*, *Swing* und *Heel-Contact* besteht und ein Fuß immer flach auf dem Boden verweilt während der andere schwingt. Entsprechende Bewegungen werden in Abhängigkeit von den Schrittparametern angegeben. Die Systemdynamik in jeder der Phasen wird dabei unter Annahme von Starrkörperkontakten beschrieben. Durch Nebenbedingungen an die Systemzustände und die eingepprägten Motormomente wird der Suchraum auf physikalisch realisierbare Schrittprimitive beschränkt, die die ZMP- und Reibungs-Bedingungen für Haltungsstabilität erfüllen, die Verknüpfung der Schrittprimitive zu einer Referenztrajektorie zulassen und technisch bedingte Begrenzungen der Gelenkwinkel und Antriebsmomente einhalten. Mittels dynamischer Optimierung wird daraufhin nach dem Schrittprimitiv gesucht, das ein energiebasiertes, gemischtes Gütefunktional minimiert. Zur Lösung des Optimalsteuerungsproblems wird das kontinuierliche Optimierungsproblem durch die Methode der direkten Kollokation [4] in ein diskretes Optimierungsproblem transformiert.

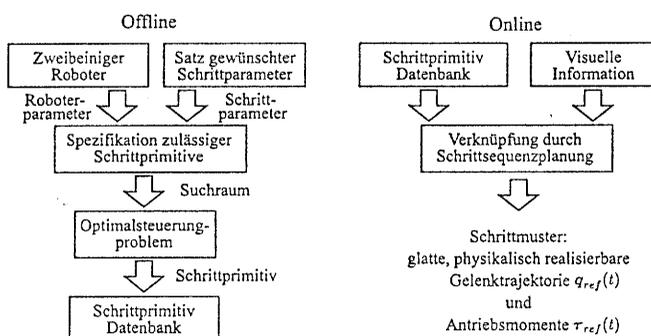


Abbildung 1: Überblick über die Methodik

Die Methodik wird exemplarisch zur Synthese einer Datenbank für einen humanoiden Roboter mit 12 Gelenkfreiheitsgraden eingesetzt. Dynamische Simulationen von adaptiven Schrittsequenzen auf Grundlage der berechneten Referenztrajektorien dienen zur Validierung der Ergebnisse. Im Vortrag werden die resultierenden Bewegungsabläufe durch Animationen illustriert.

## Literatur

- [1] O. Lorch, J. Denk, J. F. Seara, M. Buss, F. Freyberger, and G. Schmidt. ViGWaM — An Emulation Environment for a Vision Guided Virtual Walking Machine. In *Proceedings of the IEEE/RAS International Conference on Humanoid Robots (Humanoids)*, Cambridge, Massachusetts, USA, September 2000.
- [2] K. Nagasaka, H. Inoue, and M. Inaba. Dynamic Walking Pattern Generation for a Humanoid Robot Based on Optimal Gradient Method. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, pages 908–913, Tokyo, Japan, 1999.
- [3] M. G. Pandy and F. C. Anderson. Dynamic Simulation of Human Movement using Large-Scale Models of the Body. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pages 676–681, San Francisco, California, 2000.
- [4] Oskar von Stryk. *User's Guide for DIRCOL: A Direct Collocation Method for the Numerical Solution of Optimal Control Problems*. Lehrstuhl für Höhere Mathematik und Numerische Mathematik, Technische Universität, München, 2.1 edition, 1999.

# Anschlussoptimierende und ressourcenschonende Steuerung des Stadtschnellbahnbetriebes: Ein mehrkriterieller Ansatz zur Echtzeit-Optimierung<sup>1</sup>

Steffen Oettich

Technische Universität Dresden  
Fakultät Verkehrswissenschaften „Friedrich List“  
Lehrstuhl Verkehrsleitsysteme und -prozessautomatisierung  
D-01062 Dresden

e-mail: <mailto:oettich@vina.vkw.tu-dresden.de>  
URL: <http://vini25.vkw.tu-dresden.de/vina>,  
<http://www.intermobil-dresden.de>

**Schlagnorte:** Energieoptimale Zugsteuerung; Stadtschnellbahn; Flexibilisierung; Anschlussoptimierung; Maximumprinzip von PONTRYAGIN; Dynamische Programmierung nach BELLMANN

**Kurzfassung:** In dieser Arbeit wird ein neuartiges Verfahren zur Steuerung von Stadtschnellbahnen vorgestellt, das die widersprüchlichen Anforderungen der Anschlussoptimierung und des energiesparenden Fahrens bestmöglich zu erfüllen vermag. Für die zuletzt genannte Teilaufgabe der energieoptimalen Zugsteuerung lassen sich in der Literatur mehrere Lösungsansätze finden [2–6], und es liegen bereits kommerziell nutzbare Verfahren vor [1].

Ein attraktiver und zugleich wirtschaftlicher Betrieb öffentlicher Verkehrssysteme verlangt allerdings die Verknüpfung von schnellen Beförderungssystemen (S- und U-Bahnen) mit flächenerschließenden Verkehrsträgern (Straßenbahnen und Busse). Die dadurch notwendigen Umsteigevorgänge und insbesondere das Versäumen von (knapp bemessenen) Anschlüssen sind wesentliche Hemmnisse für die Akzeptanz des gebrochenen Verkehrs. Durch die Integration von Verfahren zur Anschlussoptimierung in Fahrerassistenz- bzw. automatischen Zugsteuerungssystemen (ATO) sollen deshalb die Potenziale zur Erhöhung der Anschlusswahrscheinlichkeit insbesondere bei kleinen Übergangszeiten voll ausgeschöpft werden. Daneben sind wirtschaftliche Gesichtspunkte durch die Realisierung des energiesparenden Fahrens weiterhin zu berücksichtigen.

Das Problem wird als Optimierungsaufgabe aufgefasst, die zwei Gütekriterien berücksichtigt: den Verbrauch von Traktionsenergie und die Summe der durch das Versäumen von Anschlüssen entstehenden zusätzlichen Wartezeiten. Die Lösung der Aufgabe erfolgt in zwei Hierarchieebenen. Die erste Ebene wird durch einen energieoptimalen Fahrzeitenregler für die Fahrt zwischen zwei Halten gebildet, der auf einer Lösung des Optimalsteuerungsproblems der Zugfahrt mit minimalem Energieverbrauch unter Nutzung des Maximumprinzips von PONTRYAGIN basiert [3].

---

<sup>1</sup>Die diesem Beitrag zugrunde liegenden Forschungsergebnisse wurden im Rahmen des vom Bundesministerium für Bildung und Forschung geförderten Vorhabens *Intermobil Region Dresden* gewonnen (Förderkennzeichen 19 B 9907A 8).

In der zweiten Ebene wird die Zugfahrt entlang einer Strecke unter Berücksichtigung stochastisch schwankender Anschlussbedingungen optimiert. Die zur Verfügung stehende Gesamtfahrzeitreserve wird entsprechend auf die einzelnen Streckenabschnitte aufgeteilt. Dazu werden das Verfahren der dynamischen Programmierung nach BELLMANN sowie wahrscheinlichkeitstheoretische Modelle zur Abschätzung der Übergangszeiten eingesetzt. Das Auffinden der optimalen Steuerung für eine Stufe des Entscheidungsprozesses erfolgt durch ein Verfahren der Polyoptimierung. Dadurch lässt sich der bestmögliche Kompromiss zwischen den widersprüchlichen Gütekriterien ermitteln. Das Verfahren wurde in MATLAB implementiert. Anhand von Simulationsstudien am Fahr Simulator des Lehrstuhles Verkehrsleitsysteme und -prozessautomatisierung wird unter Nutzung von Fahrplanlagedaten aus dem rechnergestützten Betriebsleitsystem der Dresdner Verkehrsbetriebe AG das Potenzial zur Verbesserung der Anschlusswahrscheinlichkeit bei gleichzeitiger Sicherung eines energiesparenden Betriebes ausgelotet.

## Quellenverzeichnis

- [1] BAIER, T. and I. MILROY: *Metromiser: a system for conserving traction energy and regulating punctuality in urban rail services*. In SCHNIEDER, E. and U. BECKER (eds.): *Proceedings of the 9th IFAC Symposium on Control in Transportation Systems*, Braunschweig, Germany, June, 13–15 2000.
- [2] FERNÁNDEZ, A., F. DE CUADRA, and A. GARCÍA: *SIRO: an optimal regulation system in an integrated control centre for metro lines*. In ALLAN, J., C. BREBBIA, R. HILL, G. SCIUTTO, and S. SONE (eds.): *Computers in Railways V*, vol. 2: *Railway Technology and Environment*, pp. 299–308, Madrid, 1995. published by Computational Mechanics Publications.
- [3] HORN, P.: *Beitrag zur Lösung des Syntheseproblems der energieoptimalen Steuerung einer Zugfahrt*. Dissertation, Hochschule für Verkehrswesen „Friedrich List“, Dresden, April 1973.
- [4] HORN, P.: *Theoretische Grundlagen der energieoptimalen Zugsteuerung und Zuglaufmodifikation unter Berücksichtigung der Spezifik der Dieseltraktion*. In: STROBEL, H. (Hrsg.): *Prozessautomatisierung im Verkehrswesen*, Bd. 27 d. Reihe ZFIV - Report, S. 160–181. Zentrales Forschungsinstitut des Verkehrswesens der DDR, Berlin, 1984.
- [5] HOWLETT, P. G. and P. J. PUDNEY: *Energy-Efficient Train Control*. *Advances in Industrial Control*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York, 1995.
- [6] SKÝVA, L. and P. CENEK: *Energy-optimal control in transportation systems*. In *Proceedings of the 4th IFAC/IFIP/IFORS Conference on Control in Transportation Systems*, Baden-Baden, Apr. 1983.

# EU-Forschungsprojekt zur Multi-Agenten-basierten Fehlerdiagnose

Dr.-Ing. B. Köppen-Seliger

Automatisierungstechnik und komplexe Systeme  
Gerhard-Mercator-Universität Duisburg  
Bismarckstr. 81, BB, 47048 Duisburg  
Tel.: +49/203/379 2929  
Fax: +49/203/379 2928  
Email: [koeppen-seliger@uni-duisburg.de](mailto:koeppen-seliger@uni-duisburg.de)

Prof. Dr.-Ing. S. X. Ding

Automatisierungstechnik und komplexe Systeme  
Gerhard-Mercator-Universität Duisburg  
Bismarckstr. 81, BB, 47048 Duisburg  
Tel.: +49/203/379 3385  
Fax: +49/203/379 2928  
Email: [s.x.ding@uni-duisburg.de](mailto:s.x.ding@uni-duisburg.de)

**Schlüsselwörter:** Fehlerdiagnose, Multi-Agenten-Systeme, verteiltes Rechnen, komplexe Systeme.

Das übergeordnete Ziel dieses EU-Forschungsprojekts ist die Steigerung der Zuverlässigkeit, Verfügbarkeit und Sicherheit komplexer technischer Systeme [1-5], wie z.B. industrieller Anlagen, hochentwickelter Fahrzeuge und Maschinen, sowie komplexer Infrastrukturen durch den Einsatz eines Tools, das in der Lage ist, anormale und fehlerhafte Prozesszustände zu diagnostizieren. Die Architektur dieses Tools basiert auf einem Multi-Agenten-Konzept [6], in dem die Agenten neben den Diagnoseaufgaben, sowohl Aufgaben der Daten- und Wissens-Aquisition und des Managements, die Wahl der Diagnosetools, die Konfliktlösung bei der Entscheidungsfindung als auch die Dokumentation und Information des Anlagenpersonals zu leisten haben.

In diesem Zusammenhang bezeichnen „Agenten“ Softwarekomponenten, die auf der gleichen oder auf verschiedenen Computerplattformen laufen, die zur Erfüllung ihrer Aufgaben wie z.B. der Datenaquisition und des Monitoring miteinander kommunizieren. Dadurch hat man eine verteilte Architektur zur Verfügung, die ein erweiterbares, modulares System darstellt.

Die für das Projekt MAGIC geplante, verteilte Architektur beruht auf dem in Abbildung 1 dargestellten Multi-Agenten-Multi-Ebenen (MAME) Konzept. Darin wird die Aufgabe der Fehlerdiagnose in komplexen Systemen und des Operator Support auf eine Anzahl von intelligenten Agenten verteilt, die ihre Aufgaben nahezu autonom bearbeiten und über die MAGIC Architektur kommunizieren.

Ganz allgemein soll das MAGIC Tool in verschiedenen industriellen Bereichen einsetzbar sein, und zwar immer dann, wenn Datenaquisition und -management zur Diagnose benötigt werden, um die Zuverlässigkeit und Sicherheit komplexer technischer Prozesse zu gewährleisten. Die möglichen Einsatzgebiete reichen von der Stahl- und Automobilindustrie über verfahrenstechnische Anlagen, (Kern-) Kraftwerke sowie Massentransportmittel, sei es auf der Schiene, zu Wasser oder in der Luft. Grundvoraussetzung für den Einsatz eines solchen Tools ist allerdings das Vorhandensein sowohl einer Datenbank mit adequadaten historischen Daten als auch analytischem und/oder Expertenwissen über den zu überwachenden Prozess.

Im Rahmen dieses EU-Forschungsprojekts soll der Prototyp des MAGIC-Tools an einem Walzwerksprozess implementiert werden. Durch einen weiteren Partner soll der Markt der Automobilindustrie für MAGIC erschlossen werden.

## Literatur:

- [1] Aström, K. J., Albertos, P., Blanke, M., Isidori, A., Schaufelberger, Sanz, R. (Eds.) (2000). Control of Complex Systems, Springer Verlag.
- [2] Chen, J., Frank, P.M., Kinnaert, M., Lunze, J. and Patton, R. J. (2000). Fault detection and isolation, In: Control of Complex Systems, (K.J. Astrom, P. Albertos, M. Blanke, A. Isidori, W. Schaufelberger et R. Sanz (Eds.)), Springer, pp 191-208.
- [3] Frank, P. M., Ding, S. X., Köppen-Seliger, B. (2000). Current Developments in the Theory of FDI, Safeprocess 2000, Budapest, Vol. 1, pp. 16 – 27.
- [4] Gertler, J. J. (1998). Fault Detection and Diagnosis in Engineering Systems, Marcel Dekker, Inc., NY, 484 pages.
- [5] Isermann, R. (1994). Integration of Fault Detection and Diagnosis Methods, SAFEPROCESS '94, pp. 597-612, Helsinki.
- [6] Knapik, M. and Johnson, J. (1998). Developing Intelligent Agents for Distributed Systems, McGraw-Hill, NY.

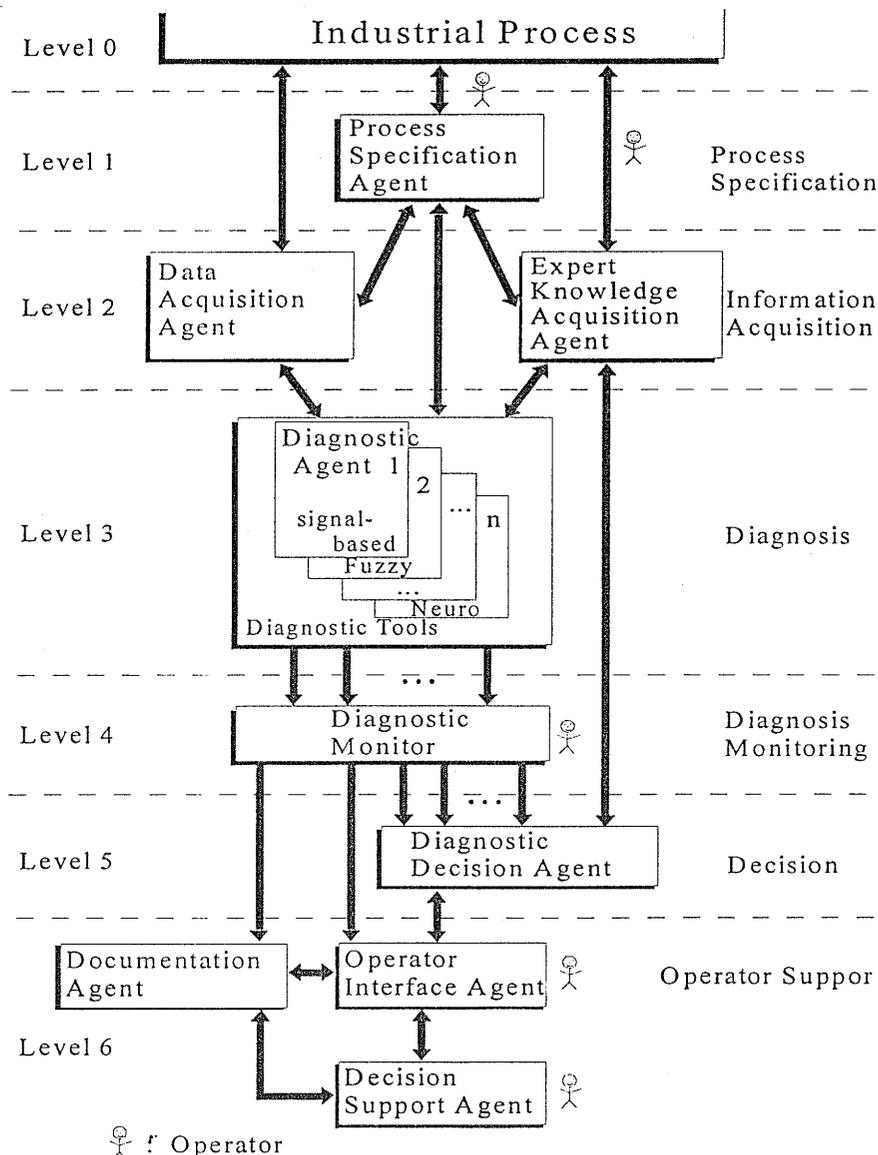


Abbildung 1: Multi-Agenten-Multi-Ebenen (MAME) Konzept

# Werkzeugkopplung im Systementwurf: Konzept, Umsetzung und Anwendung

Stefan König, Eckehard Schnieder

Institut für Regelungs- und Automatisierungstechnik

Technische Universität Braunschweig

Langer Kamp 8, 38106 Braunschweig

koenig@ifra.ing.tu-bs.de

## ***Motivation***

Der Einsatz rechnergestützter Werkzeuge für den Systementwurf (CAE-Tools) ist Stand der Technik. Die stetig steigende Produktkomplexität macht die räumlich verteilte, firmenübergreifende Zusammenarbeit bei der Erstellung hybrider Simulationsmodelle notwendig, beispielsweise bei der Realisierung sogenannter "Digitaler Lastenhefte" in der Automobilindustrie. Hieraus erwachsen neue Anforderungen an die zum Einsatz kommenden Werkzeuge, wie beispielsweise die Unterstützung objektorientierten Designs und Informationskapselung zur Realisierung kooperativen Arbeitens [Lu1995], sowie die Kombinierbarkeit mehrerer Entwurfswerkzeuge zwecks Nutzung werkzeugspezifischer Stärken und der Kombination von Beschreibungsmitteln.

## ***Konzept***

Die informationstechnische Verknüpfung etablierter Entwurfswerkzeuge durch Werkzeugkopplung stellt einen Lösungsansatz zur Erfüllung der genannten Anforderungen dar. Hierbei bilden die beteiligten Werkzeuge ein kooperatives System und werden mittels einer Software-Infrastruktur zu einem virtuellen Gesamtwerkzeug verknüpft. Durch die Bereitstellung von Kommunikationskanälen sowie Synchronisations- und Koordinationsmechanismen durch die Software-Infrastruktur, die in einem sogenannten Rahmenwerk implementiert ist, wird die Erstellung und Bearbeitung verteilter Simulationsmodelle ermöglicht. Von zentraler Bedeutung ist in diesem Zusammenhang neben der Auswahl eines geeigneten Kommunikationsstandards wie z.B. CORBA [OMG2001] die Gestaltung geeigneter Koordinationsmechanismen [LiFi1995] [KlSt1997], insbesondere im Hinblick auf Fragestellungen der Kopplung von kontinuierlich, zeitdiskret und ereignisdiskret arbeitenden Simulationswerkzeugen.

## **Umsetzung und Anwendung**

Der Prototyp eines Rahmenwerks zur Werkzeugkopplung wurde unter dem Namen ITC Framework (Inter Tool Cooperation) [KöBi2000] am Institut für Regelungs- und Automatisierungstechnik umgesetzt und im Rahmen eines Projekts zur Entwicklung eines innovativen Betriebskonzept für spurgeführten Verkehr zum Einsatz gebracht [BiKö2000]. In diesem Projekt kamen Werkzeuge wie MATLAB Simulink, Stateflow, Artifex, sowie Visual State und Statemate zum Einsatz.

Die Weiterentwicklung des ITC Framework wird derzeit in Kooperation mit der EXTESSY AG, Wolfsburg, durchgeführt und wird bei der Erstellung digitaler Lastenhefte für die Automobilindustrie eingesetzt. Hierbei steht die Erweiterung von MATLAB Simulink und Stateflow zur Realisierung verteilter Simulationsmodelle im Vordergrund.

## **Literatur**

- [BiKö2000] Bikker, G.; König, S.: *Validation des Betriebs virtueller Zugverbände durch die verteilte Simulation mit gekoppelten Engineering-Werkzeugen*. Proc. Gesamtverkehrsforum 2000, Braunschweig, 06.-07. April 2000
- [KlSt1997] Klein, U.; Straßburger, S.: *Zivile Anwendungspotentiale der High Level Architecture (HLA)*. Tagungsband Symposium Neue Technologien in der wehrtechnischen Simulation, Mannheim, 30. September - 02. Oktober 1997
- [KöBi2000] König, S.; Bikker, G.: *Developing and Implementing a Framework for CASE Tool Coupling*. Proc. ECEC 2000 – 7<sup>th</sup> European Concurrent Engineering Conference, Leicester, 17.-19. April 2000
- [LiFi1995] Lin, Y.-B.; Fishwick, A.: *Asynchronous Parallel Discrete Event Simulation*. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, 1995
- [Lu1995] Lubich, H. P.: *Towards a CSCW Framework for Scientific Cooperation in Europe*. Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg, 1995
- [OMG2001] Object Management Group: *The Common Object Request Broker: Architecture and Specification*. Revision 2.5, September 2001 (<http://www.omg.org>)

# Bestimmung der Lastcharakteristiken von Elektroenergiesystemen mit Fortsetzungsmethoden

M. Fette\*

\*Institut für Elektrische Energieversorgung  
FB 14 - Elektrotechnik und Informationstechnik  
Universität Paderborn  
Pohlweg 55, 33098 Paderborn  
Tel.: +49/5251/60 3168  
Fax.: +49/5251/60 3235  
Email: fette@eevnic.uni-paderborn.de

I. Winzenick\*\*

\*\*Professur für Regelungstechnik  
Fachbereich Elektrotechnik  
Universität der Bundeswehr Hamburg  
Holstenhofweg 85, 22043 Hamburg  
Tel.: +49/40/6541 3393  
Fax: +49/40/6541 2822  
Email: Ingo.Winzenick@UniBw-Hamburg.de

**Schlüsselwörter:** Lastmodelle, Nichtlineare Systeme, Fortsetzungsmethoden, Bifurkationsanalysen

Die Liberalisierung der Energiemärkte hat dazu geführt, dass sich beim Geschäft mit der Energie echtes Marktgeschehen einstellt. Bei Strom wie bei Gas. Die Energie wird frei verhandelt, Kraftwerke werden gebaut und ganze Versorgungsnetze werden fusioniert.

In vorhandene elektrische Netze werden zunehmend dezentrale Energiewandler integriert. Stellvertretend seien hier Anlagen der Kraft-Wärme-Kopplung auch mit Brennstoffzellen, Windkraftanlagen, Fotovoltaik, usw. genannt.

Viele kleine Anlagen werden zukünftig zu „virtuellen Kraftwerken“ („virtual utilities“) zusammengefasst und automatisiert betrieben.

Bisherige Netzführungsstrategien sind für diese Fragestellungen nur noch eingeschränkt oder gar nicht geeignet, wenn an eine konzentrierte Integration dieser dezentralen Energiewandler gedacht wird. Neben kompatiblen Kraftwerksstrukturen mit einer höheren Flexibilität sowie kurzen An- und Abfahrzeiten müssen zusätzliche Geräte in das Netz eingebaut werden, um noch „flexibler“ auf diese neuen Herausforderungen reagieren zu können: Unsere bekannten Energieversorgungssysteme müssen in „Flexible Alternating Current Transmission Systems“ umgebaut werden.

Bereits vorhandene oder in Entwicklung befindliche FACTS-Geräte können zukünftig zur Sicherung der Stabilität und zur Verbesserung der Versorgungsqualität verwendet werden.

Die wesentliche Aufgabe dabei ist, das Zusammenspiel der unterschiedlichen Charakteristiken der Erzeuger und der Verbraucher mit dem Versorgungsnetz zu koordinieren. Das dynamische Verhalten der Elektroenergiesysteme wird dabei maßgeblich durch die Lastcharakteristiken bestimmt.

Zur Lösung dieser anspruchsvollen Aufgaben werden auch an die Analyse- und Synthesewerkzeuge neue Anforderungen gestellt. Die jetzt schon zu beobachtenden komplizierteren Dynamiken der Netze verlangen neue, flexiblere Werkzeuge, die eine weitaus größere Aussagefähigkeit besitzen.

Konkrete Probleme können für Netze nur noch dann gelöst werden, wenn man die Vielfalt möglichst aller Lösungen der Modellbeschreibungen kennt, und zudem überprüfen kann, ob die verwendeten Modelle tatsächlich alle Facetten der beobachteten realen Dynamiken darstellen können. Die Analyse des Bifurkationsverhaltens ist eine der wesentlichen Fragestellungen zur Charakterisierung des dynamischen Verhaltens der nichtlinearen Elektroenergiesysteme.

Eine Möglichkeit diesen Problemen zu begegnen ist die Nutzung von Fortsetzungsmethoden. Die Anwendung dieser Methoden auf Energieversorgungssysteme bietet Vorteile. Neben der

Möglichkeit einer Zeitreihenberechnung, können alle Lösungen des Systems in Abhängigkeit von interessierenden Parametern bestimmt werden. Weiterhin können mächtige Softwarepakete die Eigenschaften der berechneten Punkte klassifizieren und spezielle Bifurkationspunkte fortsetzen.

In diesem Beitrag werden zunächst bekannte Lastmodelle mit dem Ziel analysiert, Fortsetzungsmethoden anzuwenden. Die Modelle werden in Klassen eingeteilt, da viele in der Art bestimmt wurden, um ihnen zugrunde liegende Zeitreihen möglichst gut zu approximieren. Als Ergebnis wird ein allgemeines Lastmodell vorgestellt, welches die strukturellen Eigenschaften der diskutierten Modelle zusammenfasst.

Das Bifurkationsverhalten dieses Lastmodells in einer charakteristischen Ersatzmodellierung eines Elektroenergiesystems wird mithilfe von Fortsetzungsmethoden analysiert. In physikalisch sehr wichtigen Betriebsbereichen können spezielle Bifurkationen mit zugehörigen komplizierten Dynamiken nachgewiesen werden, die auch in realen Systemen beobachtet wurden. Alle numerischen Berechnungen erfolgten mit den Softwaretools MAPLE, MATLAB und CONTENT.

Ausgehend von den Analysen und Berechnungen wird ein Ausblick gegeben, wie diese Ergebnisse für die Bestimmung der FACTS-Geräte zur Manipulation des Bifurkationsverhalten der betrachteten Systeme genutzt werden können und welche Anforderungen daraus abgeleitet an zukünftige Automatisierungsstrukturen gestellt werden.

## Literatur:

- [1] Dobson, I.; Chiang, H.D.; Thorp, J.S.; Fekih-Amed, L.F.: On Voltage Collapse in Electric Power Systems, in der Fachzeitschrift IEEE Transactions on Circuits and Systems I, (1990), 601-611.
- [2] Fette, M.: Dynamik nichtlinearer Elektroenergiesysteme, Habilitationsschrift, Universität Paderborn, 2001
- [3] Srivastava, K.N.; Srivastava, S.C.: Elimination of Dynamic Bifurcation and Chaos in Power Systems Using Facts Devices, in der Fachzeitschrift IEEE Transactions on Circuits and Systems I, (1998), 72-78.
- [4] Seydel, Rüdiger; From Equilibrium to Chaos - A Practical Bifurcation and Stability Analysis- erschienen bei Elsevier Science Publishing Inc.; (1988)

# Modellbasierte Prädiktion der Granulopoese bei akuter und chronischer Verstrahlung

F. Lehn \*

E.P. Hofer \*\*

\* Abteilung Meß-, Regel- und Mikrotechnik  
Universität Ulm  
Albert-Einstein-Allee 41, D-89081 Ulm  
Tel.: +49/731/50-26323  
Fax: +49/731/50-26301  
Email: frank.lehn@e-technik.uni-ulm.de

\*\* Abteilung Meß-, Regel- und Mikrotechnik  
Universität Ulm  
Albert-Einstein-Allee 41, D-89081 Ulm  
Tel.: +49/731/50-26300  
Fax: +49/731/50-26301  
Email: ep.hofer@e-technik.uni-ulm.de

**Schlüsselwörter:** Retardierte Systeme, Parameterschätzung, Prädiktion, Granulopoese

Von Seiten der Medizin besteht seit geraumer Zeit eine erhebliche Nachfrage nach einem System, das Ärzte bei der Diagnose und Therapie des akuten Strahlensyndroms unterstützt. Diese Nachfrage basiert im wesentlichen auf den Erfahrungen nach der Reaktorkatastrophe in Tschernobyl 1986. Hier zeigte sich, daß gerade in Unfallsituation sehr vielen verstrahlten Personen nur eine sehr geringe Zahl von Ärzten gegenübersteht, die meist keine speziellen Kenntnisse und Erfahrungen auf dem Gebiet der Strahlenmedizin besitzen. In der Abteilung Meß-, Regel- und Mikrotechnik der Universität Ulm wird seit längerer Zeit die Entwicklung eines Systems zur Schätzung des Schweregrades einer Strahlenexposition vorangetrieben. Das System basiert auf einem biomathematischen Modell der menschlichen Granulopoese, da Granulozyten, eine Untergruppe weißer Blutkörperchen, einen hervorragender Indikator zur Beurteilung des Schweregrades einer solchen Strahlenexposition darstellen. Der Begriff Granulopoese beschreibt hierbei das Zellerneuerungssystem der Granulozyten, also den dynamischen Prozeß der Entstehung von Granulozyten ausgehend von Stammzellen im Knochenmark bis hin zur Ausschüttung ausgereifter Granulozyten in das periphere Blut. In der Vergangenheit wurden sehr gute Ergebnisse mit einem Modell der Granulopoese von Fliedner und Steinbach [1] erzielt. Dieses Modell wird durch ein System von 37 nichtlinearen, gewöhnlichen Differentialgleichungen beschrieben. Die Beurteilung des Schweregrades einer Verstrahlung wird mit Hilfe der Schätzung von Anfangswerten dieser Modellgleichungen durchgeführt, wobei eine Least-Squares-Zielfunktion, bestehend aus Modellausgang und realen Granulozytenmeßdaten, minimiert wird.

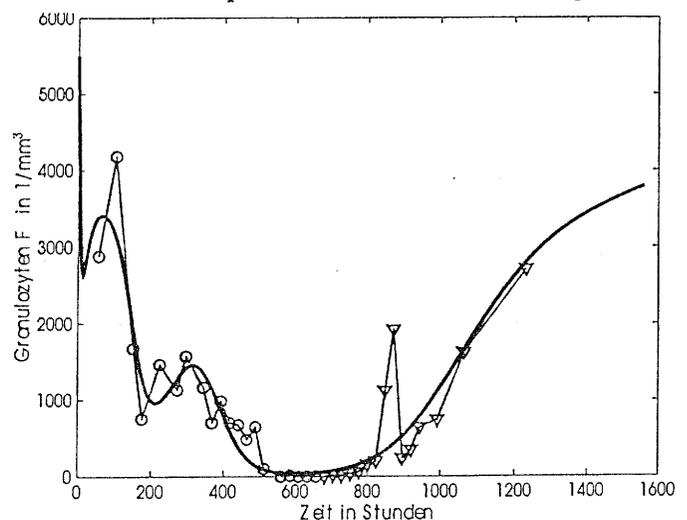


Bild 1. Prädiktionsergebnis (durchgezogene Linie) bei akuter Verstrahlung für reale Granulozytendaten eines Tschernobyl-Opfers. Die Kreise zeigen reale Meßdaten, die zur Schätzung verwendet wurden, die Dreiecke zeigen weitere, für die Schätzung nicht verwendete, Meßdaten.

In einem neueren Projekt wurde eine alternative Modellierung der Granulopoese mit Hilfe retardierter Differentialgleichungen [2] durchgeführt, wobei die auftretenden Retardierungen aufgrund des biologischen Hintergrundes im Modell zustandsabhängig auftreten. Die daraus resultierenden Problemstellungen der Simulation und Parameterschätzung für diese Klasse

von Differentialgleichungen wurden untersucht [2,3] und entsprechende numerische Verfahren vorgeschlagen, getestet und implementiert. Aufgrund der Fülle von regelungstechnischen Anwendungen bei totzeitbehafteten technischen und nichttechnischen Systemen ist die Frage nach geeigneten Algorithmen höchst aktuell. Insbesondere im Bereich der Parameterschätzung sind die zugrundeliegenden Problemstellungen oft nur wenig bekannt.

Als Ergebnis dieses Projekts entstand das System MODRAT (Model Based Radiation Syndrome Treatment), mit dem sehr gute Ergebnisse für den Fall der akuten Verstrahlung mit realen Patientendaten erzielt werden konnten. Bei der Implementierung des Systems wurde insbesondere auf eine hohe Effizienz der verwendeten Algorithmen zur Simulation und Parameterschätzung Wert gelegt um akzeptable Rechenzeiten im unteren Minutenbereich zu gewährleisten. Hierbei wurden Runge-Kutta-Verfahren gepaart mit Hermite-Interpolationsverfahren zur Simulation und SQP-Verfahren zusammen mit Verfahren der Automatischen Differentiation zur Lösung des Optimierungsproblems in C++ implementiert. Bild 1 zeigt ein typisches Prädiktionsergebnis für den Fall einer akuten Verstrahlung basierend auf dem Totzeitmodell mit realen Granulozytendaten eines Opfers des Reaktorunfalls in Tschernobyl.

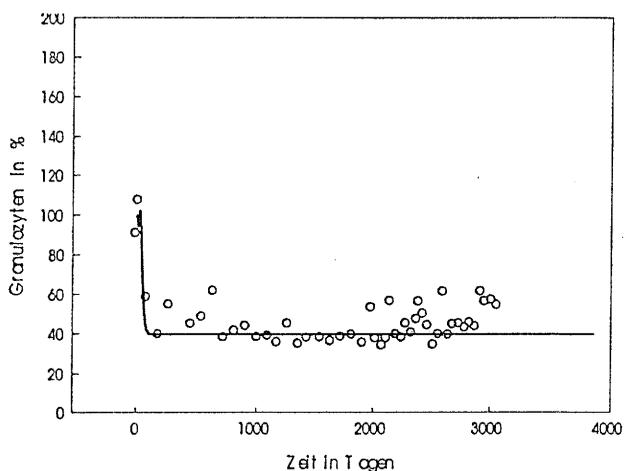


Bild 2. Schätzergebnis (durchgezogene Linie) bei chronischer Verstrahlung für einen langzeitverstrahlten Hund. Die Kreise zeigen reale Meßdaten, die zur Schätzung verwendet wurden.

Motiviert durch die guten Ergebnisse für den Fall der akuten Verstrahlung wurden in einem weiteren Schritt die bisherigen Modellgleichungen um Terme zur Beschreibung einer chronischen Verstrahlung erweitert. Auch mit dem erweiterten Modell konnten sehr gute Ergebnisse in Übereinstimmung mit realen Daten erzielt werden, wobei hierbei nicht die Anfangsbedingungen der Modellgleichungen identifiziert wurden, sondern eine sogenannte Sterberate (kill-rate), die für den Fall der chronischen Verstrahlung repräsentativ ist. Ein typisches Schätzergebnis für einen langzeitverstrahlten Hund ist in Bild 2 angegeben.

## Literatur:

- [1] T.M. Fliedner und K.-H. Steinbach, *Simulationsmodelle von Perturbationen des granulozytären Zellerneuerungssystems*, in: Wilhelm Doerr (Ed.): Modelle der pathologischen Physiologie, Kap. 3.1, S. 89-105, 1987.
- [2] E.P. Hofer, B. Tibken und F. Lehn. *Biomathematical Models with StateDependent Delays for Granulopoiesis*. In M. Grötschel, S.O. Krumke, and J. Rambau (Eds.): Online Optimization of Large Scale Systems, Kap. 4, S. 433-453. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 2001.
- [3] E.P. Hofer, B. Tibken und F. Lehn. *Differential Equations with StateDependent Delays*. In M. Grötschel, S.O. Krumke, and J. Rambau (Eds.): Online Optimization of Large Scale Systems, Kap. 4, S. 413-432. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 2001.

# Automatisierungstechnik in der Anästhesie

Adolf Hermann Glattfelder\*

\* Institut für Automatik  
ETH Zürich

ETH Zentrum, CH-8092 Zürich / Schweiz

Tel.: +41/1/632 53 00

Fax: +41/1/632 12 11

Email: glattfelder@aut.ee.ethz.ch

Konrad S. Stadler \*\*

\*\* Institut für Automatik  
ETH Zürich

ETH Zentrum, CH-8092 Zürich / Schweiz

Tel.: +41/1/632 65 71

Fax: +41/1/632 12 11

Email: stadler@aut.ee.ethz.ch

**Schlüsselwörter:** Anästhesie, Modellbasierte Regelung, Artefakt - und Ausfallerkennung

Seit etwa zehn Jahren besteht eine enge Kooperation zwischen dem Institut für Anästhesiologie am Universitätsspital Bern (Prof. A.M. Zbinden) und dem Institut für Automatik an der ETH Zürich (Prof. A.H. Glattfelder).

Das Ziel ist aus medizinischer Sicht eine grösstmögliche Schonung des Patienten durch präzise Führung der Anästhesie und optimale Dosierung der Anästhetika, ein vertieftes Verständnis der Wirkung dieser Medikamente auch in dynamischer Hinsicht, und eine Klärung, inwieweit solche Systeme den Anästhesisten von Routine-Handgriffen entlasten können.

Aus der Sicht der Automatik geht es um den Entwurf, die Implementierung und Erprobung von Regelungen mit all ihren Zusatzfunktionen, wie sie für den Einsatz am Patienten im OP erforderlich sind, und dies in einem sehr anspruchsvollen Gebiet, wo der übliche Automatisierungsgrad noch vergleichsweise tief ist. Ein besonderes Gewicht kommt dabei der Modellierung für die Regelung zu.

Methodisch kommt dabei ein sehr systematisches Vorgehen zur Anwendung, beginnend mit einer ersten Spezifikation, der theoretischen und experimentellen Modellbildung, dem Reglerentwurf, der Implementierung auf einem geeigneten Zielsystem, ersten Einzel-Operationen zur Überprüfung der Funktionen und ihrer Justierung, bis hin zu kurzen klinischen Reihenuntersuchungen an rund 20 Patienten.

In einer ersten Projektphase wurden jene Regelkreise untersucht, die erfahrungsgemäss den Anästhesisten im Hand-Betrieb die meisten Schwierigkeiten bereiten. Eine erste Generation von Regelungen wurde auf der Basis von Fuzzy Logic Control entworfen. Dann wurden modellbasierten Regelungen (beobachterbasierte Zustandsregelungen) eingesetzt, [1].

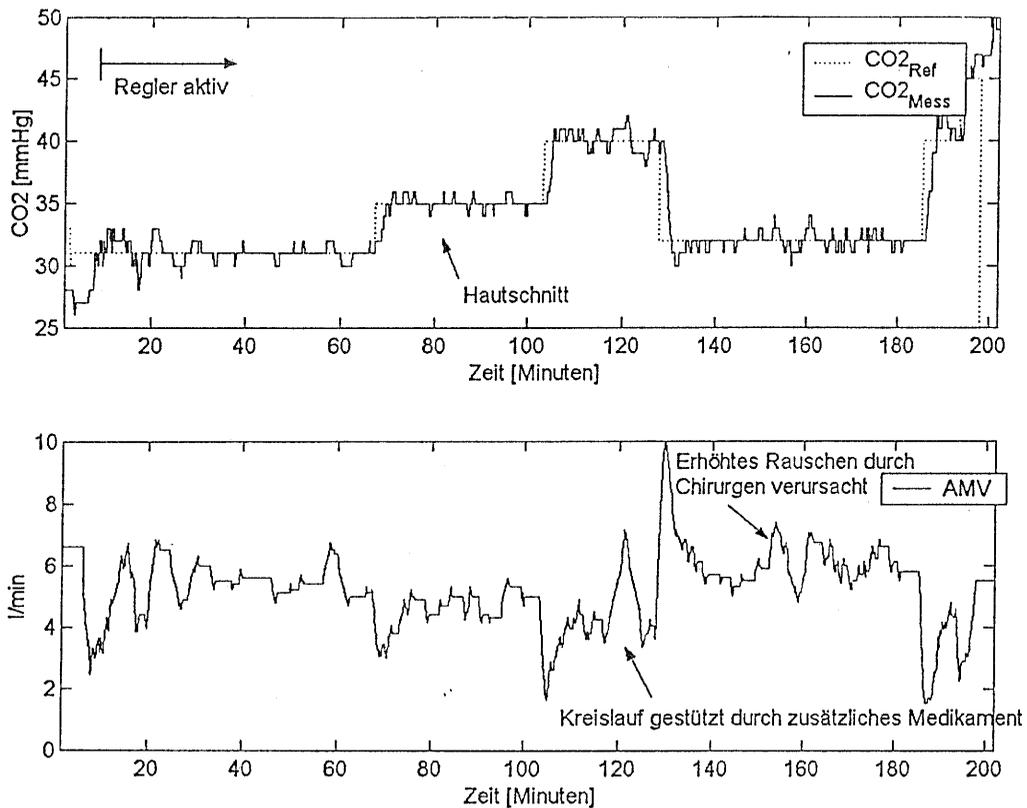
Es wurden wichtige Zusatzfunktionen wie die Mess-Artefakterkennung und -überbrückung entwickelt und erprobt, ebenso für die Erkennung von Fehlfunktionen in Teilsystemen, [2].

Weiter ging es um den Aufbau von Regelkreisen für Anästhesie- und Analgesie-Tiefe, wobei die Medikamente bereits gewisse Interaktionen aufweisen, d.h. es entstehen Kopplungen. Dabei wurden auch andere Regler-Entwurfsverfahren eingesetzt, [3].

Die laufenden Arbeiten betreffen den Aufbau einer Plattform mit modellbasierten Regelkreisen für die vier wichtigsten Zielgrössen der Anästhesie, d.h. hinreichende Anästhesietiefe, Minderung der Schmerzreaktion, Muskelrelaxation und Beatmung. Weiter geht es um die Realisierung einer systematischen ‚hardware-in-the-loop‘ Test-Prozedur für neue Algorithmen vorgängig zur ersten Erprobung am Patienten und zur Schulung der Anästhesisten.

Im Vortrag wird die Aufgabenstellung als Mehrgrössen-System genauer erläutert. Dann wird auf den verwendeten mathematischen Modellansatz eingegangen, der sich als recht durchgängig anwendbar erwiesen hat. Es werden die wesentlichen Unsicherheiten besprochen. Weiter wird die einheitlich angewendete Entwurfsmethodik dargelegt und diskutiert, ebenso die durchgängige Vorgehensweise zur Erkennung und Behebung von Artefakten, und das Konzept für die Kommunikation mit dem Anästhesisten.

Es werden aktuelle Resultate aus der klinischen Erprobung (vgl. folgendes Bild) gezeigt und erläutert.  
 Ein Ausblick beschliesst den Vortrag.



Typisches Verhalten der Beatmungsregelung mit der Regelgrösse ‚endtidaler CO<sub>2</sub>-Partialdruck‘ (oben) und der Stellgrösse ‚Atem-Minuten-Volumen‘ (unten) als Eingang zum Respirator-Subsystem, über die Dauer einer Operation. Dokumentiert sind Führungs- und Stör-Antwortverhalten für übliche Auslenkungen. Dabei wurden alle anderen Stellgrössen vom Anästhesisten ‚von Hand‘ betätigt.

### Literatur:

- [1] Derighetti M., C.W.Frei, A.H. Glattfelder, A.M. Zbinden  
 Modellbasierte Regelung in der Anästhesie  
 "at-Automatisierungstechnik", 48, 1999, no. 2, p.80 - 88
- [2] Frei, Christian Walter  
 Fault Tolerant Control Concepts applied to Anaesthesia  
 Dissertation ETH, Nr. 13'599, April 2000
- [3] Gentilini, Andrea Luca  
 Feedback Control of Hypnosis and Analgesia in Humans  
 Dissertation ETH Zürich, Nr. 14'070 , April 2001

# Objekt-Orientierte Modellierung und Optimierung für Abwasserreinigungsprozesse

G. Reichl \*

H. Puta \*

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

**Schlüsselwörter:** objekt-orientierte Modellierung, Simulation, Modelica, Abwasserreinigung

Vom Gesichtspunkt einer nachhaltigen Abwasserwirtschaft, die heutzutage immer strengerer gesetzlichen Anforderungen unterliegt und dem immensen Kostendruck auf die Betreiber von kommunalen Kläranlagen, wird es mehr und mehr notwendig, den Abwasserreinigungsprozess zu simulieren und darüber hinaus zu optimieren. Daraus resultiert auch das globale Ziel der Reduzierung der Belastung für die Umwelt (Vorfluter) bei gleichzeitiger Minimierung der Abwasserbehandlungskosten, wobei eine Verbesserung des Einen eine Verschlechterung des Anderen bewirkt. Die Untersuchungen beziehen sich dabei gegenwärtig auf eine anlagenweite Betrachtung, d.h. also nicht nur auf die biologische Abwasserreinigung und die Nachklärung, sondern auch auf Schlammbehandlung, -entsorgung und die Energiegewinnung durch Biogasproduktion. Sogar die Einbeziehung des Kanalnetzes in den Entscheidungshilfeprozess ist Gegenstand einer gesamtheitlichen Untersuchung.

Viele Kläranlagen wurden in den letzten Jahren neu- bzw. ausgebaut und mit moderner Mess- und Prozessleittechnik versehen. Gewöhnlich kommen dabei SISO-Regelkreise mit Standard PID- oder Zwei-Punkt-Reglern zur Stabilisierung der verschiedenen Prozessvariablen zum Einsatz, deren Sollwerte auf Erfahrungswerten des Operators beruhen. Eine Verbesserung des Anlagenbetriebes kann aber durch eine optimale Koordinierung der Regelkreise (Sollwerte) bzw. deren Steuergrößen erreicht werden, wozu diese Arbeit einen Beitrag leisten soll.

Die Modellierung der Abwasserreinigungsprozesse erfolgt mittels der objekt-orientierten Modellierungssprache Modelica [5] auf der Basis des international anerkannten deterministischen Belebtschlammmodells ASM No. 1 [3] in Kombination mit einem Schichtenmodell für die Nachklärung. Dazu wurde eine Modellbibliothek *WasteWater* für Modelica geschaffen, die die wesentlichen Komponenten einer Kläranlage, wie z.B. belüftetes und unbelüftetes Becken, Nachklärung, diverse Messinstrumente zur Informationsgewinnung und ein Gebläse enthält.

Die object-orientierte Herangehensweise bietet den Vorteil einer hierarchischen Modellstruktur und der Wiederverwendbarkeit von Teilkomponenten in einer multidisziplinären Modellierungsumgebung für komplexe und große dynamische Systeme. Das Hauptziel allerdings besteht in der Ausnutzung des durch das Modellierungssystem Dymola [1] automatisch generierten effizienten Simulationscodes zu Optimierungszwecken.

Basierend auf dem Objektdiagramm einer Kläranlage, das mit Hilfe der *WasteWater*-Bibliothek erstellt wurde, wird das physikalische Systemmodell in eine mathematische Beschreibung der Form eines differenzial-algebraischen Gleichungssystems (DAE

Differential-Algebraic Equation System) übersetzt. Dieses flache sortierte DAE-Modell wird nun zum Einen zur Simulation verschiedener typischer Betriebszustände und zum Anderen zur Formulierung und Lösung eines nichtlinearen Optimalsteuerungsproblems verwendet.

Das Optimalsteuerungsproblem wird für zwei unterschiedliche Gütefunktionale gelöst. Einerseits werden die Energiekosten minimiert und andererseits sollen die Kosten für die aufgewendete Energie, durch Ausnutzung von Hoch- und Niedrigtarif für die Elektroenergie, minimiert werden. Beschränkungen bestehen in den Zustandsgrößen durch die gesetzlich zulässigen Ablaufkonzentrationen einer Kläranlage und in den Steuergrößen auf Grund der installierten Pumpenleistungen.

Das Optimalsteuerungsproblem wird in ein großes, nichtlineares, beschränktes Optimierungsproblem in den Zustands- und Steuervariablen umgewandelt. Die numerische Lösung erfolgt mit dem Verfahren der sequentiellen quadratischen Programmierung (SQP), welches in dem Optimierungstool Omuses/HQP [2] implementiert ist.

Ein deutliches Einsparungspotential an Elektroenergie und bei Ausnutzung der Tarifstruktur auch an Kosten für den Energiebezug kann aufgezeigt werden [4].

## Literatur

- [1] H. Elmqvist, D. Brück, S. E. Mattson, H. Olsson, and M. Otter. Dymola – dynamic modeling laboratory. User’s manual. Dynasim AB. Sweden, 2001.
- [2] R. Franke and E. Arnold. The solver Omuses/HQP for structured large-scale constrained optimization: algorithm, implementation, and example application. In *Sixth SIAM Conference on Optimization*, Atlanta, 1999. SIAM.
- [3] M. Henze, C. P. L. Grady Jr, W. Gujer, G. v. R. Marais, and T. Matsuo. Activated sludge model no. 1. Scientific and technical report no. 1, IAWQ, 1987.
- [4] G. Reichl. Dynamische Simulation und Optimierung einer Kläranlage nach dem Beladungsverfahren. Diplomarbeit, Technische Universität Ilmenau, 1998.
- [5] H. Tummescheit and J. Bartanus. Modelica-Homepage. <http://www.modelica.org/>, 2001.

# Regelungstechnik in der Kardiomedizin

Jürgen Werner

Lehrstuhl für Biomedizinische Technik  
Ruhr-Universität Bochum  
MA 4/59, 44780 Bochum  
Tel.: +49/234/32-25442  
Fax: +49/234/32-14117  
Email: werner@biomed.ruhr-uni-bochum.de

Die zentrale Aufgabe der Regelungstechnik in der Kardiomedizin ist die Entwicklung von weitgehend autonomen technischen Systemen, die Teilfunktionen oder die Gesamtfunktion des Herzens übernehmen. Die Zielsetzung ist dabei heute meist über die reine Lebenserhaltung hinaus eine maximal mögliche Lebensqualität und damit eine Wiederherstellung der ursprünglichen Funktionsabläufe im Herz-/Kreislaufsystem. Das kann nur erreicht werden, wenn die technischen und physiologischen Teilsysteme optimal aufeinander abgestimmt sind und in ihrer Gesamtheit die physiologischen Regelkreise wieder schließen, eine interdisziplinäre Aufgabe, die meist nur in verzahnter Kooperation zwischen Ingenieuren, Physiologen und Kardiologen bearbeitet werden kann. Den Ausgangspunkt muß eine sorgfältige Analyse der Interaktionen und der Dynamik des kardiozirkulatorischen Systems unter physiologischen und pathophysiologischen Bedingungen bilden. Als Ersatzsysteme für die elektrischen und mechanischen Leistungen des Herzens stehen extrakorporale oder implantierbare technische Aktoren, vor allem elektrische Stimulatoren (Herzschrittmacher) und Pumpen (Assist-Systeme) zur Verfügung, oder – leider bei weitem nicht in ausreichendem Maße – Transplantate (Spenderherzen). Um eine dem Bedarf des Herz-/Kreislauf-Systems angepasste Funktion zu erhalten, müssen der kardiovaskuläre Status durch Sensoren erfasst und die Aktoren möglichst im geschlossenen Kreis zielgerichtet gesteuert werden. Hinsichtlich der "Elektrik" des Herzens sind bereits sehr leistungsfähige implantierbare selbsttätig steuernde und regelnde Konzepte und Systeme verfügbar bzw. in der Entwicklung ("frequenzadaptive" Herzschrittmacher, automatische Defibrillatoren). Hierzu zählen insbesondere auch die am Institut für Biomedizinische Technik der Ruhr-Universität entwickelten "dromotropen" und die mit faseroptischen Sensoren arbeitenden "inotropen" Stimulatoren. Der extrakorporale Herz-Lungen-Ersatz (Herz-Lungen-Maschine) wird zur Zeit noch durchweg durch den "Kardiotechniker" überwacht und manuell gesteuert. An der Automatisierung dieser Aufgabe wird an verschiedenen Stellen gearbeitet. Die mechanischen extra- oder intrakorporalen Assist-Systeme (bis hin zur Entwicklung des sog. Kunstherzens) verfügen zur Zeit kaum über selbsttätige Anpassungsfunktionen und beschränken sich damit auf Lebenserhaltung. Viele der hier noch zu lösenden Probleme liegen allerdings außerhalb der eigentlichen Regelungstechnik, wie z. B. Batteriekapazität, Miniaturisierung, Biokompatibilität der Materialien, Infektionsgefahr u. ä. Dadurch sind der weiteren Automatisierbarkeit zur Zeit Grenzen gesetzt.

## Literatur:

- [1] Werner, J.; Hexamer, M. (Hrsg.): AUTOMED 2001, Bochum, 68 – 76.
- [2] Werner, J.; Hexamer, M.; Meine, M.; Lemke, B.: Restoration of cardio-circulatory regulation by rate-adaptive pacemaker systems, IEEE Trans. Biomed. Eng. 46 (1999), 1057 – 1064.



# Projektive Virtuelle Realität: Der Brückenschlag



Abb. 1: Robotersteuerung mit Methoden der Projektiven VR

## zwischen Computergrafik und Automatisierungstechnik

E. Freund \*

\*Institut für Roboterforschung  
Universität Dortmund  
Otto-Hahn-Str. 8, 44359 Dortmund  
Tel.: +49/231/7554651  
Fax: +49/231/7554653  
Email: freund@irf.de

J. Rossmann \*\*

\*\*Institut für Roboterforschung  
Universität Dortmund  
Otto-Hahn-Str. 8, 44359 Dortmund  
Tel.: +49/231/7554656  
Fax: +49/231/7554653  
Email: rossmann@irf.de

**Schlüsselwörter:** Virtuelle Realität, Roboterregelung, Umweltmodellierung, Planung.

Die Symbiose von Computergrafik und modernen Steuerungs- und Planungsmethoden ist Grundlage der Entwicklungen Projektiver Virtueller Realität (PVR). Virtuelle Welten, deren hohes Maß an Realitätsnähe durch neue Modellierungstechniken für Interaktionen erreicht wird, die der Roboterforschung entlehnt sind, erlauben dem Anwender ein intuitives Arbeiten und die schnelle Orientierung in neuen Umgebungen und Applikationen. Die grundlegende Idee der Projektiven Virtuellen Realität ist, dass der Anwender in einem virtuellen Abbild einer Automatisierungsstrecke arbeitet und in der virtuellen Welt Handhabungen ausführt. Die Wirkungen seiner Aktionen werden automatisch erkannt und mit Hilfe eines Handlungsplanungssystems in wirkungsäquivalente Aktionen für das Roboter- oder Automatisierungssystem der realen Strecke umgesetzt. Die Roboter projizieren so die Handhabungen aus der virtuellen in die reale Welt. Der Vortrag wird die Hintergründe, Basisideen und den Einsatz von Projektiver Virtueller Realität für verschiedene Teleautomationsanwendungen im Welt-raumbereich und in der industriellen Automatisierung erläutern. Abb. 1 zeigt die beschriebene Idee in einer Bildkompositon in Anwendung auf die Steuerung von Robotern zur Inspektion und Reparatur eines Satelliten. Bei Verwendung der Methodik der Projektiven Virtuellen Realität muss der Bediener kein Robotik-Spezialist sein, um Aufgaben für den Roboter programmieren zu können, denn eine "intelligente" Komponente des VR-Systems zur Deduktion

einer Aufgabenbeschreibung erkennt die Benutzerintention und erzeugt mit Hilfe eines Handlungsplanungssystems automatisch ein Roboterprogramm - der Roboter wird für den Anwender zum intuitiv handhabbaren Werkzeug, das ohne aufwendige Schulungen oder Spezialkenntnisse genutzt werden kann.

Die Methodik der Projektiven Virtuellen Realität gewährleistet auf diese Weise, dass der Anwender sein spezifisches Know-How der Anwendung in intuitiver Art und Weise einbringen kann. Um den Anwender nicht durch Details der technischen Realisierung abzulenken, kapseln neue Steuerungs- und Planungsmethoden das spezifische Automatisierungs-Know-How im Steuerungssystem und stellen es über eine Schnittstelle mit hohem Abstraktionsniveau dem Anwender zur Verfügung. Die mit Projektiver Virtueller Realität realisierten virtuellen Welten setzen auf dieser abstrakten Schnittstelle auf und instanzieren steuerbare Objekte und Aufgabentypen in Form von Metaphern, deren Qualität entscheidend ist für die intuitive Bedienung eines Automatisierungssystems. Diese Vorgehensweise erlaubt die effiziente und modularisierte Trennung von aufgabenspezifischem Wissen des Anwenders und systemspezifischem Wissen, das in den Steuerungskomponenten gekapselt ist.

### **Literatur:**

- [1] Freund, E.; Roßmann, J.: Projective Virtual Reality: Bridging the Gap between Virtual Reality and Robotics, IEEE Transaction on Robotics and Automation; Special Section on Virtual Reality in Robotics and Automation; pp. 411-422, Vol 15, No. 3, June 1999.
- [2] Freund, E.; Roßmann, J.: Intuitive Teleautomation mit Methoden Projektiver Virtueller Realität, AT-Automatisierungstechnik, Ausgabe 7/01, Oldenbourg Verlag, Juni 2001..

# Dynamisch stabiles Gehen für eine autonome, zweibeinige Laufmaschine

Amos Albert

Institut für Regelungstechnik  
(Institutsleiter Prof. Dr.-Ing. W. Gerth)  
Universität Hannover  
Appelstraße 11, 30167 Hannover  
Tel.: +49/511/4518  
Fax: +49/511/4536  
Email: albert@irt.uni-hannover.de

**Schlüsselwörter:** Zweibeinige Laufmaschine, Bahnplanung, Dynamisch stabiles Gehen

Zur Untersuchung des zweibeinigen Gehens als mögliche Fortbewegungsart für zukünftige Serviceroboter im menschlichen Lebensraum entstand am Institut für Regelungstechnik die in Bild 1 abgebildete zweibeinige Laufmaschine BART-UH (**B**ipedal **A**utonomous **R**obot – **U**niversität **H**annover) [6]. Der realisierte Roboteraufbau lässt lediglich Bewegungen in der sagittalen Ebene zu (2D-Bewegung). Dies erschien in einem ersten Schritt jedoch ausreichend, um die wesentlichen Kernprobleme im Zusammenhang mit der Modellierung und Regelung [3], der Bahnplanung [2,5,7] und der intelligenten Navigation [4] zu untersuchen.

Beim Aufbau des Roboters fand die Forderung nach einer vollständig autonomen Arbeitsweise eine besondere Berücksichtigung. Hierzu bedarf es einerseits grundlegender Maßnahmen, wie der Unterbringung der Energieversorgung und der Rechnerplattform auf dem Roboter; andererseits aber im Hinblick auf die voranstehend genannten Kernprobleme auch der Implementierung eines adäquaten Softwarekonzeptes [1,8] und der Entwicklung von Sensorsystemen zur Wahrnehmung der Umgebungsbedingungen [4], um eigenständig auf Veränderungen reagieren zu können.

Im Gegensatz zu mehrbeinigen Robotern neigen Zweibeiner zur Instabilität. Neben der Entwicklung geeigneter Fortbewegungsmuster kommt daher insbesondere der Stabilisierung der Bewegung eine besondere Rolle zu. Der vorliegende Beitrag widmet sich der Realisierung des dynamisch stabilen Gehens auf einem ebenen Untergrund. Bei Menschen und humanoiden Robotern dienen vor allem die Arme und der Oberkörper der Stabilisierung. Ohne Oberkörper - wie im Falle des vorliegenden Roboters - sind die Gelenkwinkelverläufe der Beine sowohl für die Bewegung als auch für die Stabilität verantwortlich. Für die Bewegungsplanung derartiger Roboter ist aus der Literatur die Inverted Pendulum Mode (IPM) bekannt [10]. Die IPM vernachlässigt alle Massen mit Ausnahme einer konzentriert angenommenen Masse im Torso und berechnet eine geschlossen angebbare, analytische Lösung für die Bewegung der Torsomasse. Insbesondere die Vernachlässigung der Beinmassen stellt jedoch eine verhältnismäßig grobe Vereinfachung dar. Eine erweiterte Version der IPM ist in [9] finden. Zu der konzentrierten Masse

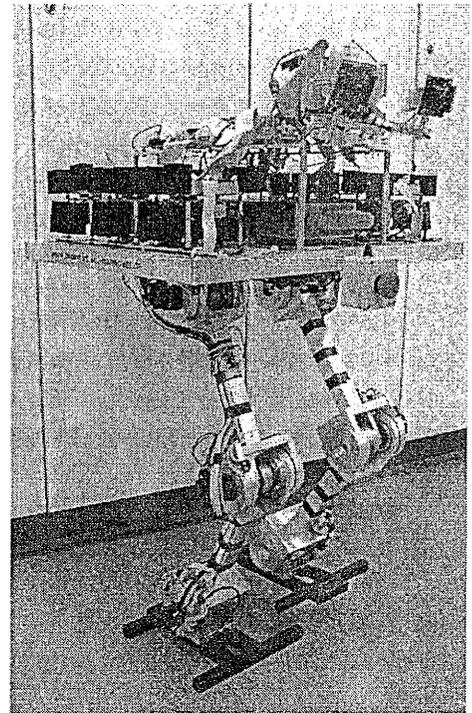


Bild 1: Zweibeiniger Roboter BART-UH

im Torso tritt eine weitere Masse zur Berücksichtigung des schwingenden Beines hinzu. Jedoch erfolgt nur die Betrachtung der statischen Rückwirkung des schwingenden Beines durch die Gravitation.

Um eine höhere Laufstabilität zu erzielen, erfolgt im Rahmen dieses Beitrages die sukzessive Erweiterung des Ersatzmodells und die vollständige Berücksichtigung der dynamischen Effekte des schwingenden Beines. Die bestimmten Bewegungen liegen ebenfalls in geschlossener mathematischer Form vor. Darüber hinaus erlauben die neuen Verfahren eine höhere Variabilität der Vorgaben bezüglich der Durchschnittsgeschwindigkeit und/oder Schrittweite. Die vorgestellten Verfahren lassen sich wie folgt klassifizieren:

- Bei dem Verfahren SPOIPM (Swing Phase Optimized IPM) beeinflusst der Roboter die Stabilität aktiv über die Fußbewegung des schwingenden Beines. Trotz der heuristischen Vorgehensweise zeigen die Ergebnisse eine signifikante Erhöhung der Laufstabilität.
- Dem Verfahren TMIPM (Two Masses IPM) liegt eine analytische Vorgehensweise zugrunde. Das Verfahren berücksichtigt die Dynamik des schwingenden Beines mit Hilfe einer konzentriert angenommenen Masse im Fuß. Nach Vorgabe einer geeigneten Fußbewegung des schwingenden Beines berechnet die Methode TMIPM eine im Sinne des Modells ideale Torsobewegung, die zur mathematisch größtmöglichen Stabilität führt.
- Das Verfahren MMIPM (Multiple Masses IPM) erweitert die Methode TMIPM auf den allgemeineren Mehrmassenfall, bei dem eine beliebige Anzahl Massen zur Modellierung des schwingenden Beines zur Anwendung kommt. Ein konstruktives Verfahren zur Berechnung der Lösung existiert auf Grund der gegenseitigen Abhängigkeiten der Massenbewegungen jedoch nicht mehr. Die Lösung ergibt sich über einen Iterationsprozess. Die ermittelte Torsotrajektorie liegt jedoch in geschlossener analytischer Form vor.

Simulationen und Messungen der realen Fußreaktionskräfte verifizieren die höhere Laufstabilität im Vergleich zu den Literaturansätzen. Eine Übertragung der Bahnplanung auf Roboter mit dreidimensionaler Bewegungsfreiheit erscheint möglich, da die Bewegungen in sagittaler und lateraler Ebene mit hinreichender Genauigkeit als entkoppelt anzusehen sind. Ein weiterführender Ansatz könnte auch darin liegen, die Methoden bei Roboteranwendungen im Weltraum einzusetzen. Hier wäre die gezielte Nutzung der in die Aufhängung eingeleiteten Kräfte/Momente zu Manövriertzwecken möglich.

## Literatur:

- [1] Wolter, B., Albert, A. und Gerth, W.: User-Expandable, On-The-Chip Real-Time Operating System for High Performance Embedded Mechatronic Systems. 1st IEEE International Conference on Information Technology in Mechatronics, ITM'01, Seiten 255-261, 2001.
- [2] Albert, A. und Gerth, W.: New Path Planning Algorithms for Higher Gait Stability of a Bipedal Robot. 4th International Conference on Climbing and Walking Robots, CLAWAR 2001, Seiten 521-528, 2001.
- [3] Albert, A. und Lilge, T.: Comparative Study of Three Non-Linear Discrete-Time Observer Designs for the Control of a Bipedal Robot. 4th Int. Conf. on Climbing and Walking Robots, CLAWAR 2001, S. 851-858, 2001.
- [4] Albert, A., Suppa, M. und Gerth, W.: Detection of Stair Dimensions for the Path Planning of a Bipedal Robot. IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics AIM'01, S. 1291-96, 2001.
- [5] Albert, A.: Climbing of Stairs of an Autonomous, Bipedal Robot. 1st IFAC International Conference on Mechatronics, Mechatronics2000, 2:647-652, 2000.
- [6] Albert, A., Hofschulte, J. und Schermeier, O.: Entwicklung des zweibeinigen, autonomen Laufroboters BART-UH. Robotik 2000, VDI Berichte 1552, Seiten 509-514, 2000.
- [7] Albert, A. und Hofschulte, J.: Trajektorienplanung für Bewegungen eines autonomen, zweibeinigen Roboters im menschlichen Lebensraum. Automatisierungstechnik at, 48(6):296-304, 2000.
- [8] Albert, A., Gerth, W., Hofschulte, J. und Schermeier, O.: Echtzeitsystem für einen zweibeinigen Roboter. in P. Hollecsek (Hrsg.) PEARL99, Workshop über Realzeitsysteme, Seiten 69-78, 1999.
- [9] Park, J.H. and K.D. Kim (1998). Biped Robot Walking Using Gravity-Compensated Inverted Pendulum Mode and Computed Torque Control. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation ICRA, Seiten 3528-3533.
- [10] Kajita, S. and K. Tani (1995). Experimental Study of Biped Dynamic Walking in the Linear Inverted Pendulum Mode. Int. Conf. on Robotics and Automation ICRA, Seiten 2885-2891.

# Stabilization of the Double Inverted Pendulum on a Cart based on Passivity and Lyapunov design

Wei Zhong and Helmut Röck\*

Chair for Automation and Control Engineering, Christian-Albrechts-University of Kiel,

Kaiserstr. 2, D-24143 Kiel, Germany

[wz@tf.uni-kiel.de](mailto:wz@tf.uni-kiel.de); \* Corresponding author : [hr@tf.uni-kiel.de](mailto:hr@tf.uni-kiel.de)

<http://www.tf.uni-kiel.de/etech/ART/>

The double inverted pendulum on a cart (DIP) is an extension of the single inverted pendulum (SIP), but it has two passive generalized coordinates, i.e. two underactuated degrees of freedom with only one actuated degree of freedom, making it a challenge for designing swingup controllers. Both SIP and DIP belong to the class of underactuated mechanical systems. For swinging up the pendulums, we accept the viewpoint of using a hybrid and switching strategy<sup>[1, 2]</sup> and concentrate on the design of a swingup and a balance controller separately. For the balance controller, the linear quadratic regulator (LQR) design or the pole placement technique can be used based on the linearized model around the desired equilibrium.

To design the swingup controller, we successfully apply the concepts of partial feedback linearization and passivity<sup>[3]</sup> to drive the DIP into a holonomic manifold, characterized by the total energy of the two pendulums. After entering the holonomic manifold, we switch to the balance controller when the pendulums reach more or less by chance the region of attraction of the desired equilibrium i.e. the upright position of both of the pendulums.

In order to make this process more definite, a Lyapunov design, based on a partial linearization of the DIP system is considered. Unlike fully actuated systems, which are always feedback linearizable, underactuated mechanical systems can only be linearized partially. Nevertheless the partial feedback linearization approach will transform the original system into a simpler structure consisting of a linear (usually a double integrator) and a nonlinear subsystem. Unlike to the original equations of the DIP system, the transformed system equations exhibit the nice property, that the new selected control input now acts on both of the subsystems. This enables the construction of a suitable Lyapunov function based on the state variables of the transformed nonlinear system. Calculating the time derivative of the Lyapunov function and using the passivity property of the DIP, a nonlinear swingup controller can be designed that directly drives the DIP into the region of attraction of the desired equilibrium.

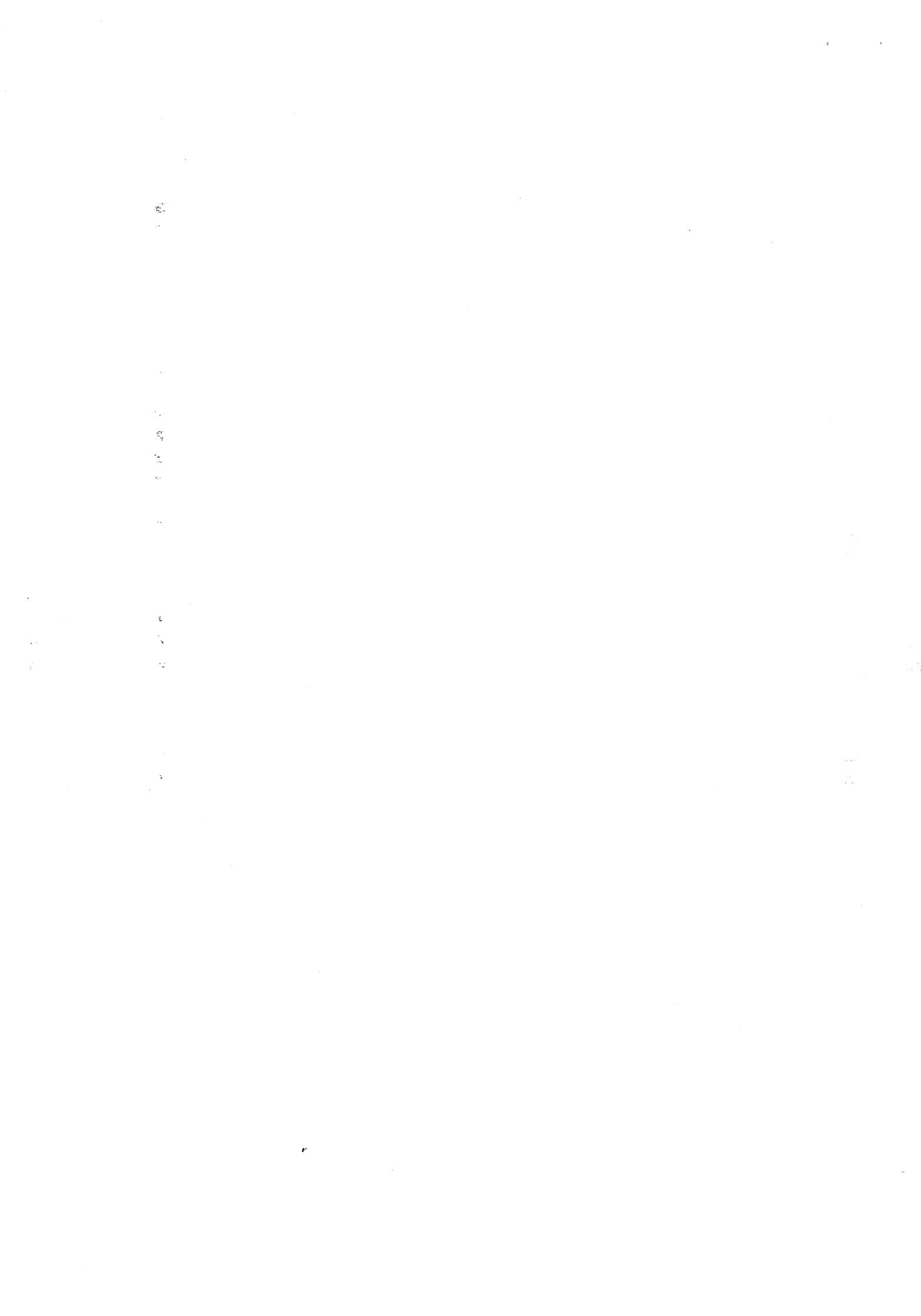
In order to test this approach, we carried out simulations by using MATLAB and SIMULINK. The simulation results show that the new approach outperforms the earlier one, based on passivity and energy shaping. As the system equations do not include internal damping, (usually damping will relax the conditions for stabilization) we believe, that our approach will account for the worst case.

## Reference:

[1] M. W. Spong, "Energy based control of a class of underactuated mechanical systems," *Proc. of 1996 IFAC World Congress*, San Francisco, CA, July 1996.

[2] M. W. Spong, L. Praly, "Control of underactuated mechanical systems using switching and saturation," *Proc. of the Block Island Workshop on Control Using Logic Based Switching*, Springer-Verlag, London, UK, 1996.

[3] W. Zhong and H. Röck, "Energy and passivity based control of the double inverted pendulum on a cart," *2001 IEEE Joint International Conference on Control Applications & International Symposium on Intelligent Control (2001 IEEE CCA/ISIC)*, Mexico City, Mexico, pp. 896-901, September 5-7, 2001.



# Trajektorienfolgeregelung elektromagnetisch gelagerter Spindeln

Johannes von Löwis

loewis@erss11.et.tu-dresden.de

Institut für Regelungs- und Steuerungstheorie

(Prof. Dr.-Ing. Dr.rer.nat. K. Reinschke)

Technische Universität Dresden

01062 Dresden

Tel.: +49/351/463 33940

Fax: +49/351/463 37281

**Schlüsselwörter:** Folgeregelung, Magnetlager, differentielle Flachheit, Diskretisierung

Bei magnetisch gelagerten Spindeln ist es möglich, den Rotor innerhalb des Luftspalts der Elektromagnete frei zu bewegen. Bei vielen Anwendungen genügt es, den Rotor in der Mittellage zu stabilisieren. Für ovale Bohrungen dagegen muß der Rotor in der „Werkzeugebene“ drehwinkelsynchron so ausgelenkt werden, daß die Werkzeugschneide die gewünschte elliptische Bahn beschreibt. Daraus ergibt sich eine Trajektorienfolgeregelungsaufgabe. Eine solche Spindel wurde mit der Axomat GmbH, Berggießhübel/Sa. entwickelt.

Der Entwurf eines geeigneten Trajektorienfolgereglers wird dadurch vereinfacht, daß ein Modell der magnetisch gelagerten Spindel verwendet werden kann, das *differentiell flach* ist [LLP96, FLMR95]. Daher können für die Lagekoordinaten des Starrkörpermodells Trajektorien  $t \mapsto y_{\text{ref}}(t)$  frei vorgegeben werden, und es ergibt sich eine einfache Möglichkeit zur Stabilisierung der Bewegung des Rotors entlang solcher Trajektorien. Man erhält einen *flachheitsbasierten Trajektorienfolgeregler*.

Flachheitsbasierte Trajektorienfolgeregelung oder -steuerung kann als Verallgemeinerung der in der Robotik wohlbekannten „Methode der berechneten Momente“ für mechanische Systeme mit ebensovielen Antrieben wie mechanischen Freiheitsgraden angesehen werden [RRZ97]. Wie alle modellbasierten Regelungsverfahren erfordert auch die flachheitsbasierte Regelung ein ausreichend gutes Modell der Regelstrecke. Modellungenauigkeiten wirken sich in gewissem Maße wie Störungen aus. Ihre Auswirkungen auf das Regelungsverhalten können daher mit Hilfe von Störgrößenbeobachtern teilweise kompensiert werden. Bei einer winkelsynchronen Bewegung entlang einer elliptischen Bahn darf man davon ausgehen, daß die Störkräfte einen großen harmonischen Anteil besitzen, dessen Frequenz mit der der Rotation der Welle übereinstimmt. Dieser Anteil kann mit Hilfe eines Beobachters geschätzt und schließlich im Regler kompensiert werden [vLRTU00].

Der Trajektorienfolgeregler wird für das zeitkontinuierliche System entworfen. Für eine Realisierung mittels Digitalrechner wird eine geeignete Zeitdiskretisierung der Regelung benötigt. Eine einfache Möglichkeit zur Zeitdiskretisierung des Reglers ist die, den Regler „quasi-kontinuierlich“ zu betrachten. Das bedeutet, die vom zeitkontinuierlichen Regler geforderten Stellgrößenverläufe, die aus dem Systemzustand und der Referenztrajektorie resultieren, werden immer zum Abtastzeitpunkt ausgewertet. Für die folgende Abtastperiode werden die Stellgrößen dann entsprechend dem so erhaltenen Wertetupel gewählt. Für genügend kleine Abtastzeiten kann auf diese Weise eine ausreichend genaue Approximation des Verhaltens des Systems mit zeitkontinuierlichem Regler erreicht werden.

Für flache Systeme kann ein Trajektorienfolgeregler mit (vorgebbarer) linearer Folgefehlerdynamik angegeben werden. Das heißt, im geschlossenen Regelkreis (mit zeitkonti-

nuierlichem Regler) genügen die Folgefehler  $e = y - y_{\text{ref}}$  linearen Differentialgleichungen. Die Lösung  $t \mapsto e(t)$  jeder dieser Fehlerdifferentialgleichungen kann bei bekannten Anfangsbedingungen explizit angegeben werden. Wegen der Flachheit des Systems ist es damit möglich, die Trajektorien aller anderen Systemgrößen für die folgende Abtastperiode vorauszuberechnen. Damit kann versucht werden, eine bessere Approximation des Verhaltens des zeitkontinuierlichen Reglers zu erzielen: In [vLRR01] wird gezeigt, daß dies möglich ist, indem zur Berechnung der (konstanten) Stellgrößen für das kommende Abtastintervall nicht die zeitkontinuierlichen Stellgrößenverläufe zu Beginn des Abtastintervalls ausgewertet werden (quasi-kontinuierlicher Regler), sondern ihr Mittelwert während der Abtastperiode verwendet wird. Dieser Mittelwert kann berechnet werden, da es möglich ist, aus den Fehlern zu Beginn des Abtastintervalls die Zeitverläufe aller Systemgrößen während des Abtastintervalls zu bestimmen.

## Literatur

- [FLMR95] FLIESS, M., J. LÉVINE, P. MARTIN und P. ROUCHON: *Flatness and Defect of Non-linear Systems: Introductory Theory and Examples*. Int. J. Control, 61(6):1327–1361, 1995.
- [LLP96] LÉVINE, J., J. LOTTIN und J.-CH. PONSART: *A Nonlinear Approach to the Control of Magnetic Bearings*. IEEE Trans. on Control Systems Technology, 4(5):524–544, 1996.
- [RRZ97] ROTHFUSS, R., J. RUDOLPH und M. ZEITZ: *Flachheit: Ein neuer Zugang zur Steuerung und Regelung nichtlinearer Systeme*. at — Automatisierungstechnik, 45(11):517–525, 1997.
- [vLRR01] LÖWIS, J. VON, J. RUDOLPH und K. REINSCHKE: *Diskretisierung kontinuierlicher Regelgesetze*. Technischer Bericht, SFB-358-D5 1/01, 2001.
- [vLRTU00] LÖWIS, J. VON, J. RUDOLPH, J. THIELE und F. URBAN: *Flatness-based Trajectory Tracking Control of a Rotating Shaft*. In: *Seventh International Symposium on Magnetic Bearings*, Seiten 299–304, Zurich, Switzerland, 2000.

# Entwurf zeitvarianter Filter für iterativ lernende Regelungen auf Basis der Wavelettransformation

Heiko Hengen\*

Madhukar Pandit\*\*

\* Lehrstuhl für Regelungstechnik und Signaltheorie  
Universität Kaiserslautern  
Erwin Schrödinger Straße, 67663 Kaiserslautern  
Tel.: ++49/631/205-2091  
Fax: ++49/631/205-4205  
Email: Hengen@eit.uni-kl.de

\*\* Lehrstuhl für Regelungstechnik und Signaltheorie  
Universität Kaiserslautern  
Erwin Schrödinger Straße, 67663 Kaiserslautern  
Tel.: ++49/631/205-2091  
Fax: ++49/631/205-4205  
Email: Pandit@eit.uni-kl.de

**Schlüsselwörter:** Iterativ lernende Regelung, zeitvariante Filterung, Wavelettransformation

Iterativ lernende Regelungen (ILR) sind Regelungsverfahren, die sich insbesondere für die Beherrschung zyklischer Prozesse eignen. Die iterativ lernende Regelung berechnet ausgehend von der Regelfehlertrajektorie  $e_k = y_d - y_k$  im  $k$ -ten Zyklus eine neue Systemstelltrajektorie  $u_{k+1}$  im  $(k+1)$ -ten Zyklus. Die Auswertung der Regelfehlertrajektorie liefert dabei die Information über notwendige Verbesserungen der Systemstelltrajektorie. Ist diese Information durch Meßfehler gestört, dann kann die iterativ lernende Regelung nur noch bis zu einem durch die Störung bestimmten Restfehler konvergieren.

Ein erster Ansatz zur Entfernung von Störungen aus dem Meßsignal ist die Einführung eines Tiefpaßfilters. Da iterativ lernende Regelungen jedoch prinzipbedingt Hochpaßcharakter haben müssen, verschlechtert ein einfacher Tiefpaßfilter die Konvergenzeigenschaften der iterativ lernenden Regelung deutlich. Es gilt (mit  $e_k$  der Regelfehlertrajektorie als Differenz aus Solltrajektorie  $y_d$  und Istrajektorie  $y_k$  sowie  $n_k$  der Störtrajektorie im  $k$ -ten Zyklus.  $G$  ist der Systemoperator,  $\Theta$  die Filtermatrix,  $\Gamma$  der Lernoperator):

$$\|e_{k+1}\| \leq \|I - \Theta G \Gamma\| \cdot \|e_k\| + \|\Theta \cdot (n_k - n_{k+1})\| \quad (1)$$

Im ungefilterten Fall ist die Filtermatrix  $\Theta = I$  gleich der Einheitsmatrix zu setzen.

Viele zu beobachtende Störphänomene (Meßstörungen) sind zeitlich eingrenzbar, und finden zu annähernd reproduzierbaren Zeitpunkten im ILR-Zyklus, d.h. während der Signalaufnahme statt (z.B. Störungen in der Nähe von Skalenendwerten von Pyrometern). Diese

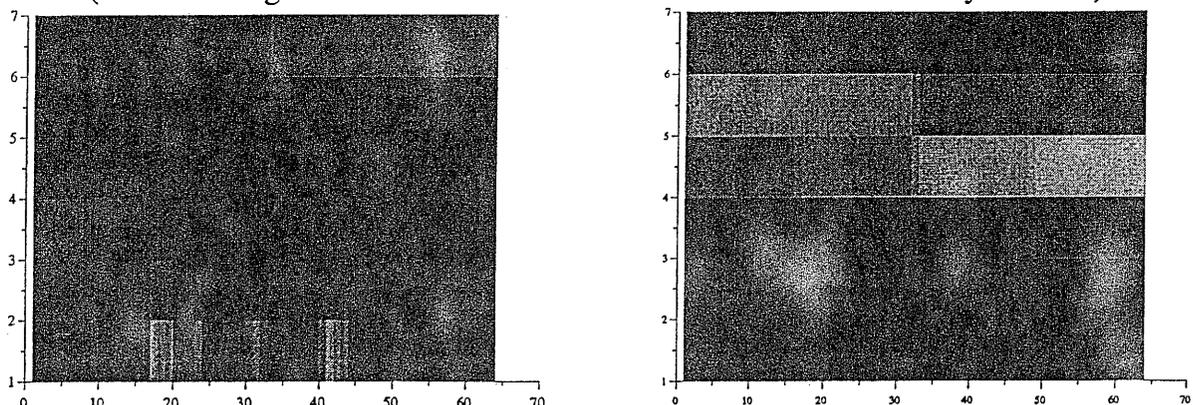


Abbildung 1: Links: die Skalenraumdarstellung des Störsignals, rechts die Darstellung des Skalenraumes des Nutzsignals

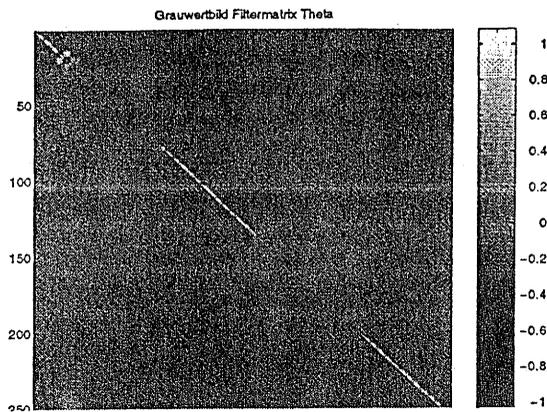


Abbildung 2: Zeitvariante Filtermatrix  $\Theta$  in Grauwertdarstellung

Filterung ist es möglich, gleichzeitig lokale Störphänomene zu beseitigen sowie ein möglichst großes Maß an Nutzsinalinformation zu erhalten. Die Konvergenzeigenschaften der iterativ lernenden Regelung werden durch eine zeitvariante Filterung weniger beeinflusst als durch eine herkömmliche zeitinvariante Filterung, dies ist an der in Abbildung 2 dargestellten Filtermatrix deutlich zu erkennen – nur an den tatsächlich gestörten Stellen im Signalverlauf wird eine Filterung durchgeführt, an den ungestörten Stellen des Signals hat die Filtermatrix die Struktur einer Einheitsmatrix. Die Auswirkung der Filterung auf die erzielbare Fehler-2-Norm ist in Abbildung 3 dargestellt. Die Algorithmen wurden an ihre Praxistauglichkeit hin untersucht.

Mehrinformation läßt sich ausnutzen für die Ermittlung einer zeitvarianten Filterstufe, die nur zu den Zeitpunkten eine Filterwirkung aufweist, an denen eine Filterung wirklich notwendig ist. Eine derartige Filterstufe kann auf Basis einer Wavelettransformation des gestörten Signales und der Transformaten des zu erwartenden Nutzsignales oder auf Basis der Transformaten Solltrajektorie des ILR ausgelegt werden.

Mittels der vorgeschriebenen zeitvarianten

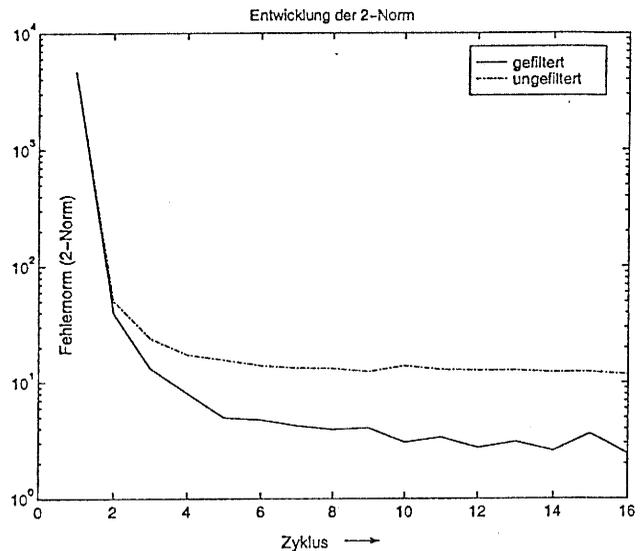


Abbildung 3: Verläufe der Fehler-2-Norm an einer realen Strecke (verfahrenstechnische Versuchsanlage)

einer verfahrenstechnischen Versuchsanlage auf ihre Praxistauglichkeit hin untersucht.

## Literatur:

- [1] Donoho, David L.: De-Noising by Soft-Thresholding, Transactions on Information-Theory, Vol.41, 1995, No. 3, 613ff
- [2] Hengen, Heiko; Hillenbrand, Stefan; Pandit, Madhukar: Algorithms for Iterative Learning Control of nonlinear Plants using time variant System Descriptions, Proceedings of the 2000 IEEE CCA/CACSD Joint Conference, IEEE, Anchorage, Sep. 2000

# H<sub>∞</sub>-Regelung eines Kristallisationsprozesses

U. Vollmer <sup>a</sup>

J. Raisch <sup>a,b</sup>

<sup>a</sup> Fachgruppe System- und Regelungstheorie  
Max-Planck-Institut für Dynamik komplexer  
technischer Systeme  
Sandtorstraße 1, 39106 Magdeburg  
Tel.: +49/391/6110 379  
Fax: +49/391/6110 152  
Email: vollmer@mpi-magdeburg.mpg.de

<sup>b</sup> Lehrstuhl für Systemtheorie technischer Prozesse  
Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg  
Universitätsplatz 2, 39106 Magdeburg  
Tel.: +49/ 391/67 18708  
Fax: +49/ 391/67 11191  
Email: Joerg.Raisch@mpi-magdeburg.mpg..de

**Schlüsselwörter:** H<sub>∞</sub>-Regelung, Kristallisation, Populationsbilanz, Systeme mit verteilten Parametern

Kristallisationsprozesse werden in der chemischen und pharmazeutischen Industrie eingesetzt, um Feststoffe aus Flüssigkeiten zu gewinnen. Die Produktqualität wird dabei wesentlich von der Größenverteilung des Kristallisats bestimmt. Um die *Kristallgrößenverteilung* günstig zu beeinflussen, wird häufig *Feinkornauflösung* eingesetzt, d.h. kleine Kristalle werden aus dem Kristallisator abgezogen und aufgelöst [1].

Ein bekanntes Problem beim kontinuierlichen Betrieb industrieller Kristallisationsprozesse ist das Auftreten von schwach gedämpften oder sogar ungedämpften *Oszillationen*. Sowohl die Konzentration in der flüssigen Phase als auch die Kristallgrößenverteilung ändern sich dann periodisch. Insbesondere beim Einsatz von Feinkornauflösung neigen Kristallisationsprozesse zu Schwingungen. Für die Verbesserung der Produkteigenschaften durch Feinkornauflösung wird folglich mit einer Verschlechterung der dynamischen Eigenschaften des Prozesses bezahlt.

Dieses Dilemma kann durch Regelung behoben werden [2]. Eine stabilisierende Regelung des Systems ermöglicht den Einsatz hoher Feinkornauflosungsraten, und damit die Verbesserung der erzielbaren Produkteigenschaften bei gleichzeitig „gutem“ dynamischem Verhalten des Prozesses.

Die mathematische Modellierung von Kristallisationsprozessen stützt sich üblicherweise auf das Konzept der Populationsbilanzen [1], [3]. Modelle, die auf dieser Basis gewonnen werden, beschreiben die zeitliche Entwicklung der Kristallgrößenverteilung. Es handelt sich folglich um Systeme mit verteilten Parametern, bzw. unendlich-dimensionale Systeme.

Dieser Beitrag beschäftigt sich mit dem Reglerentwurf auf Basis eines Populationsbilanzmodells. Es wird ein aus der Literatur bekanntes H<sub>∞</sub>-Verfahren für unendlich-dimensionale Systeme verwendet [4]. Der Regler wird direkt für das - linearisierte - verteilte Modell entworfen. Dazu wird zunächst eine Übertragungsfunktion von der Stell- zur Regelgröße hergeleitet. Diese Übertragungsfunktion enthält transzendente Terme und spiegelt so die unendlich-dimensionale Natur des Problems wider. Die Berechnung des Reglers wird im Frequenzbereich vorgenommen. Die so gewonnene Übertragungsfunktion des Reglers enthält dann ebenfalls transzendente Terme. Für die Implementierung des Reglers werden diese Terme schließlich durch gebrochen-rationale Funktionen approximiert.

In Simulationen wird demonstriert, dass der betrachtete nichtlineare Prozess mit den entworfenen Reglern tatsächlich bei hohen Feinkornauflosungsraten stabil betrieben werden kann und sich so bessere Produktqualitäten erreichen lassen.

## Literatur:

[1] Randolph, A.; Larson, M.: Theory of Particulate Processes, Academic Press, Inc., (1988)

- [2] Rawlings, J.B.; Miller, S.M.; Witkowski, W.: Model Identification and Control of Solution Crystallization Processes: A Review, in *Ind. Eng. Chem. Res.*, (1993), 32, 1275-1296
- [3] Gerstlauer, A.; Mitrovic, A.; Motz, S.; Gilles, E.D.: A population model for crystallization processes using two independent particle properties, in *Chem. Eng. Sci.* (2001), 56 (7), 2553-2565
- [4] Foias, C.; Özbay, H.; Tannenbaum, A.: *Robust Control of Infinite Dimensional Systems*, Springer, (1996)
- [5] Vollmer, U; Raisch, J:  $H_\infty$ -Control of a Continuous Crystallizer, in *Contr. Eng. Pract.* (2001), 9 (8), 837-845

# Beschreibung und Analyse deterministischer Automaten über endlichen Körpern

Johann Reger

Lehrstuhl für Regelungstechnik  
Universität Erlangen-Nürnberg  
Cauerstraße 7, 91058 Erlangen  
Tel.: +49/9131/8527134  
Fax: +49/9131/8528715

Email: [j.reger@rzmail.uni-erlangen.de](mailto:j.reger@rzmail.uni-erlangen.de)

**Schlüsselwörter:** Ereignisdiskrete Systeme, Automatentheorie, Algebraische Modellierung

Für die Unterklasse der deterministischen Automaten bestehen neben graphischen Beschreibungsformen wie z.B. den Petri-Netzen [1] oder Automatengraphen [4] auch Möglichkeiten zur algebraischen Modellierung in Zustandsraumdarstellungen. Zwei dieser Verfahren traten in letzter Zeit besonders in den Vordergrund: die Beschreibung von deterministischen Automaten unter Verwendung arithmetischer Polynome [2] und die lineare Modellierung von Automaten mit Hilfe von Walsh-Funktionen [7]. Auf Grund des als sequentiell angenommenen Charakters von Zustandsübergängen ist man bei beiden Verfahren bemüht, das Automatenverhalten mit dem hinlänglich untersuchten Verhalten zeitdiskreter Systeme zu vergleichen, um daraus für ersteres Rückschlüsse ziehen zu können. Will man beispielsweise die zyklischen Zustände eines Automaten untersuchen, so wird in diesen Verfahren dem Eigenwertbegriff eine zentrale Bedeutung beigemessen. Jedoch stellt sich bei näherer Betrachtung heraus, daß ein hinreichendes Kriterium zur Bestimmung von Länge und Anzahl zyklischer Strukturen in Automaten ohne äußeren Eingriff, sogenannten autonomen Automaten, fehlt; dies sogar im linearen Fall. Ein weiteres Problem stellt die Komplexität des Konstruktionsprozesses der zu einem Zyklus gehörenden Zustandsvektoren, also die Berechnung binärer Lösungen aus zunächst nur ganzzahligen Lösungen dar. Die Lösung dieser Problemstellung zugeordneten diophantischen Ungleichungssysteme zählt zur Klasse der NP-Probleme und verschärft das Problem des mit der Anzahl der Zustandsgrößen einhergehenden exponentiellen Wachstums des Zustandsraums noch zusätzlich.

Das hier vorgeschlagene Modell einer algebraischen Systembeschreibung beläßt alle algebraischen Operationen im Galois-Körper  $GF(2)$ , einem Zahlenkörper mit gerade 2 Elementen. In der hier auf  $GF(2)$  erklärten (Booleschen) Algebra sind die Operationen Addition und Multiplikation modulo 2 zu verstehen [5]. Im Rahmen dieser Systembeschreibung gelingt zunächst für den affin-linearen, autonomen Automaten die Herleitung eines hinreichenden Kriteriums zur Bestimmung aller Zyklen des Automaten nach Länge und Anzahl [3]. Die im linearen Fall gewonnenen Aussagen lassen sich aber auf den allgemeinen Fall autonomer, multilinearer Systeme erweitern, indem multilineare Ausdrücke als neue Zustandsgrößen eingeführt werden [6]. Dies entspricht einer Einbettung in einen linearen Zustandsraum höherer Dimension. Sollen die Zustandsvektoren bestimmt werden, welche zu gewissen Zyklen gehören, so kann dies folglich über die Lösung eines linearen Gleichungssystems über  $GF(2)$ , hier in polynomialer Komplexität geschehen, da durch den Verbleib der Operationen im binären Zahlenkörper binäre Vektoren verfahrensbedingt automatisch abfallen. Dies stellt einen weiteren Vorteil dieser Systemdarstellung dar und untermauert seine Konsistenz. Abschließend werden Wege zur Erweiterung des Modells auf den nicht-deterministischen Fall aufgezeigt, die Einbeziehung von Steuergrößen diskutiert und ein Verfahren zur direkten Zyklenberechnung, also ohne Ordnungserhöhung, angegeben.

## Literatur:

- [1] Abel, D.: Modellbildung und Analyse ereignisorientierter Systeme mit Petri-Netzen, VDI-Verlag, (1987), Düsseldorf.
- [2] Franke, D.: Sequentielle Systeme – Binäre und Fuzzy Automatisierung mit arithmetischen Polynomen, Vieweg, (1998), Braunschweig.
- [3] Gill, A.: Graphs of Affine Transformations, with Applications to Sequential Circuits, Proceedings of the 7th IEEE International Symposium on Switching and Automata Theory, (1966), Berkeley.
- [4] Hopcroft, J. E.; Ullman, J. D.: Introduction to Automata Theory, Languages, and Computation, Addison-Wesley, (1979), Reading.
- [5] Lidl, R.; Niederreiter H.: Introduction to Finite Fields and their Applications, Cambridge University Press, (1994), New York.
- [6] Reger, J.: Deadlock Analysis for Deterministic Finite State Automata using Affine Linear Models, Proceedings of the 2001 European Control Conference, Porto.
- [7] Sonnenberg, J.: Verfahren zur linearen Modellierung dynamischer ereignisdiskreter Systeme mittels Walsh-Funktionen, VDI-Verlag, (2000), Düsseldorf.

# Integration ereignis-diskreter Modelle in Modelica zur Simulation diskret/kontinuierlicher Systeme

Manuel A. Pereira Remelhe, Sebastian Engell

Lehrstuhl für Anlagensteuerungstechnik  
Universität Dortmund, 44221 Dortmund  
Tel.: +49/231/755-5127, Fax: +49/231/755-5129  
Email: {m.remelhe, s.engell}@ct.uni-dortmund.de

**Schlüsselwörter:** hybride Systeme, objektorientierte Modellierung, Modelica, Statecharts, Simulation, Visualisierung

Bei der Entwicklung komplexer dynamischer Systeme werden zunehmend Simulationsmodelle eingesetzt, um in den verschiedenen Entwurfsphasen das Systemverhalten zu analysieren. Dem Informationsgewinn durch die Simulation steht aber in der Regel ein hoher Modellierungsaufwand entgegen. Möchte man daher die Modellierungseffizienz deutlich verbessern, bietet sich die Verwendung heterogener Modelle mit domänenspezifischen Beschreibungssprachen an. Aus dieser Motivation heraus wurde eine prototypische Modellierungsumgebung erstellt, die verschiedene Formalismen sowohl für physikalische als auch für diskrete Teilsysteme bereitstellt und integriert und die zudem um weitere Beschreibungssprachen erweiterbar ist [1]. Für die Modellierung rein diskreter Systemteile, wie z. B. Ablaufsteuerungen, Koordinationssteuerungen usw., wurden – unter Benutzung eines Meta-Modellierungswerkzeugs – Editoren für Statecharts, Sequential Function Charts (SFC) und einem hierarchischen Blockgraph-Formalismus erstellt sowie jeweils eine Übersetzung in die objektorientierte Modellierungssprache Modelica implementiert [2]. Die physikalischen Systemteile können dann in einem Modelica-Editor mit Hilfe von Bauteilbibliotheken modelliert und mit den diskreten Modelica-Komponenten verknüpft werden. Für die anschauliche Visualisierung der diskreten Prozesse werden die ursprünglichen grafischen Modelle genutzt.

Allen objektorientierten Beschreibungssprachen ist gemein, dass die physikalischen Objekte durch algebraische und differentielle Gleichungen beschrieben werden. Diese werden nicht als Berechnungsformeln, sondern als Zwangsbedingungen der Trajektorien aufgefasst und können daher auch implizit formuliert sein. Außerdem kann das Modell eines physikalischen Objekts eine Verschaltung anderer Modellbausteine enthalten, was eine hierarchische Modellierung zu ermöglicht. Da eine Verbindung lediglich zusätzliche Zwangsbedingungen einführt, ist die Kausalität, d.h. die Wirkungsrichtung der einzelnen Schnittstellengrößen, nicht a priori festgelegt. Das Verhalten eines Gesamtmodells ist durch die Gesamtheit der Gleichungen, die Bausteine und Verbindungen beschreiben, definiert. Während der Simulation müssen dann alle Gleichungen simultan erfüllt werden. Mit Hilfe dieses deklarativen Modellierungsparadigmas können Komponenten-Bibliotheken erstellt werden, deren Bausteine analog zur Struktur des physikalischen Systems und unabhängig von der konkreten Kausalität miteinander verschaltet werden können. Modelica [3] erlaubt darüber hinaus eine grafische Modellkomposition, so dass domänenspezifische Beschreibungssprachen mit relativ wenig Aufwand nachgebildet werden können, wenn sie sich aus grafischen Symbolen und Verbindungslinien zusammensetzen, wie das z. B. bei elektrischen Schaltplänen der Fall ist. Bei strukturvariablen Modelica-Modellen können Zustandsereignisse, wie z. B. das Überschreiten eines Schwellwerts, eine Änderung der Gleichungsstruktur auslösen. Eine solche Strukturumschal-

tung zieht die Neuberechnung aller Variablen unter Berücksichtigung der aktuellen Gleichungen nach sich, ohne dass die Zeit fortschreitet. Hierbei kann aufgrund neuer Zustandsereignisse eine weitere Umschaltung erforderlich werden, so dass Kaskaden von Strukturumschaltungen mit entsprechend vielen unmittelbar aufeinanderfolgenden diskontinuierlichen Zustandsänderungen in einem Zeitpunkt auftreten können. Dies entspricht einer globalen Ereignisiteration, da hier stets alle Variablen simultan berechnet werden.

Für die Darstellung ereignisdiskreter Teilsysteme sind aber lokale Ereignisiterationen notwendig. Bei der gewählten Statechart-Variante setzt sich z. B. ein Zustandsübergang u. U. aus mehreren aufeinanderfolgenden Teilübergängen zusammen. Erst wenn keine inneren Teilübergänge mehr stattfinden, ist ein konsistenter Zustand erreicht, der auf die Außenwelt einwirken darf. Diese inneren Teilübergänge dürfen somit nicht synchron zur globalen Ereignisiteration verlaufen, da sonst auch inkonsistente Zwischenzustände Einfluss auf die Umgebung haben können. Bei hierarchisch strukturierten ereignisdiskreten Komponenten mit nebenläufigen asynchronen Subkomponenten tritt sogar der Fall auf, dass die Ereignisse der beiden Subkomponenten nur noch partiell in eine Reihenfolge gebracht werden können.

Die Modelica-Komponenten, die aus den diskreten Modellen automatisch erzeugt werden, enthalten neben den Schnittstellen im Wesentlichen eine Datenstruktur, die sämtliche Variablen der diskreten Komponente vor und nach einem Zustandsübergang darstellen inklusive der Ein- und Ausgänge, sowie einen Modelica-Algorithmus, der die Abbildung des Vorzustandes in den Nachzustand realisiert. Sämtliche dabei durchgeführten Berechnungen bleiben dem Restsystem genauso verborgen wie die z. B. die numerische Berechnung einer Sinusfunktion. Ein solcher Algorithmus wird analog zu den Gleichungen als Zwangsbedingung aufgefasst, die simultan zu allen anderen Modellgleichungen erfüllt werden muss. Folglich spaltet eine innere Ereignisiteration, die durch eine Schleife realisiert wird, ein globales Ereignis in lokale Sub-Ereignisse auf, die nach außen hin nicht sichtbar sind. Da eine diskrete Komponente in der Regel aus mehreren Teilmodellen hierarchisch zusammengesetzt ist und verschiedene diskrete Formalismen benutzt werden können, werden aus allen Teilmodellen jeweils drei Modelica-Funktionen erzeugt. Eine Funktion sorgt dafür, dass die aktuellen Werte der Eingangsvariablen ihrer Komponente in die Eingangsvariablen eventueller Subkomponenten propagiert werden, und ruft die propagierenden Funktionen ihrer Subkomponenten auf. Eine zweite Funktion bestimmt, ob ein Zustandsübergang stattfindet, wobei auch die entsprechenden Trigger-Funktionen der Subkomponenten aufgerufen werden. Die dritte Funktion führt schließlich die Zustandsübergänge ebenfalls in einer hierarchischen Weise durch, wobei die Trigger-Funktionen bei Ereignisiterationen wieder zum Einsatz kommen.

Um die hierarchisch verschachtelten und teilweise asynchronen Ereignisiterationen später visualisieren zu können, werden die lokalen Zustandsübergänge direkt von den Übergangsfunktionen in eine gemeinsame Protokolldatei geschrieben. Diese Datei spiegelt die Historie in einer hierarchischen Form wieder und erlaubt eine geeignete Visualisierung z. B. durch eine farbliche Animation anhand der ursprünglichen grafischen Modelle sowie eine gezielte Navigation durch die Abläufe.

- [1] M. Otter, M. A. Pereira Remelhe, S. Engell, P. Mosterman, "Hybrid Models of Physical Systems and Discrete Controllers," at - *Automatisierungstechnik*, vol. 48, no. 09, pp. 426-437, 2000.
- [2] M. A. Pereira Remelhe: Simulation and Visualization Support for User-defined Formalisms Using Meta-Modeling and Hierarchical Formalism Transformation. *Proceedings of the 2001 IEEE International Conference on Control Applications*, México City, 2001.
- [3] Modelica. Homepage, <http://www.Modelica.org/>.

# Toolgestützte Validierungsmethodik komplexer hybrider technischer Systeme

Dipl.-Ing. Murat Ünlü \*

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

\* Lehrstuhl für Regelungssysteme und  
Steuerungstechnik  
Ruhr-Universität Bochum  
Semperstr. 115, 44801 Bochum  
Tel.: +49(0)234/32-26353  
Fax: +49(0)234/32-14155  
Email: uenlue@rus.ruhr-uni-bochum.de

\*\* Lehrstuhl für Regelungssysteme und  
Steuerungstechnik  
Ruhr-Universität Bochum  
Heinbergweg 20, 58445 Witten  
Tel.: +49(0)234/32-24060  
Fax: +49(0)234/32-14155  
Email: reinig@rus.ruhr-uni-bochum.de

**Schlüsselwörter:** Automatisierte toolgestützte Validierung, verteilte eingebettete Systeme, hybride Systeme, Testen mit Hardware-in-the-loop

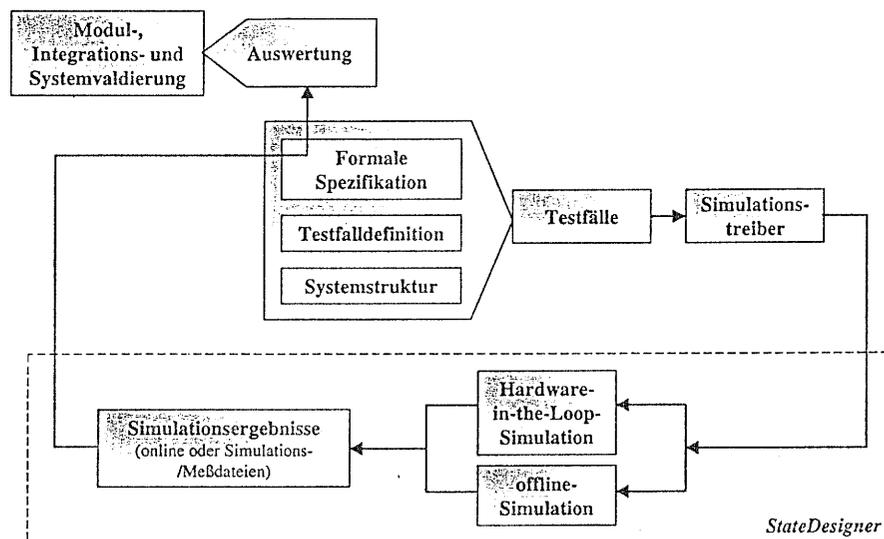
Eingebettete Systeme haben in den letzten Jahren stark an Bedeutung gewonnen. Sie finden z.B. im Kraftfahrzeug- und Flugzeugbau immer stärkere Verbreitung. Charakteristisch für diese Anwendungsbereiche ist, dass zumeist mehrere verteilte Steuergeräte verschiedene Steuerungsaufgaben erfüllen. Zum Teil sind die einzelnen Steuergeräte über Kommunikationsbusse miteinander vernetzt. Allein im Wassersystem der neueren Airbus Varianten A340-500/600 sind es ca. 50 Microcontroller, die verschiedene Aufgaben erfüllen. Für den gesamten Entwicklungsprozeß solcher Systeme ergeben sich hohe Anforderungen an eine durchgängige Strategie von der Aufgabenstellung bis zur Abnahme.

Gegenstand einer Dissertation am hiesigen Lehrstuhl war die Ausarbeitung und Realisierung einer Systementwicklungsstrategie, die den Entwicklungsprozeß komplexer Steuerungssysteme vom Entwurf bis zur Verifikation durchgängig unterstützt [1]. Mit Hinblick auf eine bestimmte Klasse von Steuerungssystemen aus dem Bereich moderner Passagierflugzeuge erfolgte die Implementierung dieser Strategie in Form eines Softwarewerkzeugs, welches auf einer speziell hierfür entworfenen zustandsorientierten Beschreibungssprache basiert, mit der sich umfangreiche hybride Systeme modellieren lassen.

Unsere aktuellen Arbeiten beschäftigen sich mit dem Themengebiet, die Zuverlässigkeit, insbesondere die Korrektheit und Fehlertoleranz der Steuerungen (einschließlich intelligenter Sensorik/Aktorik, Kommunikation etc.), dieser Art von Systemen im Sinne der gegebenen Anforderungsspezifikation zu überprüfen. Derzeit vorhandene Zuverlässigkeitsstrategien technischer Systeme lassen sich in zwei Gruppen einordnen [2]. Zum einen wird der Versuch unternommen, Fehler und Ausfälle zu vermeiden und zum anderen wird versucht, die Auswirkungen von Fehlern und Ausfällen gering zu halten, z.B. durch Redundanzmaßnahmen. Der erst genannte Punkt läßt sich noch einmal unterteilen in die Fehlerabwehrstrategie, bei der das Verhindern des Auftretens von Fehlern das Ziel ist, während bei der Fehleroffenbarungsstrategie der Versuch unternommen wird, alle Fehler vor der Inbetriebnahme durch geeignete Testverfahren aufzudecken. Analog zur Fehlerabwehrstrategie bzw. -offenbarungsstrategie können die Verfahren zum Nachweis der Korrektheit klassifiziert werden. Im Rahmen unserer Arbeiten verwenden wir Methoden zur Zuverlässigkeitsüberprüfung mittels Fehleroffenbarungsstrategie.

Unsere aktuellen Arbeiten haben zum Ziel, methodische und softwaretechnische Beiträge zur Spezifizierung und Validierung komplexer hybrider (kontinuierlich-diskreter) Systeme zu leisten, wobei eine engere automatisiertere Kopplung der verschiedenen Spezifikations- und Validierungsphasen erreicht werden soll. Eine wesentliche Anforderung an diese Methoden ist die Anwendbarkeit sowohl für Simulationsmodelle als auch für Hardware-in-the-Loop-Simulationen. Dies wird gewährleistet, da in der o.g. Systementwicklungsmethode die Simulationsmodelle aus den frühen Entwurfphasen über die Codegenerierung bis hin zur

Validierung verwendet werden können. Um das reale (bzw. prototypische) System mit Steuergeräten, intelligenter Sensorik/Aktorik und der Strecke testen zu können, müssen neue Methoden gefunden werden. In verschiedenen Bereichen der formalen Verifikation ist die Theorie bereits sehr fortgeschritten. Die Aussagen dieser Art der Verifikation hängen aber entscheidend von der Genauigkeit und Korrektheit der mathematischen Modelle und der formalen Spezifikation ab. Diese kann insbesondere für komplexe Systeme nicht garantiert werden. Außerdem stoßen diese Ansätze noch immer bereits bei mittelgroßen Systemen an praktische Anwendbarkeitsgrenzen („kombinatorische Explosion“) [3]. Daher nehmen wir eine gesamtheitliche Betrachtungsweise vor, bei der die Validierung des *realen* (prototypischen) Systems im Vordergrund steht.



Im wesentlichen wurden geeignete Black-Box-Methoden [4], soweit vorhanden, verwendet ggf. angepasst oder neu entwickelt. Eine formale Spezifikation, die aus Systemanforderungen und -vorgaben gewonnen wird, dient als Grundlage für die automatisierte Auswertung. Sie wird z.T. auch für die Generierung bzw. Auswahl von Testfällen verwendet, welche sowohl mit Simulationsmodellen, aber auch mit Hardware-in-the-loop ausgeführt werden können. Teststimuli können auch aus Vorgaben von Systemexperten generiert werden. Zukünftig sollen diese Methoden um White-Box-Ansätze erweitert werden, wo z.B. aus weiteren Systeminformationen eine noch gezieltere Auswahl und Generierung von Teststimuli vorgenommen werden kann.

Die Anwendung der entwickelten Methoden wird am Beispiel des Wassersystems der A340-500/600 vorgestellt.

## Literatur:

- [1] Rempe, M., Entwicklung und Verifikation von Steuerungssystemen auf der Basis hierarchischer Zustandsmodelle, Dissertation am Lehrstuhl für Regelungssysteme und Steuerungstechnik der Ruhr-Universität Bochum, 1999
- [2] Lauber, R.: Zuverlässigkeit und Sicherheit in der Prozessautomatisierung, Informatik-Fachberichte Bd. 39 S. 52-64, Springer, 1981
- [3] Abel, D. (Hrsg.), Theorie ereignisdiskreter Systeme, Tutorium des GMA-Fachausschusses 1.8 „Methoden der Steuerungstechnik“, Oldenbourg Verlag, 1998
- [4] Beizer, B., Black-Box Testing - Techniques for Functional Testing of Software and Systems, John Wiley & Sons, 1995

# Zwei Suchverfahren für das Optimierungsproblem bei der Strukturvereinfachung nichtlinearer Systeme

Maik Buttelmann

Institut für Automatisierungstechnik, Universität Bremen  
Fachgebiet Systemdynamik und Regelungstechnik (Prof. Dr. B. Lohmann)  
Kufsteiner Straße NW1, D – 28359 Bremen  
Tel.: +49 (0) 421 218-3906, Fax: +49 (0) 421 218-4707  
E-Mail: buttelmann@iat.uni-bremen.de

**Schlüsselwörter:** Ordnungsreduzierung, Strukturvereinfachung, Optimierungsproblem

Es besteht oftmals die Notwendigkeit, bei Systemen mit hoher Ordnung diese zu reduzieren. Ein Verfahren für die Ordnungsreduktion nichtlinearer Systeme wurde von B. Lohmann [1] vorgeschlagen. Dieses Verfahren berechnet, ausgehend von einer allgemeinen nichtlinearen Systemdarstellung

$$\dot{x} = Ax + Bu + Fg(x, u),$$

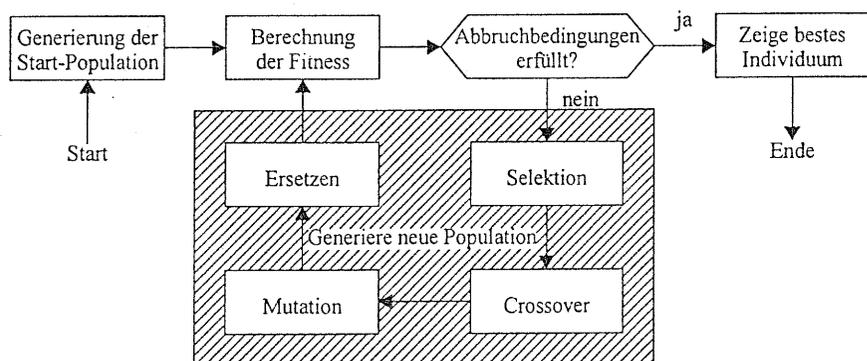
ein Systemmodell niedrigerer Ordnung mit den neuen Systemmatrizen  $A_R, B_R, F_R$ . Der guten erreichbaren Approximation des Originalsystems steht als Nachteil die hohe Systemkomplexität des reduzierten Modells gegenüber, da im allgemeinen die neuen Systemmatrizen viele Nicht-Nullelemente aufweisen.

Die dadurch entstehende hohe Systemkomplexität kann verhindert werden, indem bei der Ordnungsreduzierung geeignete Nebenbedingungen berücksichtigt werden. Diese Nebenbedingungen bewirken, daß eine geeignete Anzahl an Nullen an geeigneten Stellen in die Systemmatrizen eingefügt werden. Im allgemeinen ist es dem Anwender aber nicht möglich, die Anzahl und die Position dieser Nullen zu bestimmen. Die sehr hohe Anzahl an möglichen Nebenbedingungen führt somit zu einem Optimierungsproblem, das es zu lösen gilt.

In diesem Beitrag sollen zwei Verfahren vorgestellt werden, mit denen das Problem gelöst werden kann: einem Genetischen Algorithmus und einem Tabu Search Algorithmus.

Genetische Algorithmen (GA) imitieren evolutionäre Prozesse

unter besonderer Betonung genetischer Mechanismen [4]. Dabei arbeitet ein GA mit einer Menge (Population) von künstlichen *Individuen*. Jedes Individuum ist ein String bestehend aus  $L$  Bits, wobei  $L$  ein anwendungsabhängiger Wert ist, und stellt eine mögliche Lösung des Optimierungsproblems dar. Diese Individuen werden miteinander gekreuzt und, mit einer geringen Wahrscheinlichkeit, mutiert, um neue, bessere Individuen zu erzeugen. Dabei werden gute Individuen bevorzugt und schlechte gemieden, nach dem aus der Natur bekannten Prinzip „Survival of the Fittest“. Nach einigen Generationen – dem Erzeugen neuer Populationen –



**Bild 1** Ablaufschema des eingesetzten GAs

wird ein mindestens suboptimales Individuum gefunden.

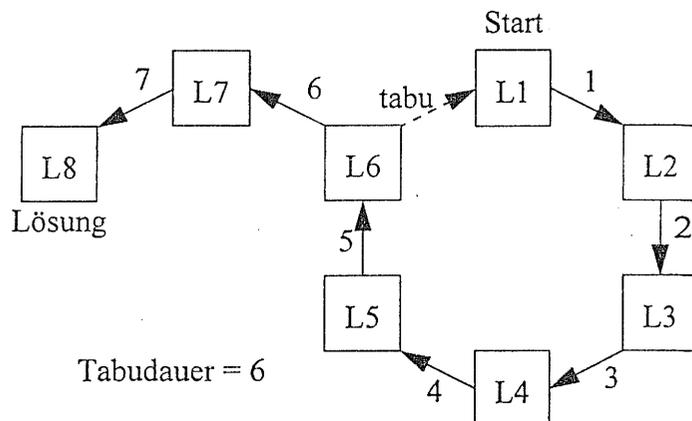
Das zweite eingesetzte Optimierverfahren ist eine Variante von Tabu Search. Bei Tabu Search handelt es sich um eine Metastrategie (ein allgemeines Vorgehensprinzip) für Verbesserungsverfahren zur Überwindung lokaler Optima, die in ihrer Grundform ohne stochastische Komponenten auskommt [5]. Ein wesentliches Element von Tabu Search-Verfahren sind sogenannte Tabu-Listen, durch die verhindert werden soll, daß

bereits erzeugte Lösungen erneut generiert werden. Mit Hilfe derartiger Listen werden Lösungswiederholungen zumindest für eine bestimmte Anzahl aufeinanderfolgender Iterationen verboten, bzw. tabuisiert. Entscheidend für ein erfolgreiches Suchen ist die Tabu-Dauer, eben der Anzahl an Iterationen, die eine Lösung tabu ist. Generell können zu kleine Werte nicht zuverlässig Suchschleifen verhindern, während zu große Werte auch solche Züge verbieten, die überhaupt nicht zu bereits besuchten Lösungen führen. Auch dieser Suchalgorithmus findet eine zumindest suboptimale Lösung.

Die beiden Suchverfahren werden miteinander verglichen und ihre Vor- und Nachteile aufgezeigt. Ihre Leistungsfähigkeit wird an einem Beispiel mit technischem Hintergrund demonstriert.

## Literatur

- [1] Lohmann, B.: *Ordnungsreduktion und Dominanzanalyse nichtlinearer Systeme*, VDI-Fortschrittsberichte, Reihe 8, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1994.
- [2] Butteltmann, M., Lohmann, B.: *Model Simplification And Order Reduction of Non-linear Systems With Genetic Algorithms*. Proceedings of the IMACS Symposium on Mathematical Modellung, 3<sup>rd</sup> MATHMOD, Vienna 2000, p. 777 – 781.
- [3] Butteltmann, M., Lohmann, B.: *Genetische Algorithmen für die Strukturvereinfachung nichtlinearer, ordnungsreduzierter Systeme*. Proceedings 10. Workshop Fuzzy Control des GMA-FA 5.22, Dortmund 2000, S. 140 – 149.
- [4] Nissen, V.: *Einführung in Evolutionäre Algorithmen*. Vieweg, 1997.
- [5] Domschke, W., Drexl, A.: *Operations Research*. Springer, 1991.



**Bild 2** Wirkungsweise des Tabu Search Algorithmus  
Beim 6. Schritt ist Lösung L1 noch tabu

# Nichtlineare Beobachter- ein Zugang, der nichtglatte Systeme einschließt

Robert Engel \*

\* Universität Gh Kassel, Fachbereich Elektrotechnik  
Fachgebiet Regelungs- und Systemtheorie  
Prof. Dr.-Ing. G. Kreisselmeier  
Wilhelmshöher Allee 73, 34109 Kassel  
Tel.: +49/0561/804 6494, Fax.: +49/0561/804 6383  
E-Mail: Engel@uni-kassel.de

**Schlüsselwörter:** Nichtlineare Systeme, Zustandsbeobachter

Es besteht ein breiter fachlicher Konsens, dass Beobachter für ein nichtlineares System

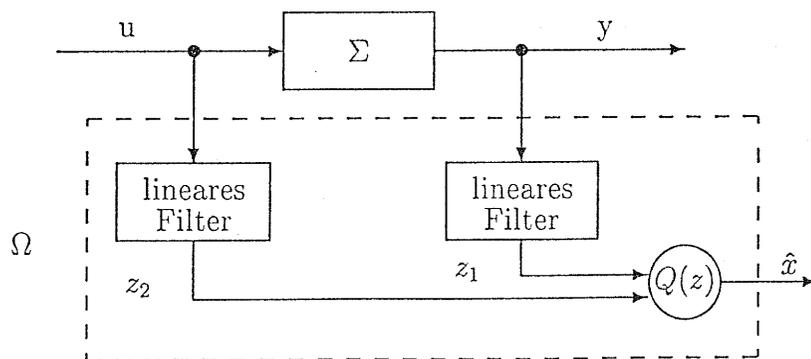
$$\Sigma : \quad \dot{x} = f(x, u), \quad y = h(x)$$

die allgemeine Form

$$\Omega : \quad \dot{z} = w(z, u, y) \quad \hat{x} = Q(z)$$

haben sollten. Der aktuelle Zustand  $z$  des Beobachters ist dann, abgesehen von einem Einschwingvorgang, ein Abbild der Ein-/Ausgangshistorie des Systems, aus dem sich der aktuelle Systemzustand  $x$  rekonstruieren lässt.

Die folgende speziellere Form für einen Beobachter  $\Omega$



ist dadurch motiviert, dass die für lineare Systeme gebräuchlichen Beobachter alle in dieser Form dargestellt werden können. Insbesondere sind hier die Beobachterzustände  $z_1$  und  $z_2$  *separate* Abbilder der Eingangs- bzw. der Ausgangshistorie.

Die Verwendung *linearer* Filter zur Beobachtung eines *nichtlinearen* Systems (lediglich eine nichtlineare Auswertungsabbildung  $Q$  ist vorgesehen) erscheint auf den ersten Blick restriktiv. Tatsächlich erweist sich die Struktur aber als sehr gut geeignet, nicht zuletzt deshalb, weil ein lineares Filter eine Reihenentwicklung der Signalhistorie nach gewissen *orthonormalen* Funktionen realisiert.

Die Grundvoraussetzungen für einen solchen Beobachter sind vergleichsweise bescheiden. Das System  $\Sigma$  muss lediglich (gleichmäßig in  $u$ ) beobachtbar sein und Lipschitz-stetig, insbesondere muss es nicht „glatt“ sein. Damit ist der Ansatz auch auf viele Systeme anwendbar, für die sonst kein Beobachterentwurf bekannt ist.

Von den erzielten Ergebnissen sind zwei besonders signifikant: Erstens gibt es, für kompaktes Beobachtungsgebiet und eine kompakte Menge von Eingangsfunktionen, ohne zusätzliche Voraussetzungen an  $\Sigma$  stets einen Beobachter dieser Form, der den Zustand asymptotisch mit *beliebiger Genauigkeit* rekonstruiert. Im Hinblick auf die ohnehin begrenzte Implementierungsgenauigkeit in der Praxis wäre das bereits alles, was benötigt wird.

Zweitens erhält man einen asymptotisch *exakten* Beobachter unter der zusätzlichen Voraussetzung, dass das System und die Menge der zugelassenen Eingangssignale „endlich komplex“ sind. Dieser Begriff erfasst die Unterscheidbarkeit von Signalen unter Einschränkung auf ein endliches Zeitintervall und endliche Bandbreite, Eigenschaften also, die mit physikalischer Relevanz einhergehen.

Der Entwurf des Beobachters umfasst eine beliebige Polwahl, die Bestimmung einer geeigneten Beobachterordnung, und die Berechnung der Auswertungsabbildung  $Q(z)$ . Der Verzicht auf Glattheit lässt dabei Lösungen in geschlossener Form kaum zu. Eine numerische Lösung ist jedoch stets und auf einfache Weise möglich, allerdings durch den erforderlichen Rechenaufwand auf Systeme niedriger Ordnung beschränkt. Offen ist das Problem, praktikable Berechnungsmöglichkeiten bei Systemen höherer Ordnung zu finden.

Der Vortrag erläutert die wichtigsten Elemente des Beobachtungskonzeptes. Die zugehörigen theoretischen Betrachtungen sind in [1] und [2] dokumentiert.

## Literatur

- [1] G. Kreisselmeier und R. Engel. Observers for Lipschitz Continuous Autonomous Systems. Eingereicht bei IEEE, Trans. Automatic Contr., Juni 2001.
- [2] R. Engel. *Zustandsbeobachter für Nichtlineare Systeme*. Dissertation, eingereicht im Fachbereich Elektrotechnik, Universität Gh Kassel, November 2001.

# Beobachterstruktur für nichtlineare Deskriptorsysteme mit linearer Fehlerdynamik

J. Menke \*

F. Gausch \*\*

\* Lehrstuhl für Steuerungs- und Regelungstechnik  
Universität Paderborn  
Warburger Strasse 100, 33098 Paderborn  
Tel.: +49/5251/60-2995  
Fax: +49/5251/60-3432  
Email: joerg@control.uni-paderborn.de

\*\* Lehrstuhl für Steuerungs- und Regelungstechnik  
Universität Paderborn  
Warburger Strasse 100, 33098 Paderborn  
Tel.: +49/5251/60-2995  
Fax: +49/5251/60-3432  
Email: gausch@uni-paderborn.de

**Schlüsselwörter:** Deskriptorsysteme, nichtlinear, Beobachter

Der hier vorgestellte Ansatz bietet die Möglichkeit, einen Beobachter für ein nichtlineares Deskriptorsystem zu entwerfen. Der Ansatz basiert auf der Theorie über Beobachter für lineare Systeme im Zustandsraum und der exakten Linearisierung auf der Basis differenzial-geometrischer Methoden [1]. Die Theorie zum Beobachterentwurf linearer Systeme im Zustandsraum wird zunächst auf lineare Deskriptorsysteme in semi-expliziter Form erweitert. Im Anschluss folgt eine Modifizierung des Verfahrens, um auch nichtlineare Deskriptorsysteme beobachten zu können. Aus dem Deskriptorsystem entsteht dabei ein nichtlineares gewöhnliches Differenzialgleichungssystem, das exakt linearisiert wird. Für das entstandene lineare System wird dann ein Beobachter angegeben, der alle Zustands- und Deskriptorvariablen liefert. Der Beobachtungsfehler wird dabei durch eine lineare Differenzialgleichung beschrieben.

Deskriptorsysteme entstehen z.B. bei der Modellbildung technischer Prozesse, wenn es sich um die mathematische Beschreibung der Dynamik von Systemen handelt, die aus mehreren Teilsystemen zusammengesetzt sind. Ein Koppeln von dynamischen Teilsystemen führt auf ein differenzial-algebraisches System, das eine Struktur nach Gl. (1) habe.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= a(x, z) + B(x, z) \cdot u \\ 0 &= g(x, z, u) \\ y &= c(x, z) \end{aligned} \tag{1}$$

Das System besitzt  $n$  Differenzialgleichungen in den  $n$  Zustandsgrößen  $x$ , sowie  $p$  algebraische Gleichungen, denen  $p$  Deskriptorvariablen  $z$  zugeordnet werden. Weiter sind  $m$  Eingangsgrößen und  $q$  Ausgangsgrößen vorhanden. Ist eine Elimination der Deskriptorvariablen mit Hilfe der algebraischen Gleichung möglich, so ergibt dies ein Differenzialgleichungssystem mit einer minimalen Anzahl  $\tilde{n}$  an Zustandsgrößen mit  $\tilde{n} \leq n$ .

Von den hier behandelten Systemen wird die Eigenschaft der Regularität und der Realisierbarkeit vorausgesetzt [3]. Der Beobachterentwurf geht von einem System (2) aus, das aus (1) durch wiederholtes Ableiten der algebraischen Gleichung nach der Zeit berechnet werden kann:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= a(x, z) + B(x, z)u \\ \dot{z} &= \tilde{g}(x, z, u, \dot{u}) \\ y &= c(x, z) \end{aligned} \tag{2}$$

Für dieses System ist eine Zustandstransformation  $w = \phi(x, z)$  und Eingangstransformation

$u = \alpha(x, z) + \beta(x, z) \cdot v$  gesucht, die das System in ein lineares System transformiert [1], [2]. Das transformierte System nach Bild 1 mit der neuen Eingangsgröße  $v$  und den Zuständen  $w$  besitzt dann im einfachsten Falle eine lineare Dynamik in Form von Integratorketten mit der Gesamtordnung  $\tilde{n} \leq n$ .

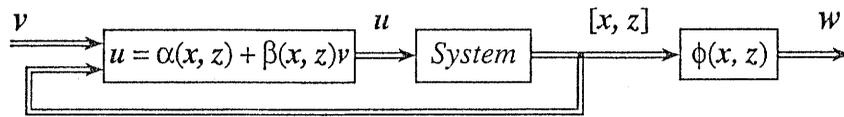


Bild 1: Das linearisierte System

Damit der Beobachter für das transformierte System eine lineare Fehlerdynamik besitzt, muss vorausgesetzt werden, dass die Ausgangsgröße  $y$  linear von den transformierten Zuständen  $w$  abhängt. Ein solcher  $w$ -Beobachter (siehe Bild 2) liefert die Schätzwerte  $\hat{w}$ . Mit Hilfe der inversen Eingangstransformation und einem nichtlinearen Gleichungssystem,

$$v = \frac{u - \alpha(\phi^{-1}(\hat{w}))}{\beta(\phi^{-1}(\hat{w}))} \quad \begin{bmatrix} \hat{x} \\ \hat{z} \end{bmatrix} = F(\hat{w}) \quad (3)$$

das sich aus dem Deskriptorsystem und der Linearisierung ergibt, kann dann ein Beobachter für die Zustands- und Deskriptorvariablen des Systems angegeben werden. Das sei in Bild 2 dargestellt.

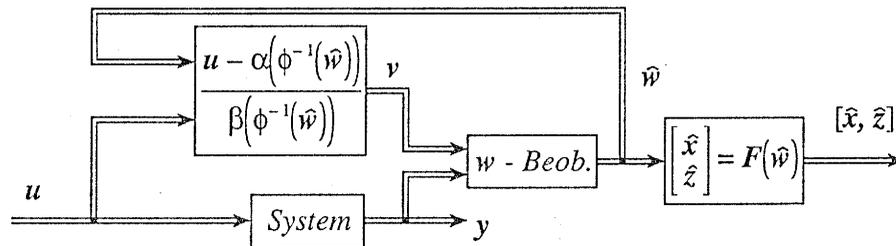


Bild 2: Struktur des Systems mit Beobachter

### Literatur:

- [1] Isidori, A.: Nonlinear Control Systems. 2nd Edition, Springer Verlag, Berlin 1989.
- [2] Slotine, J.-J. E.; Li, W.: Applied Nonlinear Control. Prentice-Hall, 1991.
- [3] Müller, P.: Linearisierung und Entkopplung von Deskriptorsystemen. Dissertation D 14-151 Universität Paderborn 2000.