

39. REGELUNGSTECHNISCHES KOLLOQUIUM IN BOPPARD  
23.-25. FEBRUAR 2005

## Programm und Kurzfassungen

### Mittwoch, 23. Februar 2005

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

### Donnerstag, 24. Februar 2005

**08:45 – 09:00** **Eröffnung und Begrüßung (Raum 1)**  
*Prof. Dr.-Ing. J. Adamy, TU Darmstadt*

	Raum 1	S.	Raum 2	S.
<b>09:00 – 10:30</b>	<b>Robotik</b> Sitzungsleitung: J. Prof. Dr.-Ing. G. Frey		<b>Modellierung, Identifikation und Diagnose</b> Sitzungsleitung: Prof. Dr.-Ing. J. Lunze	
09:00 – 09:30	Bahnplanung für stationäre Roboter mit Hilfe von Approximierung der Hindernisse im Konfigurationsraum <i>M. Rühl (Institut für Regelungs- und Steuerungstechnik, Universität Siegen, Roth, Gr. 25)</i>	<b>1</b>	Formalisierte Modellbeschreibung für Abwassersysteme <i>M. Ogurek (Institut für Automation und Kommunikation e.V. an der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Neumann, Gr. 20)</i>	<b>6</b>
09:30 – 10:00	Haptische Internet-Telepräsenz – Aspekte in paketvermittelnden Kommunikationsnetzen <i>S. Hirche (Lehrstuhl für Steuerungs- und Regelungstechnik, TU München, Buss, Gr. 21)</i>	<b>3</b>	Identifikation dynamischer Modelle für SOFC-Hochtemperatur-Brennstoffzellen <i>M. Haschka (Institut für Regelungs- und Steuerungssysteme, Universität Karlsruhe, Krebs, Gr. 17)</i>	<b>8</b>
10:00 – 10:30	Kraftgeführte Bewegung stationärer Roboter durch Steuerung im Gelenkraum <i>A. Winkler (Professur Robotersysteme, TU Chemnitz, Suchý, Gr. 6)</i>	<b>4</b>	Order Reduction of Large Scale Second Order Systems <i>B. Salimbahmi (Lehrstuhl für Regelungstechnik, TU München, Lohmann, Gr. 5)</i>	<b>10</b>

**10:30 – 11:00** **Kaffee-/Teepause**

## 39. REGELUNGSTECHNISCHES KOLLOQUIUM IN BOPPARD

23.-25. FEBRUAR 2005

<b>11:00 – 12:30 Mobile Roboter</b>		<b>Regelung</b>		
Sitzungsleitung: Prof. Dr.-Ing. M. Buss		Sitzungsleitung: Prof. Dr.-Ing. U. Konigorski		
11:00 – 11:30	Bildgestützte Navigation für mobile Roboter mittels optischen Flusses <i>M. Beck (Lehrstuhl für Automatisierungstechnik, TU Dresden, Janschek, Gr. 9)</i>	<b>12</b>	Wie kann die $l_1$ -optimale Regelung zu einer erfolgreichen Regelungsmethode werden? <i>J. M. Rieber (Institut für Systemtheorie technischer Prozesse, Universität Stuttgart, Allgöwer, Gr. 26)</i>	<b>18</b>
11:30 – 12:00	Datenfusion in einem künstlichen Gleichgewichtsorgan für autonome Roboter <i>M. Seebode (Institut für Regelungstechnik, Universität Hannover, Gerth, Gr. 14)</i>	<b>14</b>	Intervallmethoden für Entwurf, Validierung sowie Optimierung von Steuerungs- und Regelungsstrategien <i>A. Rauh (Abteilung Mess-, Regel- und Mikrotechnik, Universität Ulm, Hofer, Gr. 27)</i>	<b>20</b>
12:00 – 12:30	Entwicklung einer realitätsnahen Krafrückkopplung bei Handprothesen <i>S. Mounier (Institut für Angewandte Informatik, Forschungszentrum Karlsruhe, Brethauer, Gr. 16)</i>	<b>16</b>	Berechnung der erreichbaren Regelgüte für unsichere lineare Systeme unter Berücksichtigung mehrerer Entwurfskriterien <i>M. Völker (Lehrstuhl für Anlagensteuerungstechnik, Fachbereich Bio- und Chemieingenieurwesen, Universität Dortmund, Engell, Gr. 8)</i>	<b>22</b>

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

<b>15:00 – 16:30 Regelungsanwendungen</b>		<b>Automatisierungstechnik</b>		
Sitzungsleitung: Prof. Dr. techn. A. Kugi		Sitzungsleitung: Prof. Dr.-Ing. habil. H. Puta		
15:00 – 15:30	Entwicklung von Regel- und Steuerstrategien für Elektroenergiesysteme mittels Bifurkationsanalyse unter Berücksichtigung der Lastdynamik <i>I. Winzenick (Professur für Regelungstechnik, Helmut-Schmidt-Universität, Universität der Bundeswehr Hamburg, Horn, Gr. 13)</i>	<b>24</b>	Typerkennung technischer Objekte aus Einzelbildern mit adaptiven, dreidimensionalen Modellen <i>A. Laubenheimer (Fraunhofer-Institut für Informations- und Datenverarbeitung, Karlsruhe, Beyerer, Gr. 18)</i>	<b>30</b>
15:30 – 16:00	Optimales Speichermanagement von Wärmeversorgungsanlagen <i>Ch. Hoffmann (Fachgebiet Dynamik und Simulation ökologischer Systeme, TU Ilmenau, Puta, Gr. 15)</i>	<b>26</b>	Flexible Ferndiagnose eingebetteter Systeme <i>J. Traumüller (Institut für Automatisierungs- und Softwaretechnik, Universität Stuttgart, Göhner, Gr. 26)</i>	<b>32</b>
16:00 – 16:30	Kollaborative virtuelle Umgebung für Online-Praktika und Seminare <i>A. Bischoff (Prozesssteuerung und Regelungstechnik, FernUniversität in Hagen, Hoyer, Gr. 12)</i>	<b>28</b>	Trainingsalgorithmus für Neuro-Fuzzy Netzwerke <i>N. Keuth (Institut für Mechanik und Mechatronik, TU Wien, Jörgl, Gr. 28)</i>	<b>34</b>

**16:30 – 17:00 Kaffee-/Teepause**

<b>17:00 – 18:00 Plenarvortrag</b>	
Der Bologna-Prozess und die Studienstrukturreform in Deutschland <i>Ministerialdirigent Christoph Ehrenberg, Bundesministerium für Bildung und Forschung, Berlin</i>	

**18:30 Abendessen**

**39. REGELUNGSTECHNISCHES KOLLOQUIUM IN BOPPARD**  
23.-25. FEBRUAR 2005

**Freitag, 25. Februar 2005**

<b>08:30 – 10:00</b>	<b>Beobachter und Kalmanfilter</b> Sitzungsleitung: Prof. Dr.-Ing. Dr. rer. nat. K. Reinschke	<b>Prozessleittechnik und verteilte Systeme</b> Sitzungsleitung: Prof. Dr.-Ing. R. Tracht
08:30– 09:00	PI-Beobachter zur Diagnose und Regelung elastischer Strukturen <i>I. Krajcin (Professur für Steuerung, Regelung und Systemdynamik, Universität Duisburg-Essen, Söffker, Gr. 11)</i>	Entwurf und Anwendung einer Notation zur Entwicklung verteilter Prozessautomatisierungssysteme U. Katzke (Lehrstuhl für Automatisierungstechnik / Prozessinformatik, Bergische Universität Wuppertal, Vogel-Heuser, Gr. 29)
09:00 – 9:30	Sigmapunkt-Kalmanfilter zur Schätzung von Zuständen und Parametern eines Inertialmesssystems <i>J. Fox (Lehrstuhl für Prozessautomatisierung, Universität des Saarlandes, Janocha, Gr. 24)</i>	Zustandssteuerwerk für das Reglerrahmenkonzept eines Mehrfahrweisenbausteins <i>R. Jorewitz (Lehrstuhl für Prozessleittechnik, RWTH Aachen, Epple, Gr. 1)</i>
09:30 – 10:00	Eine algebraische Methode zur schnellen Zustandsschätzung <i>J. Reger (Institut für Mess- und Automatisierungstechnik, Universität der Bundeswehr München, Hillermeier, Gr. 21)</i>	Nichtblockierende hierarchische Regelung dezentraler ereignisdiskreter Systeme <i>K. Schmidt (Lehrstuhl für Regelungstechnik, Universität Erlangen-Nürnberg, Roppenecker, Gr. 7)</i>

**10:00 – 10:30 Kaffee-/Teepause**

## 39. REGELUNGSTECHNISCHES KOLLOQUIUM IN BOPPARD 23.-25. FEBRUAR 2005

<b>10:30 – 12:00</b>	<b>Kraftfahrzeuganwendungen</b> Sitzungsleitung: Prof. Dr.-Ing. Dr. hc R. Isermann	<b>Regelungen und Steuerungen</b> Sitzungsleitung: Prof. Dr.-Ing. T. Moor
10:30– 11:00	Robuste Regelung für Steer-by-Wire Lenksysteme <i>N. Bajcinca (Institut für Robotik und Mechatronik, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., Bals, Gr. 30)</i>	<b>48</b> Vergleich verschiedener nichtlinearer Regelkonzepte für das Aufschwingen eines invertierten Einfachpendels auf einem Wagen <i>T. Schröder (Lehrstuhl für Automatisierungs- und Regelungstechnik, Christian-Albrechts Universität Kiel, Röck Gr. 23)</i>
11:00 – 11:30	Mehrziel-Objektverfolgung mit Multi-Modell Filtern <i>N. Kämpchen (Abteilung Mess-, Regel- und Mikrotechnik, Universität Ulm, Dietmayer, Gr. 19)</i>	<b>50</b> Analyse und Synthese von Automaten in Zustandsraumdarstellung <i>Ch. Preusse (Institut für Elektrische Informationstechnik, TU Clausthal, Konigorski, Gr. 14)</i>
11:30 – 12:00	Multi Sensor Joined Probabilistic Data Association <i>J. Effertz (Institut für Regelungstechnik, TU-Braunschweig, Schumacher, Gr. 4)</i>	<b>52</b> Bewertung der Regelgüte von verfahrenstechnischen Anlagen mit Hilfe vorliegender Messreihen – Möglichkeit der Anwendung nichtparametrischer statistischer Methoden <i>M. Bebar (Lehrstuhl für Regelungssysteme und Steuerungstechnik, Ruhr-Universität Bochum, Reinig, Gr. 3)</i>

**12:00 – 12:30**    **Abschluss / Preisverleihung / Aufruf für Boppard 2006**

**12:30 – 13:30**    **Mittagessen**

**13:30**            **Ende des Kolloquiums**



# Bahnplanung für stationäre Roboter mit Hilfe von Approximierung der Hindernisse im Konfigurationsraum

Dipl.-Ing. Martin Rühl \*

\* Institut für Regelungs- und Steuerungstechnik  
Universität Siegen  
Hölderlinstraße 3  
Tel.: 0271/740-3374  
Fax: 0271/740-4382  
Email: martin.ruehl@uni-siegen.de

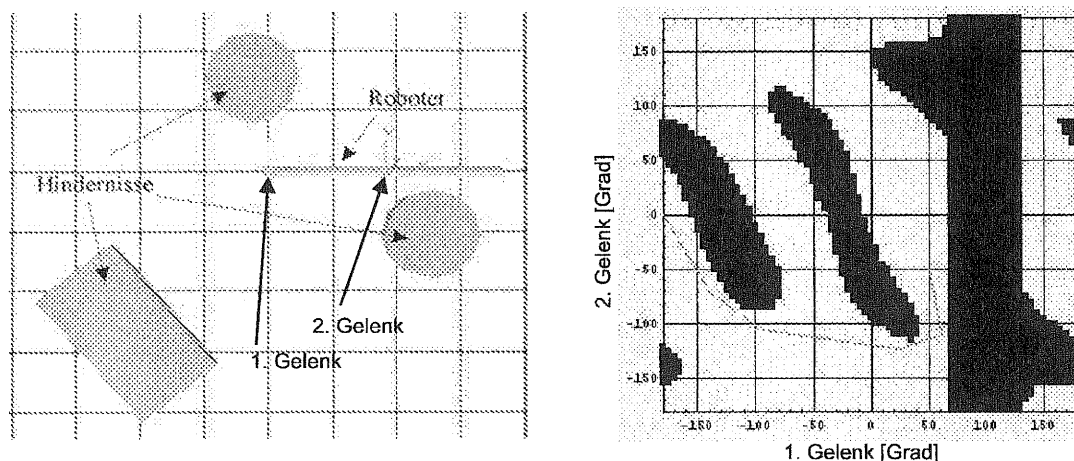
Prof. Dr.-Ing. Hubert Roth \*\*

\*\* Institut für Regelungs- und Steuerungstechnik  
Universität Siegen  
Hölderlinstraße 3  
Tel.: 0271/740-4439  
Fax: 0271/740-4382  
Email: hubert.roth@uni-siegen.de

**Schlüsselwörter:** Hindernisvermeidung, Bahnplanung, Konfigurationsraum

Bevor eine Roboterzelle in einer Fabrikhalle aufgebaut werden kann, wird die Anlage normalerweise zuerst am Computer simuliert. Hier kann die Platzierung des Roboters in der Zelle sehr schnell verändert werden. Außerdem ist eine Überprüfung, ob der Roboter alle gewünschten Punkte in der Zelle überhaupt kollisionsfrei erreichen kann, sehr leicht möglich. Zurzeit wird diese Überprüfung noch von dem Benutzer des Simulationsprogramms per Hand durchgeführt. Er muss in der Simulation Robterpfade generieren und diese auf Kollisionsfreiheit hin testen. Die Pfade müssen so lange verändert und erneut getestet werden, bis alle Punkte kollisionsfrei erreicht werden können. Diese Prozedur ist natürlich sehr zeitraubend und teuer.

In der Literatur werden sehr viele Algorithmen für die automatische kollisionsfreie Bahnplanung beschrieben [1,3]. Fast alle arbeiten im so genannten Konfigurationsraum (als Beispiel siehe Bild 1). Die meisten dieser Algorithmen müssen vor der eigentlichen Planungsphase die kollidierenden Bereiche im Konfigurationsraum in einer vorgeschalteten



*Bild 1: zweiachsiger Roboter mit Hindernissen im Arbeitsraum und der entsprechende Konfigurationsraum mit beispielhaftem kollisionsfreien Pfad*

Berechnungsphase bestimmen. Nach dieser sehr zeitintensiven Berechnungsphase können die gewonnen Informationen für eine schnelle Bahnplanung verwendet werden. Leider werden die berechneten Informationen wertlos, wenn sich die Platzierung der Gegenstände in der Roboterzelle ändert. Wenn z.B. ein Hindernis an einen anderen Ort verlegt wird, muss die komplette Konfigurationsraumberechnung erneut durchgeführt werden. Ein weiteres Problem, das viele aus der Literatur [3] bekannte Bahnplanungsverfahren haben, entsteht durch die Verwendung von zufallsbedingten Suchalgorithmen. Durch diese zufällig entstehenden

Bahnen ist es möglich, dass der Benutzer völlig unterschiedliche kollisionsfreie Bewegungspfade erhält, wenn der Algorithmus unter denselben Startbedingungen mehrfach angewendet wird.

Der hier vorgestellte Algorithmus benötigt keinerlei Vorberechnung vor der eigentlichen Bahnplanungsphase. Außerdem erhält man immer denselben Pfad, wenn der Algorithmus mehrfach unter gleichen Bedingungen gestartet wird. Zuerst bestimmt der Algorithmus die Konfiguration zwischen Start und Ziel, bei der der Roboter am meisten mit den Hindernissen

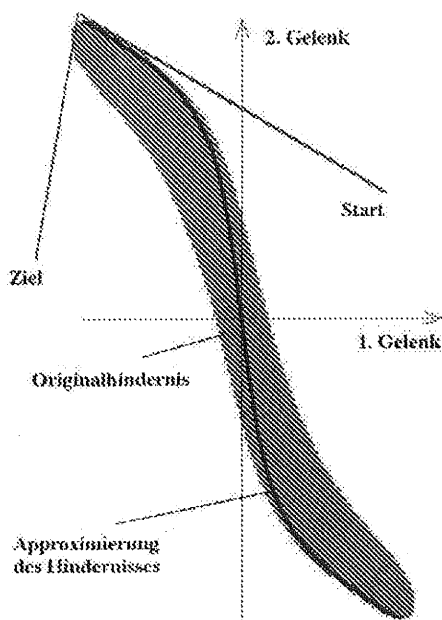


Bild 2: Hindernis im Konfigurationsraum und die entsprechende Approximierung

kollidiert. Dazu wird die direkte Verbindungslinie zwischen den beiden Konfigurationen im Konfigurationsraum abgefahren und mit Hilfe einer Bewertungsfunktion die Kollision an jeder Stelle bestimmt. Im nächsten Schritt approximiert der Algorithmus das kollidierende Hindernis im Konfigurationsraum durch Verwendung eines geeigneten punktförmigen Hindernisses und einer skelettartigen Approximation des Roboters. Mit Hilfe dieser Näherung kann der Algorithmus nun eine kollisionsfreie Bahn um das approximierte Hindernis herum berechnen (siehe Bild 2). Hierbei sind keine weiteren zeitintensiven Kollisionsuntersuchungen notwendig. Es werden lediglich mit Hilfe der Jacobi-Matrix und deren Moore-Penrose Pseudoinversen Tangenten entlang des Hindernisses im Konfigurationsraum berechnet und zu einem kollisionsfreien Weg zusammengesetzt. Der so berechnete Weg wird anschließend auf Kollisionsfreiheit hin untersucht. In sehr vielen Fällen ist dieser Weg bereits für die realen Hindernisse und den realen Roboter kollisionsfrei.

Auf jeden Fall wird sich aber die Bewertungsfunktion gegenüber der vorherigen Bahn deutlich verbessert haben. Auf diese Weise kann der komplette Pfad schrittweise aus der Kollision heraus bewegt werden.

Unsere Tests zeigen, dass dieser Algorithmus in der Lage ist, auch für Robotersysteme mit sehr vielen Freiheitsgraden sehr schnell kollisionsfreie Wege zu berechnen.

## Literatur:

- [1] Baginski, Boris (1998), *Motion Planning for Manipulators with Many Degrees of Freedom – The BB-Method*, PhD Theses, University of Munich
- [2] Latombe, Jean-Claude (1993), *Geometry and search in motion planning*, Annals of Mathematics and Artificial Intelligence, 8, 215-227
- [3] Latombe, Jean-Claude (1991). *Robot motion planning*. Kluwer Academic Publisher, Massachusetts
- [4] Liègeois (1977), *Automatic supervisory control of the configuration and behaviour of multibody mechanisms*, IEEE Trans. Systems, Man and Cybernetics, Band SMC-7, S. 868-871
- [5] Nakamura, Y. (1991), *Advanced Robotics, Redundancy and Optimization*, Addison-Wesley
- [6] RALLI E., *Fast path planning for robot manipulators using numerical potential fields in the configuration space*, Proceedings of IEEE International conference on Intelligent Robots and Systems IROS'94, Munich, Germany, 1994

# Haptische Internet-Telepräsenz – Aspekte in paketvermittelnden Kommunikationsnetzen

Sandra Hirche

Lehrstuhl für Steuerungs- und Regelungstechnik (Ordinarius: Univ.-Prof. Dr.-Ing./Univ. Tokio Martin Buss)  
Technische Universität München, 80290 München  
Tel. +49 89 289 23402 Fax +49 89 289 28340  
sandra.hirche@ei.tum.de www.lsr.ei.tum.de

**Schlüsselwörter:** Haptische Telepräsenz, paketvermittelnde Kommunikationsnetze, variable Zeitverzögerung, Paketverlust, passivitätsbasierte Ansätze

Telepräsenzsysteme ermöglichen dem Bediener die Perzeption und Manipulation einer (entfernten) Umgebung. Der Anwendungsbereich erstreckt sich von der Tele-Chirurgie über Tele-Wartung bis hin zur Tele-Ausbildung und Tele-Entertainment. Der Bediener manipuliert die Mensch-System-Schnittstelle (HSI) und kommandiert damit den in der entfernten Umgebung agierenden Teleoperator (TO), siehe Abb. 1. Die am Teleoperator akquirierte Sensor-Information wird dem Bediener über die Mensch-System-Schnittstelle dargestellt.

Aus regelungstechnischer Sicht besonders interessante Problemstellungen ergeben sich im Zusammenhang mit dem haptischen (kraftreflektierenden) Teilsystem, da durch die Übermittlung der haptischen Kommando- und Sensorsignale ein Regelkreis geschlossen wird. Erfolgt die Datenübertragung über ein paketvermittelndes Kommunikationsnetz wie das Internet, so treten variable Zeitverzögerungen und unvorhersehbare Paketverluste auf. Diese Effekte destabilisieren das Gesamtsystem.

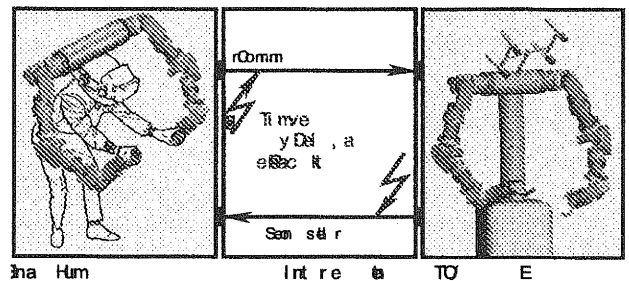


Abbildung 1: Haptische Internet-Telepräsenz

Bekannte passivitätsbasierte Regelungsstrategien für konstante [1] und auch variable [2,3] Zeitverzögerungen eignen sich nur eingeschränkt für die Analyse und Synthese haptischer Telepräsenz über paketvermittelnde Kommunikationsnetze. Die zentrale Herausforderung besteht in der Entwicklung neuartiger Regelungsstrategien, um eine Anwendung über das Internet zu ermöglichen.

Die in diesem Beitrag analysierten, aus dem Bereich der Netzwerkregelsysteme bekannten Strategien können die Stabilität des haptischen Telepräsenzsystems nicht garantieren [4]. Neuartige passivitätsbasierte Strategien werden vorgestellt und in einem Internet-Telepräsenz-Experiment mit zwei Freiheitsgraden validiert. Die Anwendung der vorgestellten Methoden in Netzwerkregelsystemen ist denkbar und Ziel zukünftiger Forschung.

## Literatur:

- [1] R. Anderson und M. Spong, "Bilateral Control of Teleoperators with Time Delay," *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 34, pp. 494-501, 1989.
- [2] R. Lozano, N. Chopra and M. Spong, "Passivation of Force Reflecting Bilateral Teleoperators with Time Varying Delay," *8. Mechatronics Forum*, (Netherlands), 2002.
- [3] N. Chopra, M. Spong, S. Hirche and M. Buss, "Bilateral Teleoperation over Internet: the Time Varying Delay Problem," *American Control Conference*, (Denver, US), 2003.
- [4] S. Hirche and M. Buss, "Packet Loss Effects in Passive Telepresence Systems," *43rd IEEE Conference on Decision and Control*, (Bahamas), 2004.

# Kraftgeführte Bewegung stationärer Roboter durch Steuerung im Gelenkraum

Dipl.-Ing Alexander Winkler \*

Prof. Dr.-Ing. Jozef Suchý \*\*

\* Professur Robotersysteme  
Technische Universität Chemnitz  
09107 Chemnitz  
0371 / 531-3495  
0317 / 531-3353

alexander.winkler@e-technik.tu-chemnitz.de

\*\* Professur Robotersysteme  
Technische Universität Chemnitz  
09107 Chemnitz  
0371 / 531-3427  
0317 / 531-3353

jozef.suchy@etit.tu-chemnitz.de

**Schlüsselwörter:** Kraft/Momentregelung, Kraftführung, Impedanzregelung.

Die Interaktion zwischen Menschen und Robotern umfasst viele Gebiete. Eines davon ist das Gebiet der sog. kraftgeführten Bewegungen stationärer Roboter. Dies bedeutet das Führen des Roboters durch Anfassen des Endeffektors. Kraftgeführte Bewegungen können z. B. für das komfortable Anlernen von Positionen und Orientierungen ohne Verwendung des Handbediengerätes benutzt werden. Außerdem bestehen Anwendungsmöglichkeiten als Assistenzsysteme unter anderem beim Transport schwerer Teile, beim Schleifen, Bohren, usw. Ein Prinzip der kraftgeführten Bewegungen besteht darin, die auf den Endeffektor wirkenden Kräfte und Momente mit Hilfe eines Kraft/Momentsensors (KMS) zu messen und daraus geeignete Bewegungen des Manipulators zu generieren.

Üblicherweise werden die kartesischen Messwerte des KMS direkt in kartesische Bewegungen (Translation, Rotation) des Endeffektors umgewandelt, wobei die gewünschte Bewegungsdynamik ebenfalls im kartesischen Raum vorgegeben wird. Das daraus resultierende Verhalten des Roboters widerspricht dabei unseren natürlichen Erwartungen. Außerdem können Singularitäten nicht überwunden werden, was zu einer Einschränkung des Arbeitsraumes führt.

Ein neu entwickelter Algorithmus behebt diese Probleme. Er basiert auf dem Ansatz der Impedanzregelung im Gelenkraum. Die durch den KMS gemessenen Werte der Kräfte und Momente werden zunächst, wie auch beim kartesischen Algorithmus, von den Einflüssen der Gewichtskraft befreit. Danach erfolgt deren Ausrichtung mit dem Basiskoordinatensystem des Roboters. Durch ständige Berechnung der aktuellen Jakobimatrix  $\underline{J}$  des Manipulators, ist es nun möglich aus dem Vektor der gemessenen Kräfte und Momente  $\underline{F}$  im Basiskoordinatensystem, die daraus resultierenden Momente um die Drehachsen der Gelenke  $\underline{\tau}$  zu ermitteln:

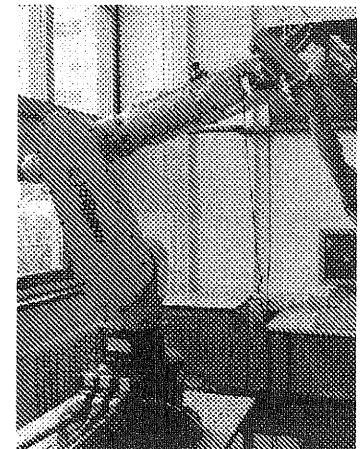
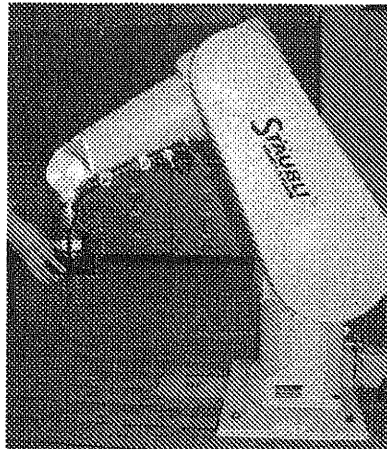
$$\underline{\tau} = \underline{J}^T \cdot \underline{F} \quad (1)$$

Die so berechneten Gelenkmomente bestimmen zusammen mit dem vorgegebenen Wunschverhalten die Roboterbewegung. Im einfachsten Falle wird für jedes Gelenk das Wunschverhalten durch ein Masse-Dämpfer-System vorgegeben. Durch die Wahl der Werte für Masse (Massenträgheitsmoment)  $m_i$  und Dämpfung  $d_i$  kann das Verhalten des Roboters individuell parametrisiert werden. Das Modell des Wunschverhaltens, welches durch eine entsprechende Differentialgleichung vorgegeben ist, wird in der Robotersteuerung zyklisch berechnet.

$$\tau_i = d_i \cdot \dot{q}_i + m_i \cdot \ddot{q}_i \quad (2)$$

Es stellt die Lage- und/oder Geschwindigkeitssollwerte ( $q_i$ ,  $dq_i/dt$ ) für die Achsregler der einzelnen Gelenke zur Verfügung.

Der hier beschriebene Algorithmus zur kraftgeführten Bewegung eines stationären Roboters wurde an zwei Systemen erfolgreich getestet. Diese sind ein STÄUBLI-Roboter mit dazugehöriger V+ Steuerung (CS7B) und ein Roboter vom Typ MANUTEC r3 mit einer DSP-basierenden Robotersteuerung (siehe Abbildung 1).



*Abbildung 1: Beispielsysteme*

Geplant ist außerdem die Implementierung der kraftgeführten Bewegung im Gelenkraum in die KUKA-Robotersteuerung KRC2 unter Verwendung der RSI-Programmierung (Robot Sensor Interface). Durch die verschiedenen Möglichkeiten der Beeinflussung der Manipulatorbewegung ergeben sich unterschiedliche dynamische Verhalten. Aufgrund der geringeren Totzeiten bei einem Experimentalsystem (z. B. MANUTEC r3), ist der Roboterverhalten dort am günstigsten. Aber auch mit kommerziellen Robotersteuerungen lassen sich sehr gute Ergebnisse erzielen.

#### **Literatur:**

- [1] A. Winkler, J. Suchý; Kraft/Momentregelung von Industrierobotern; Scientific Reports, 1. Workshop Robotik; Hochschule Mittweida (FH); 2004
- [2] A. Winkler, J. Suchý; Kraftgeführte Bewegung mit einem Standardindustrieroboter; Robotik 2004; VDI-Berichte 1841; 2004
- [3] L. Sciavicco, B. Siciliano; Modelling and Control of Robot Manipulators; Springer; 2003
- [3] H.-J. Siegert, S. Bocionek; Robotik, Programmierung intelligenter Roboter; Springer; 1996
- [4] P. J. McKerrow; Introduction to Robotics; Addison Wesley; 1991

## Vorschlag zum 39. Regelungstechnischen Kolloquium in Boppard vom 23.-25.2.2005

Gruppe Magdeburg, An-Institut für Automation und Kommunikation der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Prof. Neumann/ Dr. Jumar

### Formalisierte Modellbeschreibung für Abwassersysteme

Michael Ogurek

Dr. Ulrich Jumar

Institut für Automation und Kommunikation e.V.  
an der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg  
Steinfeldstr. 3, 39179 Barleben  
Tel. 03 92 03/ 810-0, Fax 03 92 03/ 8 11 00

**Schlüsselwörter:** Modellierung, formale Sprachen, Simulation, Umwelttechnik, integrierter Prozessentwurf

Modellierung und Simulation von Abwassersystemen haben sich in Wissenschaft und Anwendung als anerkannte Werkzeuge etabliert. Als besonders hilfreich hat sich Simulation dort erwiesen, wo aufgrund der Anzahl der betrachteten Teilprozesse der Abwasserbehandlung gegenseitige Wechselwirkungen von Stoffströmen und Prozessen mit herkömmlichen Methoden nicht oder nur sehr schwer berücksichtigt werden können. Dies betrifft sowohl den Anlagenentwurf als auch die verfahrenstechnische sowie regelungstechnische Optimierung. Damit unter Verwendung von Modellen bei der Anwendung gültige Aussagen erzielt werden können, bedarf es einer korrekten Implementierung in einer Simulationsumgebung.

Üblicherweise ist der Ausgangspunkt einer Modellimplementierung eine wissenschaftliche Veröffentlichung. Im Falle von biochemischen Modellgrundlagen, wie sie im Bereich der Modellierung und Simulation von Kläranlagen Verwendung finden, wird hierbei häufig die Petersen-Matrix zur Darstellung herangezogen. Die folgende Abbildung zeigt ein einfaches Beispiel für das Wachstum und den Zerfall einer Biomasse (X).

Tab. 1: Petersen Matrix eines einfachen biochemischen Umwandlungsmodells

Fraktionen Prozesse	1	2	Prozessraten [g COD m <sup>-3</sup> d <sup>-1</sup> ]
	S	X	
1 Wachstum	$\frac{1}{Y}$	1	$\mu_{max} \frac{S}{S + K_S} \frac{SO}{SO + K_O} X$
2 Zerfall	0	-1	$b X$
	Substrate [g COD/ m <sup>3</sup> ]	Biomasse [g COD/m <sup>3</sup> ]	Y - Yield, $\mu_{max}$ - Maximale Wachstumsrate, b - Zerfallsrate, $K_S$ , $K_O$ - Halbsättigungskonstanten, SO - gelöster Sauerstoff

Die Implementierung aktueller Modellgrundlagen mit mehr als 20 Fraktionen und Prozessen in die spezifische Modellbeschreibungssprache eines Simulationswerkzeuges ist ein fehlerträchtiger Prozess. Die Ursachen reichen von Schreibfehlern bis hin zu Fehlinterpretationen der Veröffentlichung. Die Verifizierung als Teil der Implementierung einer Modellgrundlage ist unverzichtbar und kann auf verschiedenen Wegen erfolgen. Aber auch hier ist festzuhalten, dass die dafür angewendeten Verfahren (z.B. Ringtests) weder den Aufwand senken noch sicher sind.

Mit der abwassertechnisch integrierten Betrachtung rücken weitere Aspekte in den Vordergrund. Hier wird versucht, die Modellgrundlagen verschiedener Teilsysteme (Kanalnetz, Abwasserreinigung, Klärschlammbehandlung und Vorfluter) innerhalb eines Modells zu betrachten. Die dafür notwendige Kopplung der verschiedenen Modellgrundlagen bildet eine besondere Herausforderung.

Der Vortrag stellt zunächst die angesprochenen Problemstellungen vor, um anschließend Lösungsansätze zu diskutieren und entsprechende anwendungstaugliche Umsetzungen zu präsentieren. Die Schwerpunkte sind:

- plattformübergreifender Austausch von Modellgrundlagen mittels SBML (Systems Biology Markup Language) als einer XML-basierten Beschreibungssprache,
- bilanzbasierte Prüfung der Implementierung von Modellgrundlagen biochemischer Umwandlungsprozesse,
- Lösungen zum Entwurf und zur Verifikation von Schnittstellen zwischen den Modellen der verschiedenen Teilprozesse.

### Literatur

[1] Hucka et al. (2003): The systems biology markup language (SBML): A medium for representation of biochemical network models. *Bioinformatics*, 19(4), 524-531.

[2] Petersen, E.E. (1965): *Chemical Reaction Analysis*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ.

[3] Henze, M.; Gujer, W.; Mino, T.; van Loosdrecht, M. (2000): *Activated sludge models ASM1, ASM2, ASM2D and ASM3*. IWA Scientific and Technical Report No.9. IWA Publishing, London, UK.

[4] Hulsbeek, J.J.W.; Kruit, J.; Roeleveld, P.J.; van Loosdrecht, M.C.M. (2002): A practical protocol for dynamic modelling of activated sludge systems. *Water Sci. Tech.* 45(6), 127-136.

[5] Langergraber, G.; Rieger, L.; Winkler, S.; Alex, J.; Wiese, J.; Owerdieck, C.; Ahnert, M.; Simon, J.; Maurer, M. (2003): *Proposal of general guidelines for high quality simulation studies of wastewater treatment plants*. Submitted to 9th IWA Conference on LWWTPs, Prag.

[6] Reichert, P.; Borchardt, D.; Henze, M.; Rauch, W.; Shanahan, P.; Somlyódy, L.; Vanrolleghem, P.A. (2001): *River Water Quality Model No.1*. IWA Scientific and Technical Report No. 12, IWA Publishing, London, UK.

# Identifikation dynamischer Modelle für SOFC-Hochtemperatur-Brennstoffzellen

\*Markus Haschka

\*\*Volker Krebs

\* Institut für Regelungs- und Steuerungssysteme  
Universität Karlsruhe (TH)  
Kaiserstraße 12  
Tel.: 0721-608-3183  
Fax: 0721-608-2707  
haschka@irs.uni-karlsruhe.de

\*\* Institut für Regelungs- und Steuerungssysteme  
Universität Karlsruhe (TH)  
Kaiserstraße 12  
Tel.: 0721-608-3180  
Fax: 0721-608-2707  
krebs@irs.uni-karlsruhe.de

**Schlüsselwörter:** SOFC-Hochtemperaturbrennstoffzelle, Systemidentifikation, Fraktionale Systeme

Die Brennstoffzellentechnologie ist eine zukunftsweisende Alternative, um chemische Energie in elektrische Energie und Wärme bei einem hohen Wirkungsgrad umzuwandeln. Es ist der entscheidende Vorteil der Brennstoffzelle, dass ihr Gesamtwirkungsgrad nicht, wie bei Wärmekraftmaschinen, durch den Carnot-Wirkungsgrad begrenzt ist. Bei Brennstoffzellen handelt es sich um elektrochemische Energiewandler, die zugeführten Brennstoff (meistens Wasserstoffgas, Erdgas oder Kohlenmonoxid) elektrochemisch oxidieren und dabei direkt in elektrische Energie und zusätzlicher Wärme umwandeln. Insbesondere ist die SOFC (Solid-Oxide-Fuel-Cell) ein viel versprechender Brennstoffzellentyp, da bei ihrer Herstellung relativ unedle kostengünstige keramische und metallische Materialien verwendet werden. Andererseits muss die SOFC jedoch bei sehr hohen Temperaturen (700°C-1000°C) betrieben werden, was den praktischen Einsatz dieser Zellen anspruchsvoll gestaltet.

In mehreren Forschungsprojekten des Instituts für Regelungs- und Steuerungssysteme findet eine Zusammenarbeit zwischen Werkstoffwissenschaftlern und Automatisierungstechnikern mit dem Ziel statt, regelungstechnische Verfahren zur Modellbildung, Betriebsführung und Diagnose von Brennstoffzellensystemen zu entwickeln. Dabei muss, wie in Abbildung 1 dargestellt, ein weiter Dynamikbereich untersucht werden.

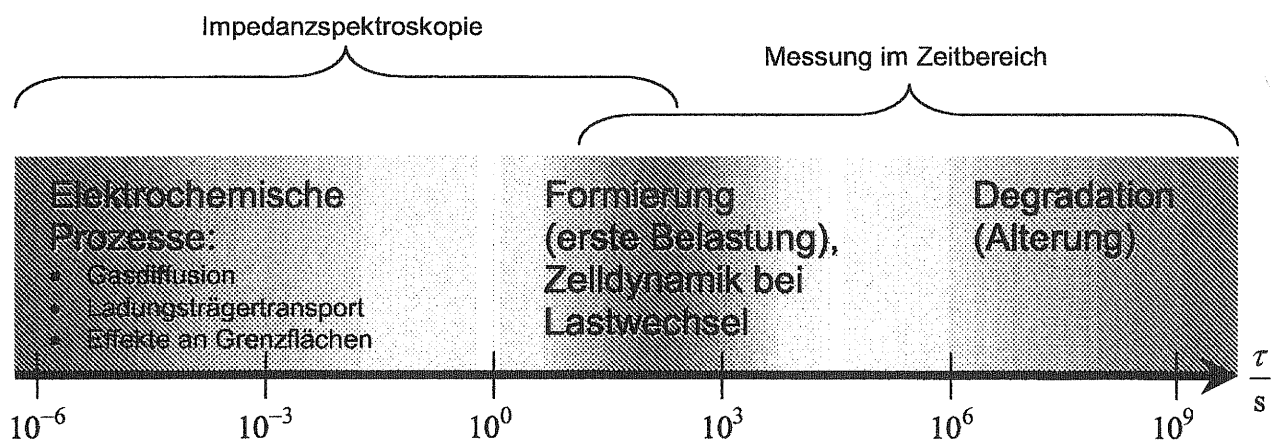


Abbildung 1: Dynamische Prozesse bei SOFC-Brennstoffzellen und ihre Zeitkonstanten

Sehr schnell abklingende elektrochemische Vorgänge in der Zelle werden üblicherweise mittels Impedanzspektroskopie im Frequenzbereich messtechnisch erfasst. Mit Ersatzschaltbildern für die gemessenen Impedanzverläufe können zum Beispiel strukturelle Veränderungen



in den Elektrodenwerkstoffen, wie auch Fehler bei der Gasversorgung der Brennstoffzelle entdeckt werden.

Die kostenintensive und zeitaufwändige Impedanzspektroskopie kann umgangen werden, wenn Methoden der Systemidentifikation im Zeitbereich angewendet werden. Die dabei entstehenden linearen Modelle unterscheiden sich jedoch durch das Auftreten nichtganzzahliger Ableitungen im Zeitbereich von den üblichen linearen Modellen der Systemtheorie. Die Existenz dieser Systemklasse bei SOFC-Brennstoffzellen lässt sich physikalisch durch die poröse Werkstoffstruktur der Elektroden erklären. Die Übertragungsfunktionen dieser Ersatzschaltungen werden im Zeitbereich durch so genannte fraktionale lineare Differenzialgleichungen repräsentiert.

In [1] und [2] wurde ein Verfahren zur Parameteridentifikation im Zeitbereich vorgestellt und gezeigt, welche Rückschlüsse die so gewonnenen Modellparameter auf die Gasversorgung der Zelle erlauben. Im vorliegenden Beitrag wird eine numerisch zuverlässige und robuste Weiterentwicklung des Identifikationsalgorithmus präsentiert. Mit diesem Verfahren ist eine Modellgewinnung für den hoch dynamischen Bereich der elektrochemischen Prozesse der Zelle möglich.

Im mittleren Frequenzbereich, der die Formierung und die Zelldynamik bei Lastwechsel charakterisiert, erhält man Modelle, die für die Betriebsführung und Diagnose von SOFC-Brennstoffzellen von Bedeutung sind. Schnelle Lastwechsel führen zu einer deutlichen Zunahme der Verluste im Betrieb [3]. Daher muss das dynamische Verhalten der Zelle durch das Modell sehr genau beschrieben werden. Außerdem soll die Modellstruktur physikalisch interpretierbar sein, um vorhandenes Vorwissen von Werkstoffforschern einbringen zu können. In [3] wurde eine solche nichtlineare Modellstruktur entwickelt und identifiziert.

Schließlich wird ein Alterungsmodell vorgestellt, das sehr langsame dynamische Vorgänge beschreibt und Vorhersagen über die Lebensdauer der Zelle erlaubt. Dieser Ansatz, für die durch Lastwechsel bedingten Schädigungen der Zellwerkstoffe, wird im Vortrag weiter entwickelt und an Messdaten validiert.

Mit den hier dargestellten Modellformen ist die Grundlage für die zukünftige Entwicklung von Betriebsführungs- und Diagnosestrategien gegeben, die einen zuverlässigen und effizienten Einsatz von SOFC-Systemen ermöglichen wird.

## Literatur:

- [1] Haschka, Markus; Rüger, Bernd Mathias; Krebs, Volker: *Identification of the Electrical Behavior of a Solid Oxide Fuel Cell in the Time-Domain*. Fractional Differentiation and its Applications 2004, Bordeaux Frankreich, 2004.
- [2] Haschka, Markus; Rüger, Bernd Mathias; Krebs, Volker; Weber, André; Sonn, Volker; Ivers-Tiffée, Ellen: *Diagnosis of SOFC-Systems Using Fractional Calculus*. European Solid Oxide Fuel Cell Forum 2004, Luzern, Schweiz, 2004.
- [3] Haschka, Markus; Weickert, Thomas; Krebs, Volker; Schäfer, Sven; Ivers-Tiffée, Ellen: *Identification of a Nonlinear Model for the Electrical Behavior of a Solid Oxide Fuel Cell*. Erscheint in France Deutschland Fuel Cell Conference, Belfort (France), 2004.

# Order Reduction of Large Scale Second Order Systems

Behnam Salimbahrmi\*

\* Lehrstuhl für Regelungstechnik  
Technische Universität München  
Boltzmann str. 15, D-85748 Garching  
Tel. 089-289 15659  
Fax 089-289 15653  
Email [salimbahrami@tum.de](mailto:salimbahrami@tum.de)

Boris Lohmann\*\*

\* Lehrstuhl für Regelungstechnik  
Technische Universität München  
Boltzmann str. 15, D-85748 Garching  
Tel. 089-289 15610  
Fax 089-289 15653  
Email [lohmann@tum.de](mailto:lohmann@tum.de)

**Schlüsselwörter:** large-scale systems, order reduction, second order model, Krylov subspace.

Modeling in some fields of engineering like Electrical Circuits, civil engineering, aerospace engineering and Micro-Electro-Mechanical Systems, leads to a large number of *second* order differential equations. It is then advisable to construct a reduced order model that approximates the behavior of the original system while preserving its second-order structure [2,3,4].

A leading method in reducing the large scale systems is moment matching by means of Krylov subspaces [1] which matches the coefficients of the Taylor series expansion of the reduced and original transfer functions. In this presentation, the Krylov subspace method is applied for the reduction of second order models in two different ways: (1) using the so-called second order Krylov subspace methods [3], (2) by reduction in state space and then back conversion into second order form recovering the second order structure [2].

The first approach is a generalization of the work in [4], where the reduction is done by applying the projection directly to the second order model using a newly defined second order Krylov subspace, avoiding the detour of converting the model into a first-order one. For the SISO case this method matches at most  $q$  moments, where  $q$  is the order of the reduced system.

To increase the number of matching parameters up to  $2q$ , the second approach is proposed where the equivalent state space representation is reduced first using specific Krylov subspaces, preserving the second order character inside, and then, in a second step, the reduced order model is converted into a second order form. The steps of the reduction and back conversion to second order form are presented.

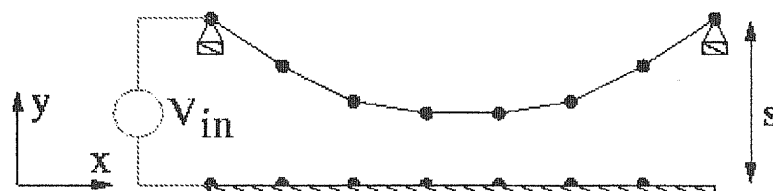


Figure1. A conducting beam supported at both ends with counter electrode below.

As a technical example, an electro-statically actuated beam model is used, figure 1. Two types of model are considered: an undamped model and a lightly damped model both of order

15992 with 7996 second order differential equations. The original models are reduced to different orders and the results are compared.

### **Literatur:**

- [1] R. W. Freund, Model reduction methods based on Krylov subspaces, *Acta Numerica*, Vol. 12, pp. 267-319, 2003.
- [2] B. Lohmann and B. Salimbahrami, Ordnungsreduktion mittels Krylov-Unterraummethoden. *Automatisierungstechnik*, Vol. 52, No. 1, pp. 30–38, 2004.
- [3] B. Salimbahrami and B. Lohmann, Order Reduction of Large Scale Second Order Systems using Krylov Subspace Methods. *Accepted and to be appeared in Linear Algebra and its Applications*, 2003.
- [4] T. J. Su and R. R. Craig Jr., Model Reduction and Control of Flexible Structures Using Krylov Vectors. *J. Guidance*, Vol. 14, No. 2, pp. 260–267, 1989.

# Bildgestützte Navigation für mobile Roboter mittels optischen Flusses

M. Beck

Lehrstuhl für Automatisierungstechnik  
Technische Universität Dresden  
01062 Dresden  
Tel.: +49-351-463-32722  
Fax: +49-351-463-37039  
Email: beck@if.ifa.et.tu-dresden.de

V. Tchernykh

Lehrstuhl für Automatisierungstechnik  
Technische Universität Dresden  
01062 Dresden  
Tel.: +49-351-463-32134  
Fax: +49-351-463-37039  
Email: chernykh@if.ifa.et.tu-dresden.de

**Schlüsselwörter:** Optischer Fluss, optische Rechner, Lokalisierung, Navigation

In der mobilen Robotik nimmt die genaue und zuverlässige Bestimmung der Position und Orientierung (Lage) des Roboters eine Schlüsselrolle ein, da die Erfüllung der übertragenen Aufgabe hierdurch maßgeblich beeinflusst wird. Zu dieser Problemstellung wurden in der Vergangenheit bereits vielfältige Lösungsansätze entwickelt, welche auf verschiedensten Sensorkonzepten beruhen. Besonderes Interesse gilt dabei jenen Lösungen mit *minimalem Sensoraufwand*, wodurch Masse, Bauvolumen und Energiebedarf reduziert werden. Für ein *Ein-Sensor-Konzept* sind bildgebende Sensoren aufgrund des hohen Informationsgehaltes besonders vielversprechend. Allerdings wird dieser Vorteil durch sehr große Datenmengen und gleichermaßen hohe Anforderungen an die Rechenleistung erkauft. Bekannte merkmalsbasierte Ansätze, welche auf dem Erkennen bestimmter Objekte oder Strukturen im Bild beruhen, nutzen vielfach natürliche bzw. künstliche Landmarken. Nachteilig hierbei ist, dass im Falle künstlicher Landmarken ein manipulierender Eingriff in die Umwelt nötig ist. Bei natürlichen Landmarken, speziell in unstrukturierten Umgebungen, ist eine robuste Verarbeitung mit Merkmalsmethoden speziell bei verrauschten Bildern problematisch. Auch die Detektion von Hindernissen sowie Kollisionsvermeidung sind hiermit nicht möglich. Aus diesen Gründen haben Verfahren, welche nicht auf der Erkennung einzelner Objekte im Bild beruhen, zunehmend eine größere Beachtung gefunden. Darunter bietet die Nutzung des optischen Flusses ein vielversprechendes Lösungspotential [1],[2],[3],[4].

Das hier vorgestellte Verfahren nutzt zur Lokalisierung als Primärsensor eine *einzelne Weitwinkelkamera* und unterstützend einen gewöhnlichen Odometriesensor [5],[6]. Die Bewegungserfassung des Roboters geschieht über eine Auswertung des *optischen Flusses*. Als optischen Fluss bezeichnet man dabei die Projektion der Bewegungen der Objekte in der von der Kamera erfassten Roboterumgebung auf die Bildebene, welche sich hier zu zwei aufeinander folgenden Zeitpunkten als Verschiebungen des Bildinhaltes widerspiegeln. Zur Berechnung des optischen Flusses existieren eine Vielzahl verschiedener Verfahren. Ihnen gemein sind jedoch die hohen Anforderungen an die Rechenleistung. Im vorliegenden Fall wird ein sogenanntes *korrelationsbasiertes Matchingverfahren* genutzt. Dazu werden die einzelnen Kamerabilder in Segmente unterteilt, deren gegenseitige Verschiebung durch eine zweidimensionale Korrelation mit Subpixelgenauigkeit gemessen werden kann. Das Verfahren ist sehr robust gegenüber Bildrauschen.

Die erforderliche extrem hohe Rechenleistung wird mit Hilfe eines *optischen Korrelators* bereitgestellt, womit eine Berechnung des optischen Flusses in Echtzeit für große Bilder erst möglich wird. Derartige optische Rechner werden am Lehrstuhl für Automatisierungstechnik seit mehreren Jahren erfolgreich entwickelt und in einer Reihe weiterer Anwendungen eingesetzt [7],[8].

Der Beitrag beschreibt das Systemkonzept (siehe Bild 1) und erläutert die speziell entwickelten Verfahrensansätze zur Bestimmung des optischen Flusses und der daraus abgeleiteten relativen Orientierungsinformation und absoluten Lageinformation (gelbe Blöcke in Bild 1).

Die relative Orientierungsinformation kann allein aus dem optischen Fluss abgeleitet werden, wogegen die absolute Lageinformation über ein spezielles 3D-Matching-Verfahren mit einem a-priori-Umgebungsmodell gewonnen wird. Mit diesen rein bildgestützten Daten ist prinzipiell eine autonome Lokalisierung möglich. Es wird gezeigt, dass zur Erhöhung der Robustheit in realen Umgebungen bereits die Hinzunahme eines gewöhnlichen Odometriesensors akzeptable Lokalisierungsgenauigkeiten sicherstellt. Als mögliche Erweiterung der Systemfunktionalität wird skizziert, wie mit den vorhandenen Komponenten auch ein 3D-Umgebungsmodell gewonnen werden kann. Die Leistungsfähigkeit der vorgestellten Verfahren, eingebunden in geeignete Schätz- und Fusionsalgorithmen, wird mittels Simulations- und Testergebnissen gezeigt.

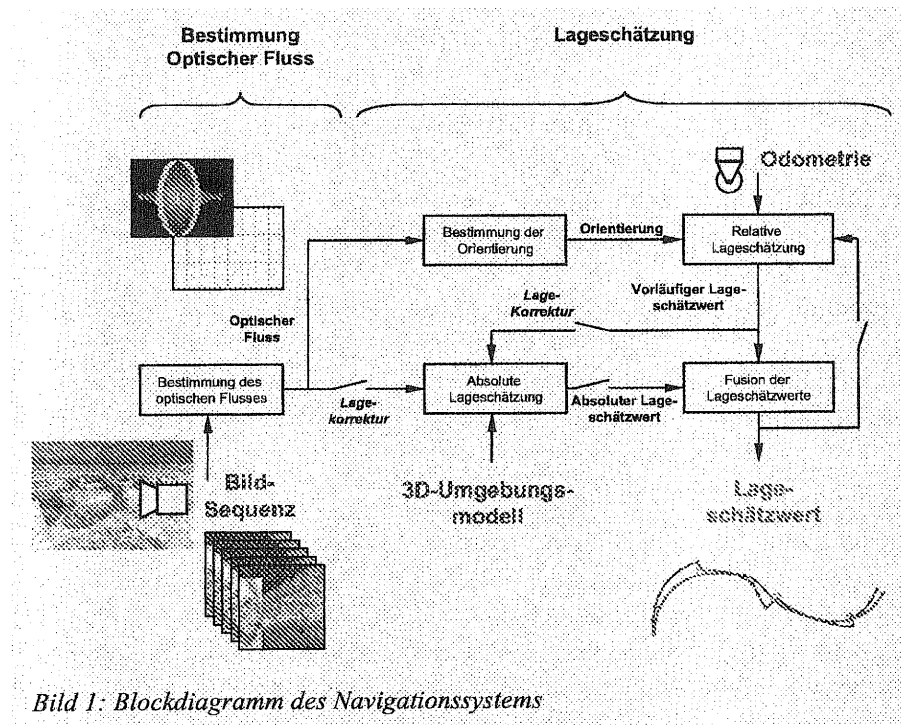


Bild 1: Blockdiagramm des Navigationssystems

## Literatur

- [1] Barrows, G., Neely, C.: Mixed-mode VLSI optic flow sensors for in-flight control of a micro air vehicle. *Proc. SPIE Vol. 4109, Critical Technologies for the Future of Computing*, S. 52-63, (2000).
- [2] Bruhn, A., Weickert, J., Feddern, C., Kohlberger, T., Schnörr, C.: Real-Time Optic Flow Computation with Variational Methods, CAIP 2003, LNCS 2756, S. 222-229, (2003).
- [3] Galvin, B., McCane, B., Novins, K., Mason, D., Mills, S.: Recovering Motion Fields: An Evaluation of Eight Optical Flow Algorithms. In: *Proceedings of British Machine Vision Conference*, S. 195-204, Southampton, Great Britain, (1998).
- [4] Giachetti, A., Campani, M., Torre, V.: The use of optical flow for the autonomous navigation. In: *Proceedings of the third European Conference on Computer Vision 1*, S. 146-151, Stockholm, Sweden, (1994).
- [5] Beck, M.: Ein Navigationsverfahren für mobile Roboter unter Nutzung des Optischen Flusses. *Diplomarbeit*, Institut für Automatisierungstechnik, TU Dresden, (2004).
- [6] Janschek, K., Tchernykh, V., Beck, M.: Optical Flow based Navigation for Mobile Robots using an Embedded Optical Correlator. In: *Preprints of the 3rd IFAC Conference on Mechatronic Systems – Mechatronics 2004*, 6-8 September 2004, Sydney, Australia, pp.793-798, (2004).
- [7] Tchernykh, V., Janschek, K., Dyblenko, S.: Space application of a self-calibrating optical processor or harsh mechanical environment. In: *Proceedings of 1st IFAC Conference on Mechatronic Systems - Mechatronics 2000, September 18-20, 2000, Darmstadt, Germany*. Pergamon-Elsevier Science. Volume 3, S.309-314, (2000).
- [8] Tchernykh, V., Dyblenko, S., Janschek, K., Göhler, W., Harnisch, B.: SmartScan - Hardware Test Results for Smart Opto-Electronic Image Correction for Pushbroom Cameras. In: *Proceedings of the SPIE, Earth Observing Systems VII*. Edited by Barnes, William L., Vol. 4814, S. 264-272, (2002).

# Datenfusion in einem künstlichen Gleichgewichtsorgan für autonome Roboter

M. Seebode

R. Strasser

T. Lilge

W. Gerth

Institut für Regelungstechnik, Universität Hannover  
Appelstr. 11, 30167 Hannover

Tel.: +49-511-762-4512 Fax: +49-511-762-4536 E-Mail: mailbox@irt.uni-hannover.de

**Schlüsselwörter:** Inertiales Messsystem, Drehratensensoren, Neigungsmessung, Datenfusion, nichtlineare Beobachter und Filter, Quaternionen

Für die reaktive Regelung insbesondere zweibeiniger Service-roboter ist die zuverlässige Erfassung der Neigung und Orientierung unerlässlich. Zu diesem Zweck wurde am Institut für Regelungstechnik der Universität Hannover ein Inertialsensor entwickelt und aufgebaut [1] (s. Abb. 1). Geringes Gewicht, kompakte Bauweise und geringe Stromaufnahme standen dabei im Vordergrund. Zur Kostenreduktion wurden preisgünstige Sensoren ausgewählt, deren Messunsicherheiten durch eine intelligente Datenverarbeitung und Fusion kompensiert werden sollen.

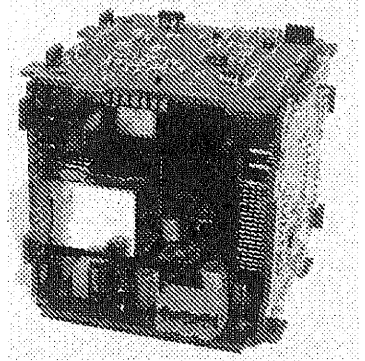


Abbildung 1: Inertialsensor

Die Lagebestimmung erfolgt zunächst mit Hilfe von Drehratensensoren für jede der drei Achsen. Aus der Integration dieser Signale folgen die Drehwinkel, die jedoch eine große Drift aufweisen, da Drehratensensoren stets mit einem langsam veränderlichen Offset behaftet sind. Zur Stützung dient daher die Richtung des Gravitationsvektors und des Erdmagnetfeldes relativ zum Sensor. Die Feldmessung ist im praktischen Einsatz jedoch sehr störanfällig und ebenfalls offsetbehaftet. Darüber hinaus wird die Erfassung des Gravitationsvektors mit Beschleunigungsmessern durch extern auftretende Beschleunigungen verfälscht. Eine geeignete Fusion aller Messdaten ist daher unerlässlich.

Die Beschreibung der Rotation eines Körpers kann beispielsweise über die Euler-Winkel (Roll-, Nick- und Gierwinkel) oder mit Hilfe von Quaternionen erfolgen. Ein Quaternion ist eine hyperkomplexe Zahl mit einem Realteil und drei Imaginärteilen und kann zur Darstellung von Rotationen Verwendung finden. Die Imaginärteile bestimmen dann die Drehachse im Raum und der Realteil den Drehwinkel um diese Achse. Das Beobachtungsmodell des rotierenden Körpers beinhaltet die von außen eingeprägten Drehwinkelgeschwindigkeiten im Körperkoordinatensystem als Eingangsgrößen sowie die Euler-Winkel bzw. das Rotationsquaternion als Zustandsgrößen. Die aus den Zuständen bzw. der Rotation des Körpers folgenden Orientierungen des Gravitations- und Erdmagnetfeldvektors relativ zum Körper stellen die Ausgangsgrößen des Modells dar. Die Messoffsets der Drehratensensoren werden als Integratoren ohne Eingangsgrößen modelliert. Der Vorteil der Quaternionendarstellung liegt in einem dynamischen Systemmodell ohne Singularitäten, da keine Winkelfunktionen auftreten. Dieses führt zudem zu einer größeren Recheneffizienz. Die Projektion der internen Beobachterzustände erweist sich bei beiden Darstellungen je nach Verfahren als mehr oder weniger aufwändig.

Für die Beobachtung des auf den Euler-Winkeln basierenden Modells wurden folgende Beobachtungsverfahren eingesetzt und verifiziert.

1. Ein einfacher nichtlinearer Beobachter ohne erweiterte Zustandsgrößen für die Messoffsets. Zur Driftkompensation werden die Winkelfehler in das Körperkoordinatensystem, in dem die Drehraten vorliegen, transformiert und über ein PI-Glied zu den Signalen der Drehratensensoren addiert. Das so realisierte Fusionsverfahren wurde bereits in praktischen Anwendungen, wie z. B. auf einem zweibeinigen Roboter oder auf einem Modellhubschrauber erfolgreich eingesetzt und im PKW verifiziert.
2. Ein Beobachter nach [2] mit einer Gauß-Newton-Iteration zur Minimierung eines quadratischen Fehlerkriteriums. Dieser Ansatz wurde um die Schätzung der Messoffsets der Drehratensensoren erweitert.

Auf dem Quaternionenmodell basieren die nachfolgend aufgeführten Fusionsverfahren. Dabei wurde i. A. mit Hilfe der Schätzungen und Messungen ein Referenzquaternion erzeugt, um eine einfache Ausgangsgleichung zu erhalten.

3. Das Äquivalent des unter 1. dargestellten Beobachters.
4. Ein Extended Kalman Filter (EKF), wobei neben dem Referenzquaternion auch die direkte Umrechnung des rekonstruierten Rotationsquaternions in die geschätzte Orientierung des Gravitationsvektors relativ zum Inertialsensor eingesetzt wurde, um die Bestimmung eines Referenzquaternions zu vermeiden.
5. Der allgemeine Beobachteransatz nach [3] für eine Klasse nichtlinearer MIMO-Systeme konnte ebenfalls für das hier vorliegende Systemmodell Verwendung finden.

Vergleichende Untersuchungen, die mit Hilfe von Simulationen durchgeführt wurden, zeigen zwar, dass die Verfahren nach 1. und 5. für die verwendeten Testszenarien einen günstigen Kompromiss darstellen, jedoch weist das EKF die größte Flexibilität bzgl. Erweiterungen des Beobachtungs- oder Messmodells auf.

Zur Verbesserung der Genauigkeit und Robustheit des Inertialsensors wurden folgende, weiterführende Untersuchungen durchgeführt:

- Adaption der Beobachterparameter bei Auftreten externer Beschleunigungen. In diesen Fällen ist die Erfassung des Gravitationsvektors fehlerbehaftet und der Beobachter muss überwiegend modellgestützt arbeiten.
- Online-Kalibrierung der Magnetfeldmessung durch einen RLS-Algorithmus zur Offsetkompensation.
- Verzicht auf die störanfällige Magnetfeldmessung. Um dennoch eine Offsetkompensation für alle drei Drehratensensoren zu ermöglichen, wird der Sensor definiert rotiert. Zur Erhöhung der Rechengenauigkeit des für diese Versuche verwendeten EKF wurde eine erweiterte Diskretisierung des Beobachtungsmodells durchgeführt.
- Fusion von zwei Drehratensensoren pro Achse mit unterschiedlichen Bandbreiten.

Aktuelle Arbeiten befassen sich mit der Integration der Roboterdynamik in das Beobachtungsmodell sowie mit der Stützung des Sensors durch Bildinformationen.

### Literatur:

- [1] R. Strasser, M. Seebode, W. Gerth. *A Very Small Low Cost Inertial Measurement Unit (IMU) for Robotic Applications*. Symp. Gyro Technology 2003. H. Sorg, Universität Stuttgart, Deutsche Gesellschaft für Ortung und Navigation (DGON), S. 18.0-18.9, 2003.
- [2] E. R. Bachmann, I. Duman, U. Y. Usta, R. B. McGhee, X. P. Yun, M. J. Zyda. *Orientation Tracking for Humans and Robots Using inertial Sensors*. International Symposium on Computational Intelligence in Robotics & Automation: 187-194, 1999.
- [3] M. Farza, M. M'Saad, L. Rossignol. *Observer design for a class of MIMO nonlinear systems*. Automatica, (40):135-143, 2004.

# Entwicklung einer realitätsnahen Krafrückkopplung bei Handprothesen

Dr.-Ing. Séverine Mounier \*

\* BERATA GmbH  
Frankfurter Ring 127  
80807 München  
Tel.: 089 143259-0  
Fax: 089 143259-59

Email: severine.mounier@berata.com

Prof. Dr.-Ing. habil. Georg Bretthauer \*\*

\*\* Institut für Angewandte Informatik  
Forschungszentrum Karlsruhe  
Postfach 3640, 76021 Karlsruhe  
Tel.: 07247 82 5700  
Fax: 07247 82 5702

Email: georg.bretthauer@iai.fzk.de

**Schlüsselwörter:** Handprothese, Krafrückkopplung, vibrotaktile Stimulation

In Deutschland gibt es etwa 31 000 Personen, denen eine Hand fehlt [1]. Eine myoelektrische Handprothese ist eine Prothese, deren Bewegungen über Hautelektroden von den Patienten selbst gesteuert werden. Da diese Art von Prothesen relativ schwer ist und ihre Bewegungen unnatürlich aussehen, werden diese Handprothesen von fast einem Drittel ihrer Besitzer nicht regelmäßig getragen. Deswegen wird am Institut für Angewandte Informatik im Forschungszentrum Karlsruhe eine fluidisch angetriebene Handprothese entwickelt. Diese künstliche Hand ist leicht und realisiert verschiedene Griffarten [2]. Hierdurch können natürlich wirkende Bewegungen nachgebildet werden.

Es gibt bisher noch keine Krafrückkopplung für Handprothesen, sondern lediglich welche bei Telemanipulatoren. Die Grundidee der Entwicklung und Realisierung einer realitätsnahen Krafrückkopplung für Handprothesenträger besteht darin, dass der Prothesenträger am Arm spüren kann, mit welcher Kraft seine Handprothese einen Gegenstand greift. Das System muss dem Prothesenträger helfen, die Bewegungen der Prothese besser zu steuern und den permanenten Blickkontakt beim Greifen zu verringern. Damit soll die Akzeptanz der Prothesen erhöht werden.

Ein Krafrückkopplungssystem für Handprothesen besteht aus den Modulen Greifkraftbestimmung, Datenverarbeitung und nichtinvasive Reizerzeugung am Patienten (Abbildung 1).

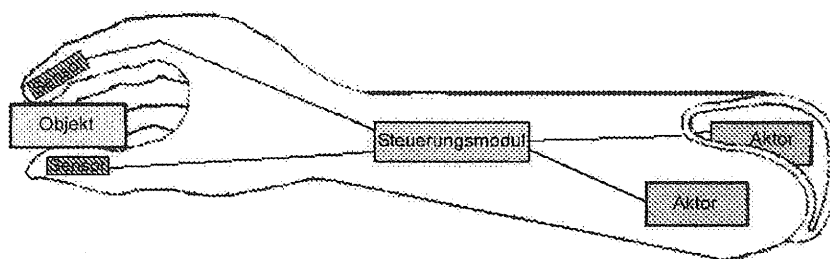


Abbildung 1: Krafrückkopplungsprinzip

Aus der Vielzahl der Ansätze zur Reizerzeugung der Haut wird die vibrotaktile Stimulation als vielversprechende Technologie identifiziert.

Aus verschiedenen Aktorprinzipien zur vibrotaktile Stimulation wird unter Berücksichtigung der konstruktiven Randbedingungen, der Wünsche der Patienten und der physiologischen Aspekte das Prinzip der Vibrationsmotoren als am besten geeignet bestimmt [3].

Für die gewählte Integrationsvariante des Aktors in den Prothesenschaft wird eine mathematische Modellierung des Systems bestehend aus Prothesenschaft, Aktor mit Lateralbefestigungen und Haut vorgestellt. Weil wesentliche Einflussgrößen wie die



Kippbewegung berücksichtigt sind, beschreibt das Modell das Verhalten des realen Systems gut [4].

Da sich das Nervensystem an kontinuierliche Signale schnell gewöhnt, ist eine sprunghafte Stimulation besser geeignet. Erstmals werden Messungen der Hautempfindlichkeit nach dem Frequenzunterschiedverfahren mit einem portablen Aktor vorgestellt. Gemessen wird die Fähigkeit des Probanden, Frequenzunterschiede und deren Vorzeichen wahrzunehmen. Bei der Auswertung der Messungen werden das Alter und das Geschlecht der Probanden berücksichtigt, wobei beide Aspekte keinen wesentlichen Einfluss auf die Hautempfindlichkeit haben [5]. Basierend auf diesen Messungen wird der Zusammenhang zwischen einer Änderung der Greifkraft und einer Änderung des Reizes bestimmt. Die Erkenntnisse über die Hautempfindlichkeit führen zu einer Steuerung der Krafrückkopplung, die nicht an den Patienten angepasst werden muss.

Erstmals werden diese Messungen der Hautempfindlichkeit auch bei Patienten, die mit einer Handprothese versorgt sind, durchgeführt. Es werden dabei höhere Empfindlichkeiten als bei den Probanden ohne Handverlust gemessen.

Der realisierte Prototyp eines Krafrückkopplungssystems besteht aus einem Kraftsensor, einem Steuerungsmodul und einem Aktormodul. Das Steuerungsmodul berechnet aus dem Verlauf der Greifkraft den Verlauf der Frequenz, mit der die Haut des Patienten gereizt wird. Das Aktormodul erzeugt die vom Steuerungsmodul vorgegebene vibrotaktile Stimulation.

Der realisierte Prototyp wurde an Patienten erprobt, die mit einer Handprothese versorgt sind. Die Patienten äußerten sich positiv und sind von einer potenziellen Hilfe der Krafrückkopplung bei täglicher Benutzung überzeugt [6].

## Literatur:

- [1] Statistisches Bundesamt: Statistik der Schwerbehinderungen in Deutschland, 2001
- [2] Schulz, S., Pylatiuk, C. et. al.: A new ultralight anthropomorphic hand, IEEE ICRA, pp. 2437-2441, 2001.
- [3] Mounier, S., Prothèse et retour de force vibrotactile, 16e Journées des Jeunes Chercheurs en Robotique, Lyon, 2002
- [4] S. Mounier, G. Bretthauer, Mathematische Modellierung des Aktors eines Krafrückkopplungssystems, Ilmenau, BMT 2004
- [5] S. Mounier, Effects of Gender and Age on vibrational Resolution of the Skin, Technology and Health Care, 2004
- [6] S. Mounier, Entwicklung einer realitätsnahen Krafrückkopplung bei fluidisch betriebenen Handprothesen, Doktorarbeit, Universität Karlsruhe, 2004

# Wie kann die $l_1$ -optimale Regelung zu einer erfolgreichen Regelungsmethode werden?

Jochen M. Rieber\*

Frank Allgöwer \*\*

\* Institut für Systemtheorie technischer Prozesse  
Universität Stuttgart  
Pfaffenwaldring 9, 70550 Stuttgart  
Tel. 0711-6857751  
Fax 0711-6857735  
Email rieber@ist.uni-stuttgart.de

\*\* Institut für Systemtheorie technischer Prozesse  
Universität Stuttgart  
Pfaffenwaldring 9, 70550 Stuttgart  
Tel. 0711-6857734  
Fax 0711-6857735  
Email allgower@ist.uni-stuttgart.de

**Schlüsselwörter:**  $l_1$ -optimale Regelung,  $H_\infty$ -optimale Regelung, robuste Regelung, Störunterdrückung, lineare parameterabhängige Systeme, Regelgüte-Spezifikation.

Auf dem Gebiet der optimalen und robusten Regelungstheorie wurden in den letzten 15 Jahren vielversprechende Methoden wie die  $H_\infty$ -optimale Regelung oder die  $l_1$ -optimale Regelung entwickelt. Die großen Stärken der  $l_1$ -optimalen Regelung liegen theoretisch gesehen in der direkten und intuitiven Spezifizierung von Regelgüteanforderungen im Zeitbereich. Als Maß für die Regelgüte wird die schlimmstmögliche Verstärkung zwischen der  $l_\infty$ -Norm von Eingangssignalen und der  $l_\infty$ -Norm von Ausgangssignalen herangezogen. Die  $l_\infty$ -Norm eines Signals misst dabei die maximale Signalamplitude über alle Zeiten. So können beispielsweise folgende Problemstellungen betrachtet werden, die mittels der meisten anderen Methoden nur indirekt oder überhaupt nicht zu lösen sind:

- Minimierung des maximal auftretenden Regelfehlers,
- Einhaltung von Beschränkungen der Stellgrößenamplitude oder der Aktuatordynamik,
- optimale Unterdrückung von persistenten, d.h. nicht verschwindenden Störungen.

Seit der Definition des  $l_1$ -optimalen Regelungsproblems im Jahr 1986 durch Vidyasagar [7] wurde in diesem Zusammenhang bis heute das Problem der Reglersynthese für diskrete lineare zeitinvariante Systeme auf der Basis von linearen Programmen gelöst [1], [3]. Desweiteren ist der robuste Reglerentwurf hinsichtlich zeitvarianter nichtlinearer dynamischer Unsicherheiten, sowohl unstrukturierter als auch strukturierter Natur, möglich [2], [4]. Jedoch fehlen über diese grundlegenden theoretischen Konzepte hinaus Erweiterungen der Funktionalität in dreierlei Hinsicht. Auf der einen Seite muss die Methodik für allgemeinere Systemklassen zugänglich gemacht werden. Zum Anderen sollten effiziente Algorithmen zur Reglerberechnung entwickelt werden. Schließlich fehlen praktische Anwendungen der  $l_1$ -optimalen Regelung sowie Anwendungsschemata fast gänzlich. Um die  $l_1$ -optimale Regelung zu einer praktisch relevanten und erfolgreichen Regelungsmethodik zu machen, besteht also ein konkreter Nachholbedarf sowohl in Bezug auf methodische als auch anwendungsspezifische Entwicklungen.

Gegenwärtig werden von uns theoretische Ansätze und Verfahren zur Erweiterung der bisherigen Funktionalität der  $l_1$ -optimalen Regelung untersucht. Dabei stehen neue Methoden zur Reglersynthese für lineare parameterabhängige Systeme [5] sowie für Differential-Algebra-Systeme im Mittelpunkt. Außerdem wird eine neue Methode zur gemischt  $l_1$ -/ $H_\infty$ -optimalen Regelung entwickelt, die auf linearen Matrizenungleichungen (LMIs) basiert und die zusätzliche Einbeziehung von Frequenzbereichskriterien erlaubt. In einem zweiten Schwerpunkt wird die Vorgehensweise bei der praktischen Anwendung der  $l_1$ -optimalen

Regelung sowie die Wahl von Performance-Gewichten untersucht. Dabei sollen anhand von Fallbeispielen typische Probleme aufgezeigt und, ähnlich wie im  $H_\infty$ -Fall, eine Entwicklungsmethodik sowie konkrete Entwurfsheuristiken zur Unterstützung des Anwenders entwickelt werden [6]. Über den aktuellen Stand der Forschung auf diesen Themengebieten soll in diesem Vortrag berichtet werden.

#### Literatur:

- [1] Dahleh, M.A. und I.J. Diaz-Bobillo, *Control of uncertain systems: a linear programming approach*. Prentice-Hall, Upper Saddle River, NJ, USA, 1995.
- [2] Dahleh, M.A. und M.H. Khammash, „Controller design for plants with structured uncertainty.“ *Automatica*, vol. 29, S. 37-56, 1993.
- [3] Khammash, M., „A new approach to the solution of the  $l_1$  control problem: the scaled-Q method.“ *IEEE Trans. Automatic Control*, vol. 45, 180-187, 2000.
- [4] Khammash, M., M.V. Salapaka und T. Van Voorhis, „Robust synthesis in  $l_1$ : a globally optimal solution.“ *IEEE Trans. Automatic Control*, vol. 46, 1744-1754, 2001
- [5] Rieber, J.M. und F. Allgöwer, „An approach to gain-scheduled  $l_1$ -optimal control of linear parameter-varying systems.“ *Proc. 42nd IEEE Conf. Decision and Control*, S. 6109-6114, Maui, HI, USA, 2003.
- [6] Rieber, J.M., G. Schitter, A. Stemmer und F. Allgöwer, „Experimental application of  $l_1$ -optimal control in atomic force microscopy.“ To appear.
- [7] Vidyasagar, M. „Optimal rejection of persistent bounded disturbances.“ *IEEE Trans. Automatic Control*, vol. 31, S. 527-534, 1986.

# Intervallmethoden für Entwurf, Validierung sowie Optimierung von Steuerungs- und Regelungsstrategien

Andreas Rauh \*

\* Abteilung Mess-, Regel- und Mikrotechnik  
Universität Ulm  
Albert-Einstein-Allee 41  
89081 Ulm  
Tel.: 0731/ 50-26340  
Fax: 0731/ 50-26301  
Email: andreas.rauh@e-technik.uni-ulm.de

Eberhard P. Hofer \*\*

\*\* Abteilung Mess-, Regel- und Mikrotechnik  
Universität Ulm  
Albert-Einstein-Allee 41  
89081 Ulm  
Tel.: 0731/ 50-26300  
Fax: 0731/ 50-26301  
Email: ep.hofer@e-technik.uni-ulm.de

**Schlüsselwörter:** Intervallararithmetik, Unsicherheiten, nichtlineare Systeme, Erreichbarkeit von Zuständen, Steuerbarkeit, Simulation, Robustheit, Optimierung

Eine Vielzahl praxisrelevanter Systeme lässt sich in Form nichtlinearer mathematischer Modelle mit unsicheren Parametern beschreiben. Bei der Analyse von Steuerungs- und Regelungsstrategien für derartige Systeme, speziell bei sicherheitskritischen Anwendungen, sind garantierte Aussagen über die Menge aller erreichbaren Zustände von großer Bedeutung. Herkömmliche Methoden setzen in vielen dieser Fälle Simulationstechniken ein, die auf Monte-Carlo-Simulationen basieren. Diese Verfahren erlauben in der Regel jedoch nicht, garantierte Einschließungen der Bereiche aller erreichbaren Zustände zu ermitteln. Intervallararithmetische Methoden stellen im Gegensatz dazu ein effizientes Werkzeug zur verifizierten Simulation nichtlinearer Systeme mit unsicheren Parametern dar. Mittels dieser Methoden können garantierte Schranken aller Zustände – auch im Falle unsicherer Parameter – berechnet werden. Wesentliche Voraussetzung zur Anwendung von Intervallmethoden ist dabei, dass Unsicherheiten in Form von Toleranzbereichen, die durch untere und obere Intervallgrenzen spezifiziert werden, angegeben sind.

In diesem Beitrag soll nach einem Überblick über die Grundlagen intervallararithmetischer Simulationsmethoden für zeitdiskrete sowie zeitkontinuierliche Systeme auf spezielle Anforderungen für Simulations-, Entwurfs- und Optimierungswerkzeuge im Regelungsdesign eingegangen werden. Entwurf und Optimierung von Steuerungs- und Regelungsstrategien basieren dabei auf garantierten Aussagen über Einzugsgebiete im Zustandsraum, aus denen in vorgegebener Vorgangsdauer  $t_f$  ein vorgegebener Endzustand  $x(t_f)$  erreicht werden kann. Dabei muss unterschieden werden, ob die ermittelten Einzugsgebiete für mindestens

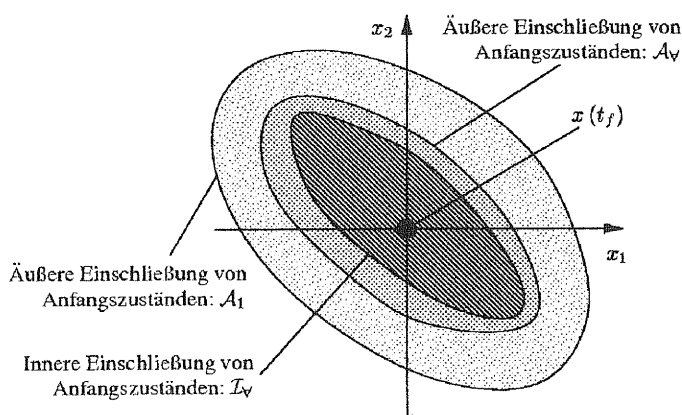


Abbildung 1: Unterscheidung von inneren und äußeren Intervalleinschließungen

einen Wert aus dem Toleranzbereich des unsicheren Parameters oder aber garantiert für alle möglichen Parameterwerte gelten. Eine schematische Darstellung über die hierbei zu unterscheidenden Fälle ist in Abbildung 1 gegeben.

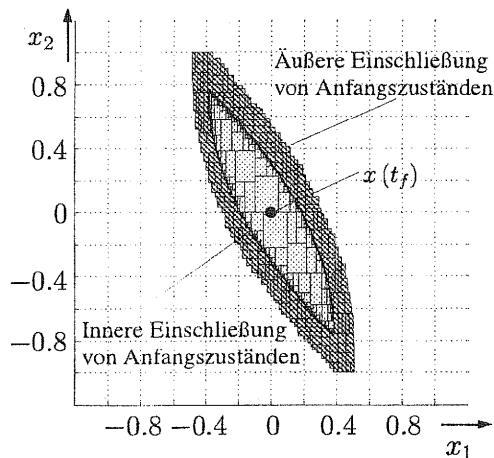


Abbildung 2: Innere und äußere Intervalleinschließungen zulässiger Anfangszustände

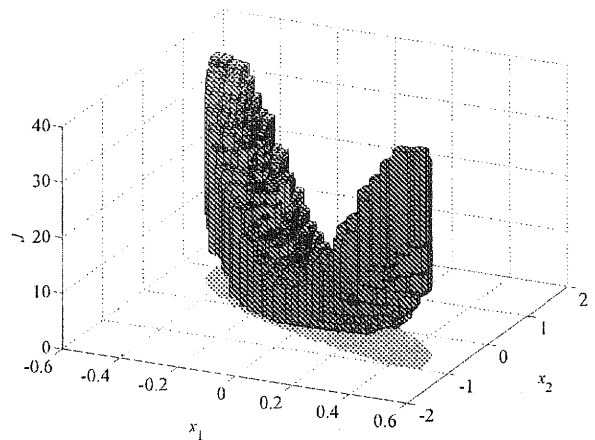


Abbildung 3: Intervalleinschließung des Gütekriteriums

Der Rand  $\mathcal{A}_1$  repräsentiert dabei eine äußere Einschließung derjenigen Anfangszustände, die für mindestens einen Parameter zulässig sind,  $\mathcal{I}_\forall$  und  $\mathcal{A}_\forall$  hingegen stellen innere bzw. äußere Intervalleinschließungen von Anfangszuständen dar, die gemeinsam für alle möglichen Parameterwerte zulässig sind. Dieselben Betrachtungen sind bei der Untersuchung der Erreichbarkeit von Zuständen ausgehend von vorgegebenen Anfangswerten durchzuführen. Für das einfache Beispiel eines linearen zeitdiskreten Systems

$$x_{1,k+1} = x_{1,k} + T \cdot x_{2,k}, \quad x_{2,k+1} = x_{2,k} + T \cdot u_k, \quad u_k \in [-1; 1], \quad T = 0.01, \quad k = 1, \dots, 100, \quad t_f = 100 \cdot T$$

mit beschränkter Stellgröße  $u_k$  sind in Abbildung 2 innere und äußere Intervalleinschließungen zulässiger Anfangszustände dargestellt. In analoger Weise lassen sich diese Betrachtungen auf nichtlineare Systeme übertragen.

Der Bestimmung von Intervalleinschließungen zulässiger Anfangs- bzw. in vorgegebener Zeit erreichbarer Endzustände liegt häufig ein Optimierungsproblem zugrunde. Die hier aufgezeigten intervallarithmetischen Ansätze stellen für die Optimierung dynamischer Systeme eine praktikable Ergänzung traditioneller Verfahren dar. Als Beispiel hierzu ist für obiges

System eine intervallarithmetische Approximation des Gütekriteriums  $J = \sum_{k=1}^{t_f/T} (x_{1,k}^2 + x_{2,k}^2)$  für alle Teilintervalle einer äußeren Einschließung von Zustandsintervallen in Abbildung 3 dargestellt.

## Literatur:

- [1] Kletting, M.; Rauh, A.; Aschemann, H.; Hofer, E. P.: *Consistency Tests in Guaranteed Simulation of Nonlinear Uncertain Systems with Application to an Activated Sludge Process*, SCAN 2004, Fukuoka, Japan.
- [2] Patsko, V. S.; Turova, V. L.: *Numerical Solutions to the Minimum-Time Problem for Linear Second-Order Conflict-Controlled Systems*, in: Proceedings of the 7th International Colloquium on Differential Equations, Plovdiv, Bulgaria, D. Bainov (Ed.), 1997, Utrecht, the Netherlands, pp. 327-338.
- [3] Rauh, A.; Kletting, M.; Aschemann, H.; Hofer, E. P.: *Designing Robust Controllers with Time-Domain Specifications Using Interval Arithmetics*, submitted to IFAC World Congress 2005, Prague, Czech Republic.
- [4] Shary, S. P.: *A New Technique in Systems Analysis under Interval Uncertainty and Ambiguity*, Reliable Computing 8, pp. 321-418, 2002.

# Berechnung der erreichbaren Regelgüte für unsichere lineare Systeme unter Berücksichtigung mehrerer Entwurfskriterien

*Dipl.-Ing. M. Völker\*, Prof. Dr.-Ing. S. Engell\**

*\*Lehrstuhl für Anlagensteuerungstechnik, Fachbereich Bio- und Chemieingenieurwesen, Universität Dortmund*

Eine wichtige Frage bei der Erstellung eines Automatisierungskonzeptes für verfahrenstechnische Prozesse ist, welche Messgrößen, von denen oft eine größere Anzahl verfügbar ist, als Regelgrößen dienen sollen und mit welchen Einflussgrößen diese geregelt werden sollen. Die Auswahl einer Menge von Regel- und Stellgrößen wird im Folgenden als Regelungsstrukturauswahl bezeichnet. Dieser Beitrag beschäftigt sich mit der quantitativen Analyse von Regelungsstrukturen anhand von dynamischen, linearen Modellen, die entweder durch experimentelle Systemidentifikation oder durch die Linearisierung rigoroser Prozessmodelle an bestimmten Arbeitspunkten bestimmt werden. Diese Modelle können das eigentliche technische System nur ungenau beschreiben und sind jeweils nur in bestimmten Arbeitsbereichen gültig.

Um die erreichbare Regelgüte unabhängig von der Wahl eines bestimmten Reglertyps (z. B. PI, PID, dezentral) zu bestimmen und damit den Einfluss der Regelungsstruktur zu ermitteln, bieten sich Verfahren zur Synthese optimaler Regler an. Um typische Anforderungen wie etwa die Minimierung des quadratischen Regelfehlers bei gleichzeitiger Einhaltung von Nebenbedingungen wie robuster Stabilität zu erfüllen, ist es notwendig, verschiedene mathematische Kriterien in der Optimierung miteinander zu kombinieren. Ein bekannter Ansatz, dieses Problem zu lösen, ist die Abbildung einzelner Kriterien auf lineare Matrix-Ungleichungen (LMIs). Um die Synthese von Ausgangsrückführreglern als konvexes Optimierungsproblem formulieren zu können, wird in diesem LMI-Ansatz zusätzlich gefordert, dass alle Matrix-Ungleichungen über dieselbe Lyapunov-Matrix parametrisiert werden [10]. Diese Vorgehensweise führt zu einem im allgemeinen schwer abschätzbaren Maß an Konservativität. Eine Möglichkeit zur Umgehung dieses Problems ist die Verwendung einer endlich dimensionalen Q-Parametrisierung [16], bei der allerdings eine hohe Reglerordnung resultiert. Dies stellt für die Beurteilung einer Regelungsstruktur jedoch kein Problem dar.

Regler niedriger Ordnung für die praktische Anwendung oder die weitere Bewertung mittels rigoroser Simulation an einem nichtlinearen Modell werden in einem zweiten Schritt mit Hilfe der Frequenzgangapproximation erzeugt [2, 3, 6]. Diese Technik hat sich in vielen praktischen Beispielen bewährt [4, 7, 8]. Der grundlegende Ansatz zur Regelgütemessung mittels Q-Parametrisierung ist u. a. in [1, 5, 9, 11, 16] beschrieben. Das Optimierungsproblem wird jedoch nicht im Zustandsraum sondern punktweise im Zeitbereich und im Frequenzbereich formuliert [13, 14, 15], um eine größere Flexibilität und eine geringere Konservativität zu erreichen. Dies erfordert eine Festlegung von Gitternetzpunkten, an denen einzelne Kriterien ausgewertet werden. Der Vorteil besteht darin, dass viele verschiedene Kriterien, wie z. B. Stellgrößenbeschränkungen, Beschränkungen des maximalen Überschwingens und beliebige Trajektorien der externen Eingänge gleichzeitig berücksichtigt werden können. Als neues Ergebnis wird vorgestellt, wie Robustheitskriterien im Rahmen des Verfahrens durch die Lösung einer Sequenz von konvexen quadratischen Optimierungsproblemen behandelt werden können [12]. Punktweise vorliegende Unsicherheitsbeschreibungen, wie z. B. aus der asymptotischen Theorie in der Systemidentifikation [17], können direkt verwendet werden.

Das entwickelte Verfahren wird auf das Beispiel einer halbkontinuierlich betriebenen Reaktions- und Trennkolonne im Technikumsmaßstab von ca. 9m Höhe und 100mm Durchmesser angewendet. Eine per Regelungsstrukturauswahl und rigoroser Simulation ermittelte 2x2 Regelungsstruktur ermöglicht die Einhaltung eines effizienten Arbeitspunktes. Für den Entwurf eines voll besetzten linearen Mehrgrößenreglers wird ein experimentell identifiziertes lineares Modell und eine durch Nichtlinearität, Zeitvarianz und Identifikationsungenauigkeit begründete Unsicherheitsbeschreibung verwendet. Es zeigt sich, dass der punktuelle Ansatz, gerade im Hinblick auf die zeitveränderlichen Eigenschaften des Prozesses, besonders geeignet ist, um eine Regleroptimierung im Hinblick auf die quadratische Regelabweichung unter Einhaltung von Stellgrößenbeschränkungen und robuster Stabilität durchzuführen. Es gelingt, bei Einhaltung der Nebenbedingungen und nur leichter Verschlechterung der Entkopplungseigenschaften, den hochdimensionalen Optimalregler auf einen vollbesetzten PI-Regler zu reduzieren. Experimentelle Ergebnisse für verschiedene Störgrößen- und Sollwertzenarien demonstrieren die Funktionstüchtigkeit des reduzierten linearen Mehrgrößenreglers an der realen Anlage.

## Literatur

- [1] S. P. Boyd and C. Barrat. *Linear Controller Design: Limits of Performance*. Prentice Hall, Englewood Cliffs, 1991.
- [2] S. Engell. Compensator Design by Frequency-weighted Approximation. *IEE International Conference on Control*, Seiten 253–258, 1988.
- [3] S. Engell und R. Müller. Controller Design by Frequency-weighted Approximation: the Multivariable Case. *IEE International Conference CONTROL-91*, IEE Publication, Seiten 581–586, Edinburgh, 1991.
- [4] S. Engell und S. Pegel. Design of PID Controllers via Frequency Response Approximation. In *IFAC Workshop on Digital Control*, Seiten 65–72, Terrassa, Spanien, 2000.
- [5] H. A. Hindi, B. Hassibi, und S. P. Boyd. Multiobjective  $H_2/H_\infty$ -Optimal Control via Finite Dimensional Q-Parametrization and Linear Matrix Inequalities. In *American Control Conference*, Vol. 5, Seiten 3244–3249, 1998.
- [6] R. Müller. *Entwurf von Mehrgrößenreglern durch Frequenzgang-Approximation*. Dr.-Ing. Dissertation, Universität Dortmund, Dortmund, 1996.
- [7] S. Pegel. *Integration von Regelungsstrukturauswahl und Reglerentwurf*. Dr.-Ing. Dissertation, Universität Dortmund. Erscheint in: Shaker Verlag, Aachen, 2004.
- [8] S. Pegel und S. Engell. Computation of Achievable Performance of a Heat Integrated Distillation Column. In *IFAC Conference on Control Systems Design*, Seiten 33–38, 2000.
- [9] C. W. Scherer. Multiobjective  $H_2/H_\infty$  Control. *IEEE Transactions on Automatic Control*, Seiten 1054–1062, 1995.
- [10] C. W. Scherer, P. Gahinet, und M. Chilali. Multiobjective Output-Feedback Control via LMI Optimization. *IEEE Transactions on Automatic Control*, Seiten 896–911, 1997.
- [11] M. Sznaier, H. Rotstein, J. Bu, und A. Sideris. An Exact Solution to Continuous-Time Mixed  $H_2/H_\infty$  Control Problems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, Seiten 2095–2101, 2000.
- [12] M. Völker und S. Engell. Quantitative I/O-Controllability Assessment for Uncertain Plants. *IEEE Conference on Computer Aided Control Systems Design*, Seiten 13–18, Taipei, Taiwan 2004.
- [13] K. Webers. *Bestimmung der erreichbaren Regelgüte durch konvexe Optimierung*. Dr.-Ing. Dissertation, Universität Dortmund, Dortmund, 1997.
- [14] K. Webers. Controller Design via LMI-based Stability Test and Convex Optimization. In *2nd IFAC Symposium on Robust Control Design*, Seiten 223–228, 1997.
- [15] K. Webers und S. Engell. Comparison of Multivariable and Decentralised Control for a CSTR by Convex Optimisation. In *13th IFAC World Congress*, Seiten 391–396, 1996.
- [16] D. Youla, H. Jabr, und J. Bongiorno. Modern Wiener-Hopf Design of Optimal Controllers - Part II : The Multivariable Case. *IEEE Transactions on Automatic Control*, Seiten 319–338, 1976.
- [17] Y. C. Zhu. Black-box Identification of MIMO Transfer Functions: Asymptotic Properties of Prediction Error Models. *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing*, Seiten 357–373, 1989.

# Entwicklung von Regel- und Steuerstrategien für Elektroenergiesysteme mittels Bifurkationsanalyse unter Berücksichtigung der Lastdynamik

Dipl.-Ing. Ingo Winzenick \*

\* Professur für Regelungstechnik  
Univ.-Prof. Dr.-Ing. J. Horn

Helmut-Schmidt-Universität  
Universität der Bundeswehr Hamburg  
Holstenhofweg 85  
D-22043 Hamburg

Tel. +49 40 6541 3393  
Fax +49 40 6541 2822  
Email [wnk@hsu-hh.de](mailto:wnk@hsu-hh.de)

Schlüsselwörter: Elektroenergiesysteme, Bifurkationsanalysen, FACTS, Lastdynamik

Elektroenergiesysteme bilden komplexe, nichtlineare dynamische Systeme. Die weltweiten Ereignisse der jüngeren Vergangenheit in USA, Schweden, Italien, Luxemburg/Deutschland zeigen eindrucksvoll die Konsequenzen von Netzstörungen und -ausfällen, sog. *Blackouts*. Sie illustrieren, neben dem Stellenwert einer gesicherten und zuverlässigen Versorgung mit elektrischer Energie, aber auch Grenzen dieses komplexen technischen Systems [4].

Die Deregulierung und Liberalisierung der Energiemärkte, der ökonomische Zwang zum Abbau sogenannter Überkapazitäten, der Einbau regenerativer Erzeuger im großen Stil und die daraus resultierenden wachsenden Leistungstransporte stellen die Systeme vor Herausforderungen, für die diese nicht konzipiert worden sind. Eine Ertüchtigung schwacher Netzbereiche durch Aus- oder Umbaumaßnahmen ist nicht zuletzt aus ökologischen Gründen nur schwer durchsetzbar und zudem aufgrund der Genehmigungsverfahren sehr zeit- aufwendig.

In den großen, nichtlinearen Systemen der Energieversorgung wurden bereits in der Vergangenheit Ereignisse beobachtet, die mit klassischen Analysemethoden nicht oder nur sehr unzureichend beschrieben werden konnten [1]. Bifurkationsanalysen bieten hier die Möglichkeit, nichtlineare dynamische Ereignisse in Abhängigkeit interessierender Parameter untersuchen und klassifizieren zu können. Dabei beschreibt eine Bifurkation eine qualitative Änderung des Systemverhaltens, wenn ein kritischer Parameterwert erreicht wird [2,3].

Auf dieser Basis ergibt sich die Möglichkeit, Schwingungs- und Kollapsphänomene zu identifizieren und zu klassifizieren. Charakteristische und mögliche kritische Parameter können gezielt bestimmt und untersucht werden. Darüber hinaus können Bereiche unterschiedlicher Dynamik voneinander abgegrenzt werden.

Mit Hilfe leistungselektronischer Geräte, sogenannter flexibler Wechselstromübertragungs- geräte (Flexible AC Transmission System, FACTS) ist es möglich, Systemparameter aktiv zu beeinflussen. Der Einsatz von Bifurkationsanalysen kann zur Entwicklung von geeigneten



Regel- und Steuerstrategien für die veränderten Anforderungen herangezogen werden, um Arbeitsbereiche mit vorgegebenen dynamischen Eigenschaften zu erhalten.

Dieser Beitrag stellt die Möglichkeiten der Bifurkationsanalyse von Elektroenergiesystemen dar. Es werden zunächst kritische Arbeitsbereiche bestimmt und Abhängigkeiten der Arbeitsbereiche von unterschiedlichen Lastdynamiken identifiziert. In einem nächsten Schritt kommen ausgewählte FACTS-Geräte zum Einsatz, um diese Bereiche und deren Abhängigkeiten zu beeinflussen. Ziel ist die Erweiterung von Operationsgebieten wie auch die Vermeidung *kritischer* Punkte, die mit Kollaps- bzw. Schwingungsphänomenen in Verbindung stehen.

Auf der Basis der erlangten Ergebnisse werden Regel- und Steuerstrategien für den Einsatz von FACTS-Geräten entwickelt, so dass auch bei komplizierten Vorgängen im Netz die Systemdynamik derart beeinflusst wird, dass die konventionellen Regelungs- und Steuerungskonzepte weiterhin voll zum Tragen kommen können.

#### Literatur:

- [1] Fette, M.: Dynamik nichtlinearer Elektroenergiesysteme. Habilitationsschrift, Universität Paderborn, 2001
- [2] Kuznetsov, Y. A.: Elements of Applied Bifurcation Theory. Springer New York, 1995
- [3] Seydel, R., From Equilibrium to Chaos -A Practical Bifurcation and Stability Analysis. Elsevier Science Publishing Inc., 1988
- [4] VDE-Analyse: Stromversorgungsstörungen. 2003

# Optimales Speichermanagement von Wärmeversorgungsanlagen

Dipl.-Ing. Christian Hoffmann

Prof. Dr.-Ing. habil. Horst Puta

Fachgebiet Dynamik und Simulation  
ökologischer Systeme

Technische Universität Ilmenau

Postfach 100565, 98684 Ilmenau

Tel.: +49/03677/69-1418

Fax.: +49/03677/69-1415

Email: Christian.Hoffmann@systemtechnik.tu-ilmenau.de

Horst.Puta@tu-ilmenau.de

Die Nutzung von regenerativen Energien zur Deckung des Wärmebedarfes von Gebäuden ist auch zukünftig von entscheidender Bedeutung, wie die jüngsten Entwicklungen auf dem Energiesektor deutlich machen. Hierbei ist die Steuerung des Zusammenwirkens von regenerativen und fossilen Energieträgern für die Wärmeversorgung von hohem wirtschaftlichen Interesse.

Das Ziel besteht darin, das Angebot der zur Verfügung stehenden regenerativen Energien voll auszuschöpfen und gleichzeitig den Bedarf an fossilen Energieträgern zu minimieren. Zur Erreichung dieses Zieles werden Konzepte der Optimalsteuerung zur Berechnung der optimalen Steuertrajektorien hinsichtlich eines festen Zeithorizonts mit festen Anfangszuständen angewandt. Insbesondere der Einsatz der repetierenden Optimierung mit aktualisierten gemessenen Anfangszuständen wirkt sich vorteilhaft auf die Effizienz der Wärmeversorgungsanlage aus. Die Berechnung der Sollzustands- und Sollsteuertrajektorien erfolgt mit Hilfe von Prozessmodellen unter Einbeziehung von prädiktierten Störgrößenverläufen. Als Störgrößenverläufe treten bei der Bewirtschaftung von Wärmeversorgungsanlagen auf der Basis von regenerativen Energien verschiedene Klimagrößenverläufe auf. Die Klimagrößen, die für eine Bewirtschaftung relevant sind, sind die Außentemperatur und die solare Einstrahlung. Besonders bei der Prädiktion der Einstrahlung kann es zu Problemen mit der Prädiktionsgenauigkeit durch stochastisch auftretende Verschattung kommen. Für die Modellierung und die Simulation verschiedener Typen von Wärmeversorgungsanlagen, wurde die Modellbibliothek RECOMB [1] entwickelt. Sie basiert auf der Simulationsumgebung Dymola/Modelica [2]. Die Simulationsumgebung ermöglicht eine objektorientierte Programmierung der Anlagenkomponenten, insbesondere die Nutzung der Prinzipien der Vererbung und Aggregation. Des Weiteren bietet die Simulationsumgebung Dymola/Modelica die Möglichkeit der grafischen Programmierung der Wärmeversorgungsanlagen. Die Bibliothek unterteilt sich in vier Teilbibliotheken. Die Teilbibliotheken sind:

- HESYS - Hinterlegung der verschiedenen Anlagenkomponenten
- Predict - Verfahren zur Vorhersage von Klimagrößen
- Weather - Aufbereitung von Metconormklimadaten
- Building - Hinterlegung der für die Simulation von Gebäuden notwendigen Komponenten

Das somit entstandene Simulationsmodell wird für die Berechnung der Optimalsteuerung verwendet. Zur Berechnung der Optimalsteuerung wird die Software HQP [3] verwendet. Hierbei wird ein zeitdiskretes Optimalsteuerungsproblem numerisch mit dem Verfahren der sequentiellen quadratischen Programmierung gelöst, wobei in jeder Iteration eine linear-quadratische Approximation des nichtlinearen Problems zur Bestimmung der Suchrichtung verwendet wird.

Als einfachstes Anlagenbeispiel für die Optimierung der Steuerung wurde eine Solaranlage modelliert, die aus einem Kollektorfeld, einem Warmwasserspeicher mit Nachheizung und einer Umwälzpumpe besteht. Es werden zwei Steuertrajektorien berechnet, die die Umwälzpumpe und Nachheizung so betreiben, dass die Anlage immer das Maximum an der zur Verfügung stehenden regenerativen Energie in Wärme umwandeln kann. Als Optimierungskriterium wurde der maximale kumulierte Ertrag des Kollektorfeldes unter Einhaltung von Gleichungsbeschränkungen und Ungleichungsbeschränkungen hinsichtlich der Speicher- und der Kollektortemperatur gewählt. Die Einhaltung der Beschränkungen dient der Versorgungssicherheit mit Warmwasser. Im Vergleich zu herkömmlichen Solarreglern konnte eine simulativ ermittelte Effizienzsteigerung von ca. 10 Prozent erzielt werden. Das praktische Anwendungsziel ist ein Bewirtschaftungsmodul für verschiedene Wärmeversorgungsanlagen, das eine Effizienzsteigerung und komfortablere Bedienung der Anlage ermöglicht.

## Literatur

- [1] Chr. Hoffmann, H. Puta. *Objektorientierte Simulation von Wärmeversorgungssystemen auf der Basis regenerativer Energien mit Modelica*, VDI-Berichte, Nr.1734, S.107-110, 2002
- [2] Dynasim. *Dymola User Manual*. Dynasim AB Lund, 2004
- [3] R. Franke. *Integrierte dynamische Modellierung und Optimierung von Systemen mit saisonaler Wärmespeicherung.*, Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 6, Nr.394, 1998

# Kollaborative virtuelle Umgebung für Online-Praktika und Seminare

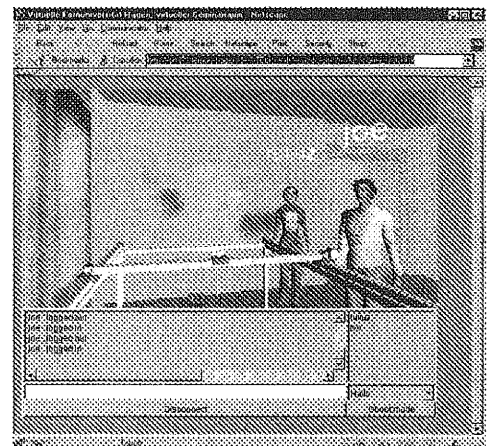
Andreas Bischoff

Prozesssteuerung und Regelungstechnik  
FernUniversität in Hagen  
Universitätsstraße 27, D-58097 Hagen  
Tel.: +49 (2331) 987 - 1100  
+49 (2331) 987 - 354  
Andreas.bischoff@fernuni-hagen.de

**Schlüsselwörter:** Virtual Reality, VRML, Blended Learning, Collaborative Virtual Environments, CSCL

Internet-Technologien und neue Lehrmedien verändern den traditionellen Erwerb von Wissen und Information nachhaltig. Dies macht zukunftsorientierte Konzepte in Hochschulen erforderlich, um neue Lern- und Qualifikationspotenziale herauszubilden. Speziell für die regelungstechnische Ausbildung findet man neben umfangreichen elektronischen Dokumenten unterstützende Computersimulationen und „Virtual Reality“-Visualisierungen, inzwischen auch virtuelle Praktika, also Internet-gestützte Zugriffsmöglichkeiten auf die realen technischen Systeme im Labor. Auch Seminarveranstaltungen über das Internet sind durch die Anwendung kollaborativer virtueller Umgebungen bandbreitenschonend zu realisieren.

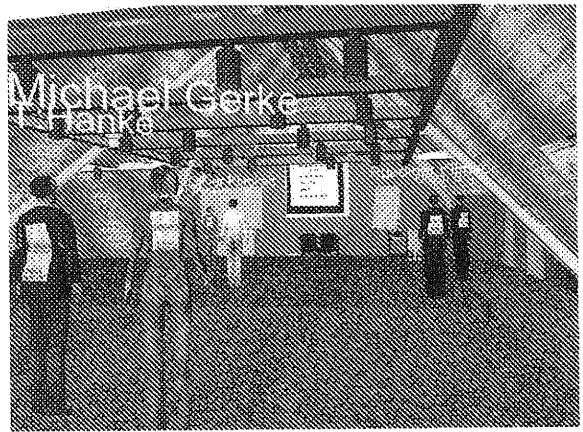
Die Ausbildung von Ingenieuren erfordert den Umgang mit realen Aufbauten. Simulationen können in der Regelungstechnik den Umgang mit realen Systemen, welche realen Störungen ausgesetzt sind, grundsätzlich nicht ersetzen. Der Umgang mit Hardware in Praktikumsversuchen ist ebenso wie Seminarvorträge bei einer Online-Veranstaltungen nur mit synchronen Kommunikationsverfahren zu realisieren. Ein bandbreitenschonendes Verfahren für die synchrone Kommunikation von Arbeitsgruppen lässt sich mit Hilfe von Internet-basierten Multiuser Virtual Reality (MUVR) Umgebungen realisieren. Ein solche auf Standards wie Java und VRML basierende Multiuser Virtual Reality Umgebung wurde an Bedürfnisse der Online-Lehre angepasst.



*Abbildung 1: Multiuser Virtual Reality Umgebung im Online Praktikum*

Am Lehrgebiet Prozesssteuerung und Regelungstechnik der FernUniversität in Hagen werden MUVR unterstützte Online-Praktikumsversuche entwickelt und eingesetzt [1]. Im Rahmen des BMBF-Verbundprojektes LearNet sind beispielsweise die fernbedienbaren automatisierungstechnischen Laborexperimente Brückenkrane (Zustandsregler, Fuzzy-Regler) und inverses Pendel (Fuzzy-Regler, Zustandsregler, kaskadierter Regler) entstanden [2].

Im WS 2003/2004 ist erstmals eine MUVR-Umgebung unterstützt durch ein universelles Whiteboard und einer Audio-Konferenzlösung erfolgreich für eine Online-Seminarveranstaltung eingesetzt worden [3]. Auch Benutzer mit einem analogen Modemzugang können solche Umgebungen ohne Einschränkungen nutzen. Die Multiuser Virtual Reality Umgebung kann ebenfalls auf mobilen Endgeräten wie beispielsweise aktuellen PDA-Computern genutzt werden [4].



*Abbildung 2: Multiuser Virtual Reality Umgebung bei einer Online Seminarveranstaltung*

### **Literatur:**

- [1] H. Hoyer, A. Jochheim, C. Röhrig and A. Bischoff: A Multiuser Virtual-Reality Environment for a Teleoperated Laboratory, IEEE Transactions on Education, Vol. 47(1), 121-126, 2/2004
- [2] H. Hoyer, M. Gerke, I. Masar, A. Bischoff and C. Röhrig: A virtual laboratory for an inverted pendulum and crane control, 1st IFAC symposium on telematics applications in automation and robotics, Helsinki, Finland, Juni 2004
- [3] A. Bischoff: Web based collaborative system for workshop-like events., Proc. of IADIS, Intern. Conference on Web Based Communities, Lisboa, Portugal, März 2004
- [4] A. Bischoff: Multiuser Mixed Reality Umgebung für Lehre, Community und ortsbezogene Anwendungen., 1. GI/KuVS Fachgespräch ortsbezogene Anwendungen und Dienste. Hagen, Juni 2004

# Typerkennung technischer Objekte aus Einzelbildern mit adaptiven, dreidimensionalen Modellen

Astrid Laubenheimer

Fraunhofer Institut für Informations- und Datenverarbeitung IITB  
Fraunhoferstraße 1  
76131 Karlsruhe  
Tel. 0721 / 6091 - 411  
Fax 0721 / 6091 - 233  
laubenheimer@iitb.fraunhofer.de

**Schlüsselwörter:** Luftbildauswertung, Bildverarbeitung, rekursive Parameterschätzung, Segmentierung, dreidimensionale geometrische Modellierung, Typerkennung

Im Bereich der Luftbildauswertung sind Verfahren zur automatischen Bildanalyse mit Außenaufnahmen konfrontiert, die bezüglich der Beleuchtungssituation, aber auch bezüglich der abgebildeten Szenerie, starken Schwankungen unterworfen sein können. Die Tatsache, dass diese Schwankungen nicht kontrollierbar sind und nur bedingt durch eine automatische Aufbereitung der Bilddaten normalisierbar sind, macht die Bereitstellung von Szenenwissen notwendig.



Abbildung 1 beispielsweise zeigt eine Aufnahme einer Boeing 747, die sich an der rechten Tragfläche und am rechten Höhenruder nur geringfügig vom Hintergrund abhebt. In diesem speziellen Fall kann das erforderliche Szenenwissen in Form der symmetrischen Konstruktion in das System eingebracht werden. Wesentlich allgemeiner und damit übertragbar auf andere Objektklassen lässt sich das Szenenwissen jedoch in Form von dreidimensionalen Modellen der abgebildeten Objekte in das System einbringen.

*Abbildung 1: Eine Boeing 747 auf dem Frankfurter Flughafen*

Bei der Bewertung der Praxistauglichkeit von Verfahren, die auf Basis von dreidimensionalen Modellen operieren, muss allerdings der Aufwand zur Bereitstellung geeigneter Modelle berücksichtigt werden. Für die automatische Typerkennung von Verkehrsflugzeugen beispielsweise muss dem Erkennungssystem für jede Variante aller in Frage kommenden Flugzeugtypen ein Modell bereitgestellt werden. Diese Modelle müssen darüber hinaus in einer trennungswirksamen geometrischen Genauigkeit vorliegen. In der Praxis sind diese Anforderungen nach Vollständigkeit und Genauigkeit an die Modelldatenbasis oft nur unter erheblichem zeitlichen und finanziellen Aufwand erfüllbar.

Das in diesem Beitrag vorgestellte Verfahren umgeht die aufwändige Bereitstellung von Modellen für alle in Frage kommenden Objekte durch die automatische Konstruktion deformierbarer, dreidimensionaler Modelle aus handelsüblichen und preiswerten CAD-Modellen. Die deformierbaren Modelle sind generisch und adaptieren sich automatisch durch rekursive Parameterschätzung an Einzelbilder, wie zum Beispiel Luftbilder oder digitalisierte

Schattenrisse. Diese auf Basis von Bildkantensegmenten realisierte Anpassung der deformierbaren Modelle an Bilddaten liefert jeweils eine dreidimensionale Rekonstruktion des abgebildeten Objekts. Es wird gezeigt, dass durch die Elastizität unvollständige Datenbasen und geometrische Ungenauigkeiten kompensiert werden können.

Darüber hinaus wird demonstriert, dass sich aus den dreidimensionalen Rekonstruktionen der abgebildeten Objekte trennungswirksame Merkmale extrahieren lassen und der Abgleich dieser Merkmale mit einer zuvor automatisch angelegten Datenbank eine leistungsfähige Typerkennung darstellt.

### **Literatur:**

- [1] A. Laubenheimer und N. Link. Towards Adaptive Models for Classification of Technical Objects. In: *Proceedings Vision Modeling and Visualization*, S. 319 – 327, München, 2003.
- [2] A. Laubenheimer. *Automatische Registrierung adaptiver Modelle zur Typerkennung technischer Objekte*. Dissertation. Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik der Universität Karlsruhe (TH). Universitätsverlag Karlsruhe, 2004.

# Flexible Ferndiagnose eingebetteter Systeme

Dipl.-Ing. Jan Traumüller  
Institut für Automatisierungs- und Softwaretechnik  
Universität Stuttgart  
Pfaffenwaldring 47, 70550 Stuttgart  
Tel.: +49 711 685 7319  
Fax: +49 711 685 7302  
e-mail: traumuller@ias.uni-stuttgart.de

**Schlüsselwörter:** Internet, Ferndiagnose, verteiltes System, Funktionsintegration, mobiler Code

Eine computergestützte Diagnose gehört heute bereits für viele technische Systeme, sowohl im Produktbereich als auch im Anlagenbereich, zum Standard. Es existiert eine große Bandbreite an Diagnoseverfahren, angefangen bei signalbasierten Verfahren mit einfacher Signalüberwachung, über statistische Auswertungen von Signalverläufen bis hin zu modellbasierten Verfahren mit Beobachtern oder adaptiven Modellen [Iser94] [LaGö99] [FWL03]. Die Durchführung und Auswertung der Diagnose obliegt dabei entsprechend geschulten Spezialisten. Ein Weg teure Spezialisten effizienter einsetzen zu können, ist der Einsatz der Ferndiagnose von technischen Systemen. Während im Anlagenbereich diese Art der Diagnosedurchführung bereits weit verbreitet ist, steht sie im Produktbereich mit seiner Vielzahl an unterschiedlichen eingebetteten Systemen noch am Anfang.

Bei der Realisierung von Ferndiagnoselösungen für eingebettete Systeme steht man vor einer Vielzahl von Herausforderungen. Auf der einen Seite verfügen eingebettete Systeme nur über beschränkte Ressourcen wie Rechenleistung und Speicherkapazität und unterliegen dabei gleichzeitig einem hohen Preisdruck. Auf der anderen Seite sind heutige Lösungen aus dem Anlagenbereich sehr ressourcenintensiv und lassen sich damit nicht mit oben genannten Randbedingungen in Einklang bringen. Für eine ausgedehnte Anlage fallen zusätzliche Kosten und Aufwand, beispielsweise für einen separaten PC zum Signal-Tracing, im Vergleich zum Nutzen nicht ins Gewicht. Ganz anders stellt sich die Situation bei einfachen Produkten, wie beispielsweise Waschmaschinen, dar. Hier sind Kosten dieser Größenordnung nicht tragbar. Auch ist der Einsatz vorhandener computergestützter "Vor Ort"-Diagnoselösungen nicht ohne Veränderungen möglich, da sich aufgrund der räumlichen Trennung die bestehende Softwaregestaltung und die Aufteilung zwischen Prüfling und Diagnosetester nicht aufrechterhalten lässt. Verschärft wird die Situation durch eine über Produktgenerationen wachsende Anzahl an Diagnosefunktionen. Ferndiagnoselösungen für eingebettete Systeme befinden sich also immer im Spannungsfeld der Ressourceneffizienz auf der einen bei größtmöglicher Leistungsfähigkeit und Erweiterbarkeit auf der anderen Seite. Die Herausforderung liegt nun in der Auflösung dieses Problems durch eine effizientere Ausnutzung der vorhandenen Systeme.



Ein Lösungsansatz dazu ist die Realisierung eines flexiblen Ferndiagnosesystems. Flexibel bezeichnet dabei die Eigenschaft des Systems, an die aktuell vorliegenden Bedingungen angepasst werden zu können. Macht man sich einige Eigenschaften der Diagnose zu Nutzen, wie z.B. dass Diagnose an sich nur temporär und nicht jegliche Diagnosefunktionalität gleichzeitig benötigt wird, erhält Flexibilität nicht nur die Bedeutung von Erweiterung sondern auch von Austausch von Diagnosefunktionen. Die Fähigkeit einer Anpassung im oben erwähnten Sinne ermöglicht es, die Komplexität von und die Menge an Diagnosefunktionen erweitern zu können, ohne zwangsläufig auf leistungsfähigere eingebettete Systeme angewiesen zu sein.

Gegenstand des Beitrags ist die ausführliche Darstellung eines solchen flexiblen Ferndiagnosesystems [Trau04]. Technische Basis dafür ist ein verteiltes System, bei dem nur der minimal notwendige Diagnosefunktionsumfang im Prüfling selbst gehalten wird, während der Rest und die umfangreiche Auswertelogik auf einem Diagnoseserver, z.B. im Internet, entfernt lokalisiert ist. Über den Kommunikationskanal für den Fernzugriff erfolgt sowohl eine Diagnosedurchführung als auch eine funktionale Anpassung, d.h. die Verteilung und Lokalisierung von Diagnosefunktionalität zur Laufzeit. Das System bezieht seine Flexibilität somit aus der Fähigkeit einer dynamischen Diagnosefunktionsintegration sowohl auf Prüflings- als auch auf Serverseite. Im Beitrag werden die prinzipielle Funktionsweise und der Eignungsnachweis für ressourcenschwache eingebettete Systeme am Beispiel eines handelsüblichen Waschtrockners vorgestellt.

#### **Literatur:**

- [Iser94] Isermann, R. (Hrsg.): *Überwachung und Fehlerdiagnose: moderne Methoden und ihre Anwendungen bei technischen Systemen*. Düsseldorf: VDI-Verlag 1994.
- [LaGö99] Lauber, R.; Göhner, P.: *Prozessautomatisierung 2*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 1999.
- [FWL03] Förster, D.; Weber, R.; Lunze, J.: *Diagnose eines Diesel-Einspritzsystems mit ereignisdiskreten Modellen*. In: atp – Automatisierungstechnische Praxis 45 (2003) H. 2
- [Trau04] Traumüller, J.: *Flexible Internet based Diagnostics of Embedded Systems*. In: Proceedings of The 2004 International Conference on Embedded Systems and Applications - ESA 2004, Las Vegas, Nevada, USA, 2004

# Trainingsalgorithmus für Neuro-Fuzzy Netzwerke

## Kurzfassung

DI. N. Keuth

Institut f. Mechanik u. Mechatronik\ A5  
 TU Wien  
 A-1040, Gußhausstrasse 27-29  
 +43-01-58801-32815  
 +43-01-58801-32899  
[keuth@impa.tuwien.ac.at](mailto:keuth@impa.tuwien.ac.at)

**Schlüsselwörter:** Neuro-Fuzzy Netzwerke, Trainingsalgorithmus, Statistik für Neuro-Fuzzy Netzwerke

In dieser Arbeit wurde ein Trainingsalgorithmus für Neuro-Fuzzy Netzwerke entwickelt. Der hier entwickelte Algorithmus basiert auf Takagi-Sugeno Neuro Fuzzy Netzwerken, lokalen Modell Netzwerken, Neuro-Fuzzy Netzwerken wie sie in den folgenden Arbeiten beschrieben sind: [1,2,3,4,5,6,7].

Das Modell wird aus mehreren lokalen quadratischen Modellen zusammen gesetzt nach der folgenden Formel:

$$\hat{y}(u) = \sum_{i=1}^m \Phi_i(u) \hat{y}_i(u, \theta_i)$$

Dabei ist  $\hat{y}_i$  ist der Ausgang aus dem i. lokalen Modell, welcher mit der Gültigkeitsfunktion  $\Phi_i$  gewichtet wird. Während des Trainings müssen also zwei Teile bestimmt werden:

1.) Die Gültigkeitsfunktion:

$$\Phi_i(u) = \exp\left(-\left[(u - z_i)^T A_i (u - z_i)\right]^{n_i}\right) \prod_{k=i+1}^m (1 - \Phi_k(u))$$

2.) die Parameter des lokalen Modells

Der Algorithmus besteht aus zwei Schleifen: einer äußeren Schleife, welche die Größe und Ausrichtung der Gültigkeitsfunktionen bestimmt, und einer inneren Schleife, in welcher die Parameter der lokalen Modelle geschätzt werden.

Die Gültigkeitsfunktion wird an jene Stelle im Eingangsraum gesetzt, an der der größte aktuelle Modellierungsfehler auftritt. Beim Start des Trainings wird entweder der Punkt

mit dem maximalen Funktionswerte gewählt, oder ein erstes globales Modell gebildet. Im nächsten Schritt wird die Größe der Zugehörigkeitsfunktion bestimmt. Dazu werden, ausgehend vom Punkt mit dem maximalen Fehler, jene benachbarten Punkte ausgewählt, welche am besten zur Modellstruktur des lokalen Modells passen. Punkte werden solange zum neuen Modell hinzugefügt bis n% der Datenpunkte außerhalb des Konfidenzintervalls liegen. Die Parameter des Modells werden über den RLS-Algorithmus angepasst. Ein Beispiel dafür ist in *Abbildung 2* und

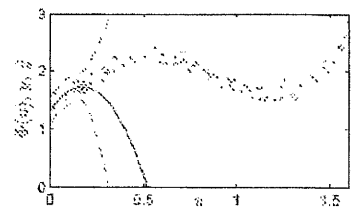


Abbildung 2: Erstes Modell mit 97% Konfidenzintervall

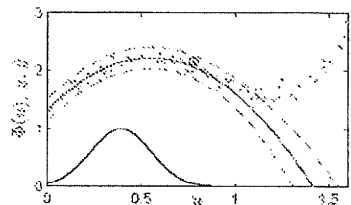


Abbildung 1: Fertiges Modell mit 97% Konfidenzintervall

**Abbildung 1** zu sehen. Durch die Lage der ausgewählten Punkte im Eingangsraum, wird die Ausrichtung der Gültigkeitsfunktion des lokalen Modells bestimmt.

Die neue Gültigkeitsfunktion wird von den Gültigkeitsfunktionen der bisher bestimmten Modelle abgezogen. Ein Beispiel dazu kann in **Abbildung 3** betrachtet werden.

Nachdem die Zugehörigkeitsfunktion des neuen lokalen Modells bestimmt wurde, werden die Parameter aller lokalen Modelle neu geschätzt.

Es werden solange neue Zentren gesetzt bis der Fehler unter eine gewünschte Schranke fällt oder keine weitere Verbesserung erzielt werden kann.

Als Performance Kriterien werden bei diesem Algorithmus folgende zwei Kennwerte verwendet:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad \text{und} \quad R_{pred}^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_{i-1})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}$$

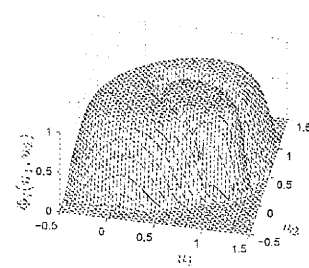
Zum Abschluss der Modellierung werden noch lokale Modelle, welche nicht mehr signifikant zum Gesamtmodell beitragen, vom Gesamtmodell entfernt. Außerdem werden für das globale

Modell Konfidenz- und Prediktionsintervalle berechnet. In **Abbildung 4** ist ein akademisches Beispiel abgebildet, um die Leistungsfähigkeit des Trainingsalgorithmus zu präsentieren. Der Algorithmus wurde auf statische und dynamische Identifikationsprobleme mit Erfolg angewendet. Außerdem wurde die detaillierte statistische Selbsteinschätzung des Modells dazu

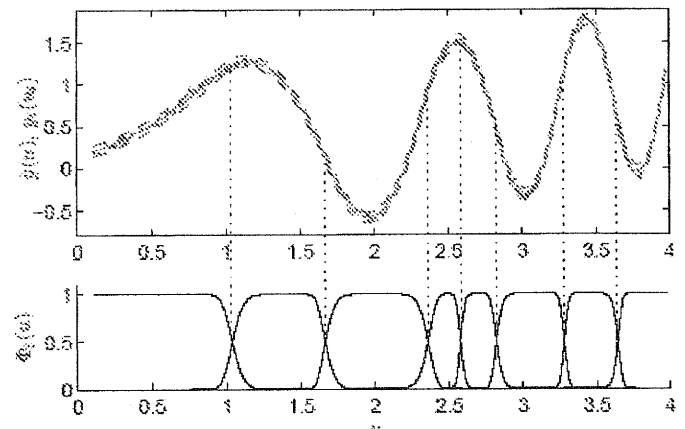
verwendet um ein Leistungsfähiges Fehlerdiagnosesystem aufzubauen.

## Literatur:

- [1] Hunt, K. (1992). Induction of decision trees for rule-based modelling and control. In *Proceedings of the 1992 IEEE International Symposium on Intelligent Control*, pp. 306 - 311. IEEE.
- [2] Foss, B. A. and T. A. Johansen (1993). On local and fuzzy modeling. In *In Proceedings of the 3rd Int. Conf. Industrial Fuzzy Control and Intelligent Systems*, pp. 80 - 87.
- [3] Johansen, T. and B. Foss (1995). Identification of non-linear system structure and parameters using regime decomposition. *Automatica* 31 (2), 321 - 326.
- [4] Murray-Smith, R. and T. Johansen (1995). Local learning in local model networks. In *Fourth International Conference on Artificial Neural Networks*, pp. 40 - 46.
- [5] Babuska, R. and H. Verbruggen (1996). An overview of fuzzy modeling for control. *control Engineering Practice* 4 (11), 1593 - 1606.
- [6] Ernst, S. (1998). Hinging hyperplane trees for approximation and identification. In *Proceedings of the 37th IEEE Conference on Decision & Control 1998*, Volume 2, pp. 1266 - 1271. IEEE.
- [7] Nelles, O. (2002). *Nonlinear System Identification* (1st ed.). Springer Verlag.



**Abbildung 3:** Zusammensetzung zweier Gültigkeitsfunktionen



# PI-Beobachter zur Diagnose und Regelung elastischer Strukturen

Idriz Krajin \*

\* Professur für Steuerung, Regelung und Systemdynamik  
Universität Duisburg-Essen  
Lotharstr. 1, 47057 Duisburg  
Tel. 0203 3793023  
Fax 0203 3793027  
Email: krajin@uni-duisburg.de

Dirk Söffker \*\*

\*\* Professur für Steuerung, Regelung und Systemdynamik  
Universität Duisburg-Essen  
Lotharstr. 1, 47057 Duisburg  
Tel. 0203 3793429  
Fax 0203 3793027  
Email: soeffker@uni-duisburg.de

Schlüsselwörter: Proportional-Integral-Beobachter, Kontaktkraftschätzung, Schwingungsdämpfung, Adaptronik

Der Trend zur Gewichtsreduktion bei maschinenbaulichen Systemen beinhaltet neben der Gewichtsreduktion eine Erhöhung des Raumangebotes und der technischen Funktionalität. Dies wird oft mit einer Zunahme elastischer Eigenschaften erkaufte. Die Realisierung multifunktionaler Werkstoffverbundsysteme z. B. in Form adaptronischer Systeme ist ein Weg zur Realisierung leichter und schwingungsarmer Strukturen. Eine umfangreiche Übersicht über die aktuelle Entwicklung adaptronischer Strukturen ist in [1] gegeben.

In diesem Beitrag wird der Proportional-Integral-Beobachter (PI-Beobachter) zur Diagnose und Regelung elastischer (adaptronischer) Strukturen eingesetzt [2, 3]. Der Schwerpunkt liegt hierbei in der Beobachtung unbekannter Eingänge, die von außen auf eine elastische Struktur wirken. Das Verhalten der elastischen Struktur wird hierbei durch

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu + Nn(t) + Hh(t), \quad y(t) = Cx(t) + d(t)$$

beschrieben. Dabei stellt  $n(t)$  unbekannte Eingänge in Form von Kräften und/oder Momenten,  $h(t)$  Modellungenauigkeiten und  $d(t)$  Messungenauigkeiten wie z. B. Messrauschen dar. Die Matrizen  $N$  und  $H$  beschreiben die Eingriffsorte und werden als bekannt vorausgesetzt. Mit Hilfe des PI-Beobachters

$$\dot{\hat{x}}(t) = Ax(t) + Bu + Nf + L_1(y(t) - \hat{y}(t)), \quad \dot{f}(t) = L_2(y(t) - \hat{y}(t))$$

können unter gewissen Voraussetzungen die unbekanntes Eingänge  $n(t)$  durch die erweiterten Zustände  $f(t)$  in gewissen Grenzen rekonstruiert werden. Im Beitrag wird auf die Auslegung der Beobachtermatrizen eingegangen. Der Beobachtungsfehler lässt sich mit  $e(t) = \hat{x}(t) - x(t)$  und  $f_e(t) = f(t) - n(t)$  durch

$$\begin{bmatrix} \dot{e}(t) \\ \dot{f}_e(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A - L_1C & N \\ -L_2C & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e(t) \\ f_e(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_1d(t) - Hh(t) \\ L_2d(t) - \dot{n}(t) \end{bmatrix}$$

angeben. Hierbei werden  $\dot{n}(t)$ ,  $h(t)$  und  $d(t)$  als Störungen aufgefasst, die sich auf die Beobachterfehlergleichung auswirken. Das Ziel ist es,  $L_1$  und  $L_2$  so zu entwerfen, dass die erweiterte Beobachtersystemmatrix stabil ist und dass der Einfluss der beschriebenen Störungen auf die Beobachtungsfehler minimiert wird. Im Beitrag wird der Entwurf von  $L_1$  und  $L_2$  diskutiert. Die erreichbare Güte der Beobachtung hängt hierbei von der

Modellgenauigkeit und von der Qualität der Messungen ab. An experimentellen Beispielen wie z. B. einem elastischen Balken und einer allseitig fest eingespannten dünnen Platte werden die Funktionsweise und die Leistungsfähigkeit des PI-Beobachters validiert. Hierbei werden Dehnungen und/oder Verschiebungen der elastischen Struktur gemessen. Auf die Struktur wird von außen eine Kontaktkraft aufgebracht, die mit Hilfe der genannten Messungen rekonstruiert wird. Zur Beurteilung der beobachteten Kontaktkräfte werden die realen Kräfte direkt gemessen und dienen zur Validierung der Beobachertechnik. Experimentelle Ergebnisse für die Beobachtung von sehr schnellen Stößen an einem elastischen Balken, die eine Dauer von einigen Millisekunden haben, sind in [4] gegeben.

Der in diesem Beitrag gezeigte PI-Beobachter kann allgemein zur Diagnose und Regelung elastischer Strukturen eingesetzt werden. Durch den angewandten Diagnoseansatz können Fehler wie z. B. Kontaktkräfte oder auch Risse, die als fiktive Kräfte interpretiert werden, beobachtet und damit detektiert werden. Der Eingriffsort kann mit einer Beobachterbank ermittelt werden. Mit Hilfe einer geeigneten Regelung werden Störungen, die von außen auf die Struktur wirken, beobachtet und kompensiert, dies kann z. B. zur Geräuschkürzung elastischer Strukturen eingesetzt werden. Hierbei werden eine Zustandsregelung und eine Störkompensation durchgeführt. Die vorgeschlagene Regelungsstrategie wird zur Schwingungsdämpfung an einer allseitig fest eingespannten Platte eingesetzt. Die eingesetzte Regelungsstrategie ist sehr robust gegenüber Modellungenauigkeiten und äußeren Einflüssen.

#### Literatur:

- [1] I. Chopra, Review of State of Art of Smart Structures and Integrated Systems, *AIAA Journal*, vol. 40, No. 11, 2002, pp 2145-2187.
- [2] P. C. Müller, Control of nonlinear systems by applying disturbance rejection control techniques, *Proc. IEE Int. Conference CONTROL 88*, Institution of electrical, London, 1988, pp 734-737.
- [3] H. H. Niemann, J. Stoustrup, B. Shafai, S. Beale, LTR design of proportional integral observers, *Int. J. Rob. and Nonl. Control*, vol.5, 1995, pp 671-693.
- [4] I. Krajcin, D. Söffker, Modified PIO design of robust unknown input estimation, *In Proc. 19th ASME-DECT Biennial Conference on Mechanical Vibration and Noise, Symposium on Systems with Frictions and Impacts: Modeling, Stability and Control*, Chicago, IL, USA, 2003, 6 pages.

# Sigmapunkt-Kalmanfilter zur Schätzung von Zuständen und Parametern eines Inertialmesssystems

Joachim Fox \*

\* Lehrstuhl für Prozessautomatisierung (LPA)  
(Ltg. Prof. Dr.-Ing. habil. H. Janocha)  
Universität des Saarlandes  
Postfach 151150  
66041 Saarbrücken  
Tel.: 0681/302-4649  
Fax: 0681/302-2678  
Email: j.fox@lpa.uni-saarland.de

**Schlüsselwörter:** Parameterschätzung stochastischer dynamischer Systeme, Inertialmesstechnik, *unscented Kalman filter*, *central difference Kalman filter*

Das Kalmanfilter hat sich seit langem bewährt als Zustandsschätzer für zeitdiskrete dynamische Systeme. Durch seine rekursive Struktur ist es effizient zu implementieren und bietet unter bestimmten Voraussetzungen bei linearen Systemen einen optimalen Schätzer im Sinne einer minimalen Fehlervarianz. Vielfache Anwendung findet es jedoch auch auf nichtlineare Systeme: Das sog. erweiterte Kalmanfilter (EKF) beruht auf einer linearen Näherung der System- und Ausgangsgleichungen und bietet somit eine suboptimale Schätzung des Zustands.

Trotz seiner weiten Verbreitung gilt der Kalmanfilterentwurf als schwierig, da bei nichtlinearen Systemen die partiellen Ableitungen der Systemgleichungen berechnet werden müssen und die Konvergenz des Schätzfilters nur sehr schwer zu beweisen ist. Daher wurden in den vergangenen Jahren verschiedene Anstrengungen unternommen, Alternativen zum EKF zu entwickeln, die einfacher zu entwerfen sind und möglichst auch noch genauere Schätzergebnisse liefern.

Die wohl erste dieser Entwicklungen geht auf Julier und Uhlmann zurück, die eine sog. *unscented transformation* (UT) zur Approximation von Mittelwert und Varianz einer stochastischen Variablen nach einer nichtlinearen Transformation entwarfen (eine Übersicht über die von den Autoren auf dieser Grundlage erzielten Forschungsergebnisse gibt [3]). Dazu wählt die UT  $2n+1$  Punkte im Zustandsraum aus ( $n$ : Systemordnung), die der Transformation unterworfen werden. Aus den transformierten Punkten werden dann ein gewichteter Mittelwert und eine gewichtete Varianz berechnet. Diese Transformation kann in einen Algorithmus zur sequentiellen Zustandsschätzung eingebunden werden und wird dann als *unscented Kalman filter* (UKF) bezeichnet. Dieses zeigt somit Ähnlichkeiten sowohl zum EKF als auch zu Monte-Carlo-Methoden.

Merwe und Wan [4] haben verschiedene Varianten dieser Herangehensweise unter dem Begriff *Sigmapunktfilter* (SPKF) gebündelt. Von besonderem Interesse ist hier das Zentraldifferenzenfilter (CDKF) von Nørgaard et al. [5], da dieses mit weniger Parametern auskommt als das UKF und zudem etwas genauer ist.

Die erhöhte Genauigkeit und der unkomplizierte Entwurf der SPKF gegenüber dem EKF werden erkauft mit höheren Rechenzeiten. Zwar haben sowohl SPKF als auch EKF Implementierungen der Ordnung  $O(n^3)$ , jedoch führt die Betrachtung von  $2n+1$  Punkten dazu, dass System- und Messfunktionen jeweils entsprechend häufig ausgewertet werden müssen,

was in vielen Fällen deutlich länger dauert als die Berechnung der Ableitungen. Muss zudem noch Systemrauschen betrachtet werden, d.h. hat das System die Form

$$\mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{f}(\mathbf{x}_k, \mathbf{u}_k, \mathbf{n}_{s,k})$$

( $\mathbf{x}$ : Zustandsvektor,  $\mathbf{u}$ : Eingangsvektor,  $\mathbf{n}_s$ : Vektor des Systemrauschens,  $\mathbf{f}$ : Systemfunktion,  $k$ : Zeitindex), so müssen die SPKF-Algorithmen mit einem erweiterten Zustandsvektor  $\mathbf{x}' = (\mathbf{x}^T, \mathbf{n}_s^T)^T$  arbeiten, was die Anzahl der Sigmapunkte nochmals erhöht. Gleiches gilt, wenn Messrauschen berücksichtigt werden muss.

In diesem Vortrag wird nun ein modifiziertes System der Form

$$\mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{f}(\mathbf{x}_k, \mathbf{u}_k, \mathbf{n}_{s,na,k}) + \mathbf{D}_k \mathbf{n}_{s,a,k}$$

( $\mathbf{n}_{s,na}$ : Vektor des nichtadditiven Systemrauschens,  $\mathbf{n}_{s,a}$ : Vektor des additiven Systemrauschens,  $\mathbf{D}$ : Rauscheingangsmatrix) betrachtet. Es wird gezeigt, dass in diesem Fall der Zustand lediglich um die nichtadditiven Rauschvariablen erhöht werden muss. Vorteilhaft ist dies insbesondere bei der kombinierten Schätzung von Zuständen und Parametern.

Die Anwendung der SPKF wird am Beispiel der Kalibrierung eines Inertialmesssystems verdeutlicht ([1], zum parametrischen Modell des Systems siehe auch [2]). Neben den Bewegungszuständen (Position, Geschwindigkeit und Orientierung) sollen die Parameter der Sensoren des Systems (z.B. Offsets, Skalenfaktoren, Einbaulagefehler etc.) geschätzt werden. Die Anzahl der Parameter ist weitaus höher als die Zahl der Bewegungszustände, und das den Parametern zugeordnete Rauschen ist im Gegensatz zum Rauschen in den Bewegungsgleichungen additiv. Mit dem hier vorgestellten Ansatz gelingt es, die Anzahl der Sigmapunkte gegenüber der üblichen Vorgehensweise auf etwa ein Viertel zu reduzieren und somit die Rechengeschwindigkeit erheblich zu erhöhen.

Anhand von Messungen an einem High-End-Inertialmesssystem, das von einem Industrieroboter bewegt wird, wird gezeigt, dass die Parameterschätzungen bei Einsatz eines SPKF schnell konvergieren und dieses Filter somit geeignet ist, das System im dynamischen Betrieb zu kalibrieren. Der Einsatz von SPKF bei der Kalibrierung bringt zum einen Vorteile bezüglich der Genauigkeit, da die Sigmapunkt-Approximation der Erwartungswerte Fehler dritter Ordnung zeigt, wohingegen das EKF Fehler zweiter Ordnung aufweist. Zum anderen haben die SPKF deutliche Vorteile bezüglich des Aufwands für den Filterentwurf, da keine Ableitungen analytisch berechnet werden müssen.

## Literatur:

- [1] J. Fox; H. Janocha: *A Rare-Update Sigma-Point Kalman Filter as Parameter Estimator*. Erscheint in: Proceedings of the IASTED Conference on Modelling, Identification, and Control, Innsbruck, Österreich, 16.-18. Februar 2005.
- [2] J. Fox; H. Janocha: *Der Industrieroboter als Referenz: Statische Kalibrierung von Inertialmesssystemen*. In: Tagungsband zur Fachtagung Robotik 2004, 17.-18.06.2004, München. VDI-Berichte 1841, S. 187-194.  
<http://www.lpa.uni-saarland.de/veroeffentlichungen.htm>
- [3] S. J. Julier; J. K. Uhlmann: *Unscented Filtering and Nonlinear Estimation*. In: Proceedings of the IEEE 3 (92) 2004, S. 401-421.
- [4] R. v. d. Merwe; E. A. Wan: *Sigma-Point Kalman Filters for Probabilistic Inference in Dynamic State-Space Models*. In: Proceedings of the Workshop on Advances in Machine Learning, Montreal, Canada, Juni 2003. <http://www.cslu.ogi.edu/publications>
- [5] M. Nørgaard; N. K. Poulsen; O. Ravn: *Advances in Derivative-Free State Estimation for Nonlinear Systems*. Technischer Bericht Nr. IMM-REP-1998-15, Technical University of Denmark, 2000. <http://citeseer.ist.psu.edu/norgaard00advances.html>

# Eine algebraische Methode zur schnellen Zustandsschätzung

Dr.-Ing. Johann Reger

Institut für Meß- und Automatisierungstechnik  
Universität der Bundeswehr  
Werner-Heisenberg-Weg 39, 85579 Neubiberg  
Tel.: 089/6004-3989  
Fax: 089/6004-3910  
Email: [reger@ieee.org](mailto:reger@ieee.org)

**Schlüsselwörter:** Integraltransformationen, Beobachterentwurf, differentiell-flache Systeme

Gegenstand dieses Vortrags ist ein neuartiges Verfahren zur Bestimmung von Zeitableitungen beliebiger Ordnungen bezüglich eines meßbaren, analytischen Zeitsignals [3]. Ähnlich dem in [1] vorgestellten Verfahren zur online-Identifikation unbekannter Parameter sind hierzu keine Differentiationen notwendig. Bei der Berechnung der Ableitungen wird einzig auf Integrationen zeitvarianter Kerne zurückgegriffen.

Ausgehend vom klassischen Reglerentwurf für nichtlineare differentiell-flache Systeme mit dynamischer Ausgangsrückführung stellt sich die Frage, wie die benötigten Zeitableitungen des zu messenden flachen Ausgangs ohne Differentiation ermittelt werden können – zu Anwendungen siehe [3, 4]. Die dem Verfahren zugrunde liegende Idee ist hierbei, sich von der üblichen systemischen Bedeutung des Begriffs „flacher Ausgang“ zu lösen und diese Größe nur mehr als meßbares Zeitsignal aufzufassen, für welches punktweise eine Approximation als Taylorentwicklung existieren soll. Eine derartige Approximation von bestimmter Ordnung kann durch eine Integriererkette fester Länge mit Eingang null realisiert werden. Transformiert man diese Beziehung in den Bildbereich und differenziert die gewonnene Beziehung nach dem Operator bis keine Anfangsbedingungen des Zeitsignals mehr auftreten, so kann zur Berechnung einer Näherung der Zeitsignableitungen ein lineares System in Dreiecksform angegeben werden. Eine Rücktransformation dieses Gleichungssystems in den Zeitbereich liefert ein entsprechendes lineares Gleichungssystem zur Bestimmung der Näherungswerte für die Zeitableitungen. Dieses Gleichungssystem enthält neben polynomial zeitvarianten Ausdrücken im Produkt mit dem Meßsignal gerade noch ebensolche Terme als Kerne in Integralen. Dieses Ergebnis kann als zeitvariantes lineares System mit singulärer Ausgangsgleichung bezüglich der Ableitungsnäherungen interpretiert werden. Um die Genauigkeit der Schätzwerte zu gewährleisten, muß das Schätzverfahren in Abhängigkeit eines Fehlermaßes von Zeit zu Zeit reinitialisiert werden. Man gewinnt somit abschnittsweise glatte Näherungswerte für die Zeitableitungen eines Meßsignals. Besonders interessant ist dabei, daß mit jeder Initialisierung nach einer  $\varepsilon$ -Zeit, quasi instantan, alle Ableitungswerte nahezu exakt zur Verfügung stehen; dies im Gegensatz zum exponentiell abklingenden Beobachtungsfehler üblicher Beobachter.

Die Güte der vorgestellten Methode wird anhand von Computersimulationen an einem chaotischen System demonstriert. Der Einfachheit halber wird hierzu ein autonomes, chaotisches System, das sogenannte Chen-System, verwendet. Da dieses System zudem differentiell-flach ist, zeigen die Simulationen, inwieweit unbekannte Systemzustände mit Hilfe des Verfahrens rekonstruiert werden können.



## Literatur:

- [1] M. Fliess, H. Sira Ramírez: An algebraic framework for linear identification. *ESAIM Control Optim. Calc. Variat.*, 9/2003, 151-168
- [2] M. Fliess, H. Sira-Ramírez: Control via state estimations of some nonlinear systems. *Symposium on Nonlinear Control Systems (NOLCOS-2004)*, Stuttgart, 2004
- [3] J. Reger, H. Sira Ramírez, M. Fliess: An example of algebraic state estimation in the recovery of encrypted messages. *Veröffentlichung in Vorbereitung*
- [4] H. Sira Ramírez, M. Fliess: On the output feedback control of a synchronous generator. *Proc. of 43rd Conference on Decision and Control (CDC-2004)*, Bahamas, 2004

# Entwurf und Anwendung einer Notation zur Entwicklung verteilter Prozessautomatisierungssysteme

Uwe Katzke \*

\* Lehrstuhl für Automatisierungstechnik /  
Prozessinformatik  
Bergische Universität Wuppertal  
Rainer-Gruenter-Str. 21, 42119 Wuppertal  
Tel.: 0202 439-1942.  
Fax.: 0202 439-1944  
katzke@uni-wuppertal.de

Birgit Vogel-Heuser \*\*

\*\* Lehrstuhl für Automatisierungstechnik /  
Prozessinformatik  
Bergische Universität Wuppertal  
Rainer-Gruenter-Str. 21, 42119 Wuppertal  
Tel.: 0202 439-1945.  
Fax.: 0202 439-1944  
bvogel@uni-wuppertal.de

Schlüsselwörter: Softwareentwicklung, Modellierung, verteilte Systeme, eingebettete Systeme,

Gegenwärtig wird die Softwareentwicklung im Anlagenbau mit einer wachsenden Komplexität der Aufgabenstellungen konfrontiert. Traditionelle Entwurfsansätze verfolgen in der Regel den Ansatz eines zentralen Automatisierungsgerätes. Untersuchungen zeigen, dass Software dort häufig ohne vorherige Modellierung entwickelt wird [1]. Die Herausforderungen und Möglichkeiten aktueller, im hohen Maße leistungsfähiger Hardware überfordern solche Konzepte.

Auf Basis der UML entwickelten wir innerhalb des DFG-Projektes DisPA (Distributed Process Automation) einen Ansatz zur Beschreibung, Modellierung und Implementierung verteilter Systeme. Mit der UML-PA (UML für die Prozessautomatisierung) wurde eine Modellierungssprache geschaffen, die nicht versucht, die Softwareentwicklung neu zu definieren, sondern eine wohl durchdachte Anpassung existierender Lösungen für die Automatisierungstechnik anbietet. Obwohl in der UML 2.0 [2] bereits Fortschritte für die Modellierung von Echtzeitsystemen erkennbar sind existieren Schwächen für die Prozessautomatisierung. Sie werden durch ein angepasstes UML-Profil ausgeglichen. Die UML-PA reduziert mit ihren Verbesserungen die vieldeutigen Interpretationsmöglichkeiten bestehender Notationen. Einige der neuen Sprachelemente existieren bereits in anderen Notationen und Modellen, sie standen aber bisher in keinem integrierten UML-Modell zur Verfügung. Die Anpassungen der UML-PA werden im folgenden aufgeführt:

- Zeitgesteuerte Zustandsmaschinen: Die UML bietet nur unscharf definierte Konstrukte für die Beschreibung von Echtzeitverhalten an. Zeitgesteuerte Zustandsmaschinen bieten ein deutlicheres Mittel für die Beschreibung von isolierten und zyklischen Zeitereignissen.
- Eindeutigkeit bei Mehrfachvererbungen: Gegenwärtig werden Mehrfachvererbungen kaum genutzt, da es keine Regeln gibt, die Auswahl im Wettbewerb stehender Modulelemente zu entscheiden. Mit der Kennzeichnung einer dominante und einer subordinaten Vererbungsrelation wird dieses Problem gelöst.
- Eindeutige Ausdrücke und Anweisungen: Der Mangel an wohldefinierten Notationen für Bedingungen und Aktionen innerhalb von Zustandsmaschinen der UML wird durch einen Satz in EBNF formulierter Sprachregeln aufgehoben. Die Regeln definieren die Syntax für Bedingungen sowie Zuweisungen und Methodenaufrufe als zulässige Aktionen.

- Kommunikation über Ports und Protokolle: Die Forderung nach einer wohldefinierten Beschreibung der Kommunikation innerhalb eines Systems und die klare Definition seiner Schnittstellen sind wesentlich für verteilte Automatisierungssysteme. Daher wurden Konzepte aus den Erweiterungen port, capsule, protocol und role der UML-RT [3] übernommen.
- Mapping von Hardware und Software: Die Hardware eines verteilten Automatisierungssystems sollte an die Automatisierungssoftware gebunden werden. Das zum Systemarchitekturdiagramm erweiterte Deployment Diagramm [4] bietet eine einfache Darstellungsmöglichkeit solcher Verbindungen.

Der Gewinn dieser UML-Erweiterungen für die Modellierung wird anhand der Realisierung eines Regelungssystems demonstriert. Es realisiert prototypisch die Presse einer Faserplattenanlage als industrielle Anwendung.

- Die Technik der Mehrfachvererbung wird genutzt um sukzessive komplexere Regler aus einfacheren Modulen abzuleiten.
- Die Abstraktionsstufe des objektorientierten Ansatzes erlaubt die Konstruktion virtueller Geräte. Sie werden genutzt, um einen Rekonfigurationsdienst einzurichten, bei dem defekte Hardware (z. B. ein Sensor) zur Laufzeit durch ein virtuelles Ersatzgerät substituiert werden kann.
- Regler werden als vordefinierte capsules zur Verfügung gestellt. Die graphische Darstellung der Verbindungen zwischen Reglern und Sensoren in der UML-PA deckt sich mit der Notation von Blockschaltbildern.

Die Kombination der verschiedenen UML-Erweiterungen bietet einen umfassenden Rahmen für den Softwareentwurf Automatisierungstechnischer Systeme. Ein besonderer Schwerpunkt fokussiert die Entwurfsmöglichkeit und Einbettung von Steuerung und Regelung.

#### Literatur:

- [1] U. Katzke, B. Vogel-Heuser, K. Fischer, „Analysis and State of the Art of Modules in Industrial Automation“. atp international, vol. 1, S. 23-31, Oldenbourg, München, 2004
- [2] Object Management Group, UML 2.0 Superstructure Specification, OMG Adopted Specification, ptc/03-08-02, <http://www.omg.org/docs/ptc/03-08-02.pdf>, 2003
- [3] B. Selic, J. Rumbaugh: “Using UML for Modeling Complex Real-Time Systems”, ObjecTime Limited und Rational Software Corp., März 1998.
- [4] M. Hause, “ARTiSAN Real-time Studio Support For Model Driven Architecture (MDA)”, ARTiSAN Software Tools, 2002

# Zustandssteuerwerk für das Reglerrahmenkonzept eines Mehrfahrweisenbausteins

R. Jorewitz \*

\* Lehrstuhl für Prozessleittechnik  
RWTH Aachen  
52056 Aachen  
Tel.: 0241/8097733  
Fax: 0241/8092238  
Email: [ansgar@pit.rwth-aachen.de](mailto:ansgar@pit.rwth-aachen.de)

U. Epple \*\*

\*\* Lehrstuhl für Prozessleittechnik  
RWTH Aachen  
52056 Aachen  
Tel.: 0241/8097737  
Fax: 0241/8092238  
Email: [epple@pit.rwth-aachen.de](mailto:epple@pit.rwth-aachen.de)

**Schlüsselwörter:** Zustandssteuerwerk, Reglerrahmen, Fahrweisenwechsel

Im betrieblichen Einsatz werden an die Prozessführung zunehmende Anforderungen gestellt: Hohe Regelgüte im Normalbetrieb, minimale Engineeringaufwendungen, robuste und zuverlässige Prozessbeherrschung in Sonderbetriebsarten und bei Störungen. Diesen unterschiedlichen Anforderungen kann man am geeignetsten mit einer Auswahl an unterschiedlichen Regel- bzw. Steuerstrukturen begegnen, die dann jeweils situationsabhängig aktiviert werden. Um ein solches Konzept industriell umsetzen zu können, ist die Spezifikation eines offenen Organisationsrahmens erforderlich, der das Zusammenwirken der einzelnen Regel-, bzw. Steuerstrukturen in einer Führungsfunktion einheitlich und formal regelt.

Der heutige Stand der Technik ist wesentlich durch den PID-Regler mit seinen beiden Strategien "PID-Regeln" ("Automatik") und "Stellen" ("Hand") geprägt. Komplexere Verfahren sind typischerweise im Rahmen spezieller Führungsfunktionen wie z.B. MPC-Reglern als Komplettlösungen realisiert. Interne Fahrweenumschaltungen erfolgen nach speziellen internen Logiken und sind mit den Fahrweisen monolithisch realisiert.

Für die zukünftige Entwicklung eines offenen, modularen Reglerrahmenwerks, das den Wechsel zwischen mehreren Reglerfahrweisen erlaubt, stellen sich folgende Anforderungen: Das Rahmenwerk und seine Funktionalität muss explizit bekannt sein, es muss möglichst generisch aufgebaut und formal beschrieben sein. Für den Einsatz in prozessnahen Komponenten muss es insofern netzwerkfähig sein dass verschiedene Fahrweisen in verschiedenen Komponenten realisiert werden können. Zudem sollte seine Struktur die Echtzeitfähigkeit der Laufzeitumgebung unterstützen.

Diese Ziele werden durch einen modularen und weitestgehend formalisierten Ansatz verfolgt. Hierbei wird die Funktionalität wie in Abb. 1 zu sehen in zwei Bereiche gegliedert. Einerseits ein für alle Anwendungsfälle zumindest formal gleicher Anteil in Form eines Zustandssteuerwerkes und andererseits unterlagert regleralgorithmusspezifische Komponenten. Diese sind über Standardschnittstellen miteinander verbunden. Die einzelnen Regleralgorithmen, d.h. die Fahrweisen, müssen diese Standardschnittstellen unterstützen. Sie stellen sich damit bezüglich der Fahrweisensteuerung als Standardzustandsmaschinen dar und kapseln ihre interne Ablaufsteuerstruktur. Auf diese Weise gliedert sich das Steuerwerk in einen zentralen Teil und einzelne, jeweils den Fahrweisen zugeordnete Teile.

Der zentrale Teil überwacht die Zustände der einzelnen Fahrweisen und organisiert die Fahrweenumschaltung nach einem allgemeinen für alle Führungsfunktionen einheitlichen

Muster. Er kann von außen über die Betriebsmittelschnittstelle beeinflusst werden. Ziel ist es, in diesem zentralen Teil allgemein und umfassend die Konzepte zur Fahrweisenumschaltung zu hinterlegen.

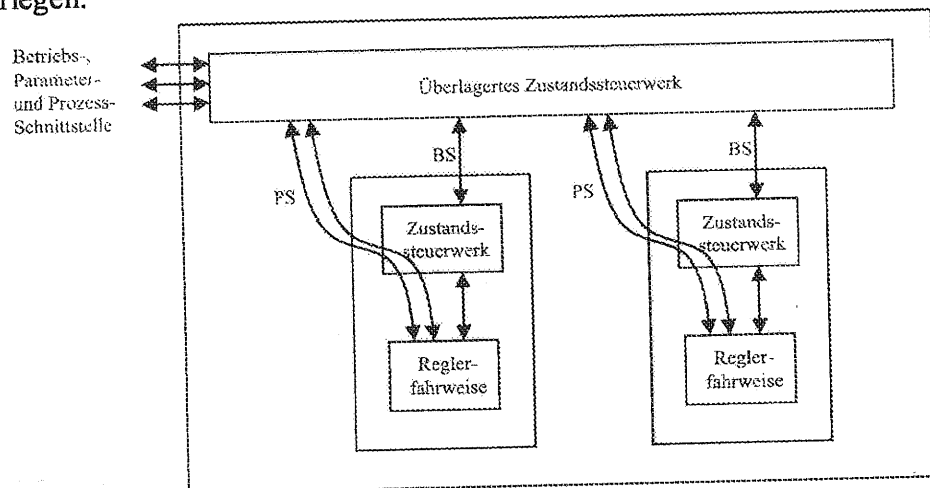


Abb. 1: Reglerarchitekturwerk mit zentralem Zustandssteuerwerk und einzelnen Fahrweisen, die ihrerseits aus Zustandssteuerwerk und Regelalgorithmus bestehen. PS bedeutet die Summe aus Parameter- und Prozessschnittstelle und BS meinte die Betriebschnittstelle

Die Fahrweisen selbst synchronisieren ihren internen Zustand über die Standardschnittstelle mit den Anforderungen und Wünschen der Zentrale. Die Versorgung der Fahrweisen mit den benötigten Prozessinformationen und die Ausgabe der Führungswerte erfolgt über zwei Kanäle: Einen zentral verwalteten Kanal für die Standardführungsgrößen (Istwert, Stellwerte..) und einen der Fahrweise individuell zugeordneten Kanal für fahrweisenspezifische Parameter und zusätzlich benötigte Prozessgrößen. Die Funktionalität dieser Schnittstellen ist abhängig vom Betriebszustand der Fahrweise: z.B. ob sich die Fahrweise in den Schrittketten "Identifikation", "Adaption", "aktiv" oder "in Bereitschaft" befindet.

Ein wesentliches Ziel dieser Entwicklungen ist es, einen standardisierten, funktional konsensfähigen Rahmen für Führungsfunktionen bereitzustellen, der formal beschrieben, zumindest in Kernteilen formal verifiziert, und effektiv in industriellen Anwendungen implementiert ist. Auf der anderen Seite sollen die geläufigsten höheren Reglerverfahren auf das Schnittstellen- und Steuerwerksmodell abgebildet und so zu jederzeit für den industriellen Einsatz verfügbaren Modulen weiterentwickelt werden.

Während auch für komplexe SISO-Anwendungen bereits erfolgversprechende Konzepte vorliegen, sind für den Bereich der MIMO-Anwendungen noch wesentliche Probleme z.B. bezüglich der Handhabung und der Konzeption der Rückfallstrategie-Ketten. Nach wie vor ist eine stabile Strecke immer noch das sicherste Backup!

# Nichtblockierende hierarchische Regelung dezentraler ereignisdiskreter Systeme

Klaus Schmidt

Lehrstuhl für Regelungstechnik  
Universität Erlangen-Nürnberg  
Cauerstraße 7 – 91058 Erlangen  
Tel.: 09131/8527133  
Fax: 09131/8528715  
klaus.schmidt@rt.eei.uni-erlangen.de

**Schlüsselwörter:** Ereignisdiskrete Systeme, hierarchische Regelung, dezentrale Regelung, supervisory control,

Systematische Verfahren zum Reglerentwurf für ereignisdiskrete Systeme weisen naturgemäß eine hohe Rechenkomplexität auf. Um dieser Problematik entgegenzuwirken werden in der Literatur verschiedene Ansätze zum dezentralen und hierarchischen Reglerentwurf vorgeschlagen. Bekannte Ansätze verwenden rein dezentrale Verfahren [3,4,6,10] oder beschränken sich ausschließlich auf hierarchische Regelung [2,7,11]. Unser Verfahren [8,9] dagegen behandelt den allgemeinen Fall dezentraler und hierarchischer Regelung wie in Abbildung 1 dargestellt.

Hierbei wird davon ausgegangen, dass das zu regelnde System aus Subsystemen, die miteinander interagieren, aufgebaut ist. Für die Subsysteme sind dabei dezentrale Regler vorgesehen, die untereinander Informationen austauschen können. Weiterhin wird eine hierarchische Abstraktion des Systems vorgenommen. Das abstrahierte System repräsentiert in diesem Zusammenhang das gemeinsame Verhalten der Subsysteme. Dieses wird im oberen Level durch hierarchische Regler, deren Steueranweisungen über die dezentralen Regler an die Subsysteme weitergegeben werden, überwacht.

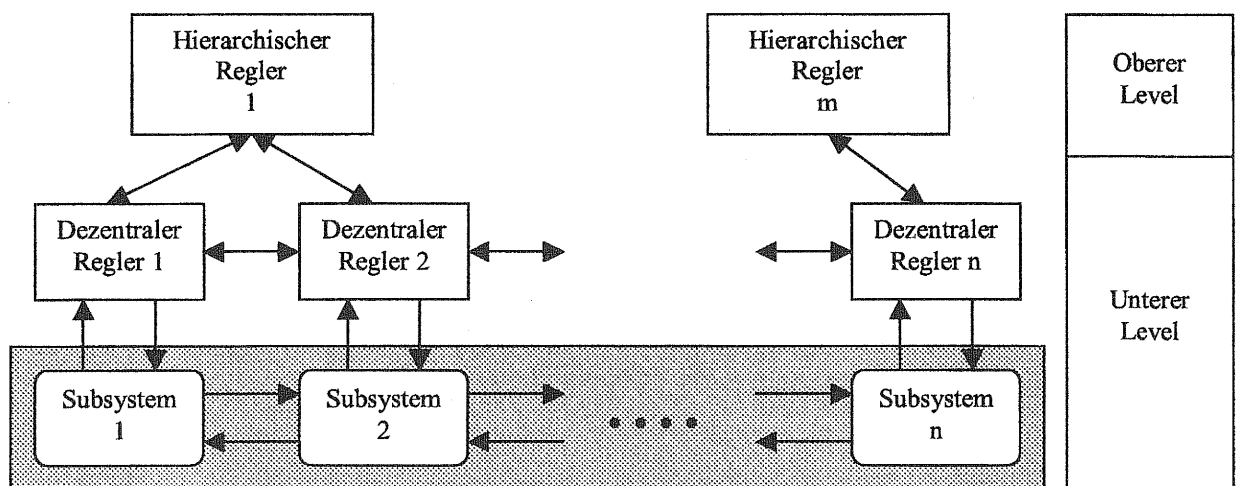


Abbildung 1: Hierarchische und dezentrale Informationsstruktur

Im Gegensatz zu [1,5], die auf Interaktion zwischen Subsystemen verzichten, identifizieren wir eine Klasse von ereignisdiskreten Systemen auf die der allgemeine Fall mit interagierenden Subsystemen und Reglern angewendet werden kann. Dabei werden für die Subsysteme zwei Struktureigenschaften, das sogenannte „local nonblocking“ und die „marked

state acceptance“ gefordert. Ausgehend davon ist es garantiert, dass auf dem oberen Level entworfene Regler im unteren Level so implementiert werden können, dass das Systemverhalten blockierungsfrei ist und gleichzeitig dem im oberen Level spezifizierten Verhalten genügt. Die vorgeschlagene Architektur kann darüber hinaus direkt auf Strukturen mit mehr als zwei Hierarchieebenen übertragen werden.

Durch den hierarchischen Entwurf und die dezentrale Implementierung ergibt sich hier ein erheblich geringerer Rechenaufwand als bei anderen Verfahren, die die angesprochene Struktureigenschaft nicht ausnutzen. Dies konnte anhand des am Lehrstuhl für Regelungstechnik der Universität Erlangen-Nürnberg vorliegenden Fischertechnik-Modells eines Produktionsprozesses überprüft werden.

## Literatur:

- [1] A.E.C. da Cunha, J.E.R. Cury, and B.H. Krogh. An assume guarantee reasoning for hierarchical coordination of discrete event systems. Workshop on Discrete Event Systems (WODES), 75-82, 2002.
- [2] P. Hubbard and P.E. Caines. Dynamical consistency in hierarchical supervisory control, IEEE Transactions on Automatic Control 47(1), 37-52, 2002.
- [3] S. Jiang, V. Chandra and R. Kumar. Decentralized control of discrete event systems with multiple local specializations. Proceedings of the American Control Conference, 2001.
- [4] J. Komenda and J.H. van Schuppen. Decentralized control with coalgebra, Proceedings of the European Control Conference, 2003.
- [5] R.J. Leduc, W.M. Wonham and M. Lawford. Hierarchical interface-based supervisory control: Parallel case. Allerton Conference on Comm., Contr. and Comp., 386-395, 2001.
- [6] S.-H. Lee and K.C. Wong. Structural decentralized control of concurrent DES. European Journal of Control 8(5), 477-491, 2002.
- [7] K.C. Wong and W.M. Wonham. Hierarchical control of discrete event systems, Discrete Event Dynamic Systems 6(3), 241-273, 1996.
- [8] K. Schmidt, J. Reger and T. Moor, Hierarchical control of structural decentralized DES, Workshop on Discrete Event Systems (WODES), 289-294, 2004.
- [9] K. Schmidt, S. Perk and T. Moor, Nonblocking hierarchical control of decentralized systems, Technical Report, Lehrstuhl für Regelungstechnik, Universität Erlangen-Nürnberg, 2004.
- [10] T. Yoo and S. Lafortune. A generalized framework for decentralized supervisory control of discrete event systems, Workshop on Discrete Event Systems (WODES), 11-17, 2002.
- [11] H. Zhong and W.M. Wonham. On the consistency of hierarchical supervision in discrete event systems, IEEE Transactions on Automatic Control 35(10), 1125-1134, 1990.

# Robuste Regelung für Steer-by-Wire Lenksysteme

Naim Bajcinca

Institut für Robotik und Mechatronik  
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V.  
Münchnerstr.20, 82234 Oberpfaffenhofen  
Tel: 08153 28 2453  
Fax: 08153 28 1441  
Email: naim.bajcinca@dlr.de

Johann Bals

Institut für Robotik und Mechatronik  
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V.  
Münchnerstr.20, 82234 Oberpfaffenhofen  
Tel: 08153 28 2433  
Fax: 08153 28 1441  
Email: johann.bals@dlr.de

Schlüsselwörter: Steer-by-Wire, Robuste Regelung, Force-Feedback, Inverse Disturbance Observer

Heutige Kraftfahrzeuge werden je nach Leistungsbedarf mit hydraulischer, elektrohydraulischer oder elektrischer Lenkunterstützung ausgerüstet. Unabhängig von der Art der Lenkunterstützung besitzen diese Systeme über die Lenksäule eine mechanische Verbindung zwischen Lenkrad und Spurstange, so dass auch bei Ausfall der Servounterstützung weiterhin die mechanische Kopplung erhalten bleibt. Die Steer-by-Wire (SbW) Lenkungstechnologie verzichtet durch den Einsatz vernetzter mechatronischer Komponente zugunsten der daraus resultierenden konstruktiven und funktionellen Freiheitsgrade auf diese mechanische Rückfallebene.

Systemtheoretisch betrachtet kann ein SbW-System als ein klassisches Master-Slave-System aufgefasst werden, wobei die Wechselwirkung des Fahrers (Operator) und des Fahrzeugs (Umgebung) durch eine geeignete Kopplung (SbW-Regler) eines Kraftrückkopplungs-(Master) und Lenkaktuators (Slave) realisiert werden kann. Dementsprechend können die Regelungsaufgaben bei einer SbW-Lenkung in zwei unterschiedlichen Ebenen definiert werden. Während die Aufgaben in der Aktuatorikebene das Führungsverhalten mit Reib- und Störkompensation beinhalten, ist die Aufgabe in der Funktionsebene das Erreichen einer definierten Wunschenkreaktion des Fahrzeugs und eines Wunschenkgefühls des Fahrers. In den beiden Ebenen müssen Robustheitsbedingungen bezüglich (a) variierender bzw. unsicherer biomechanischer Dynamik der Fahrerhand (Fahrer-Impedanz) und (b) unsicherer Dynamik des Fahrzeugs und des Reifen/Fahrbahn-Kontakts (Fahrzeug-Impedanz) berücksichtigt werden. Der Fahrer hält das Lenkrad lose oder fest und kann deswegen als variierende bzw. unsichere Impedanz aufgefasst werden. Die Fahrdynamik und damit die Fahrzeug-Impedanz hängt wesentlich vom Fahrzeugtyp, von der Fahrgeschwindigkeit, der Beladung und vom Straßenzustand ab.

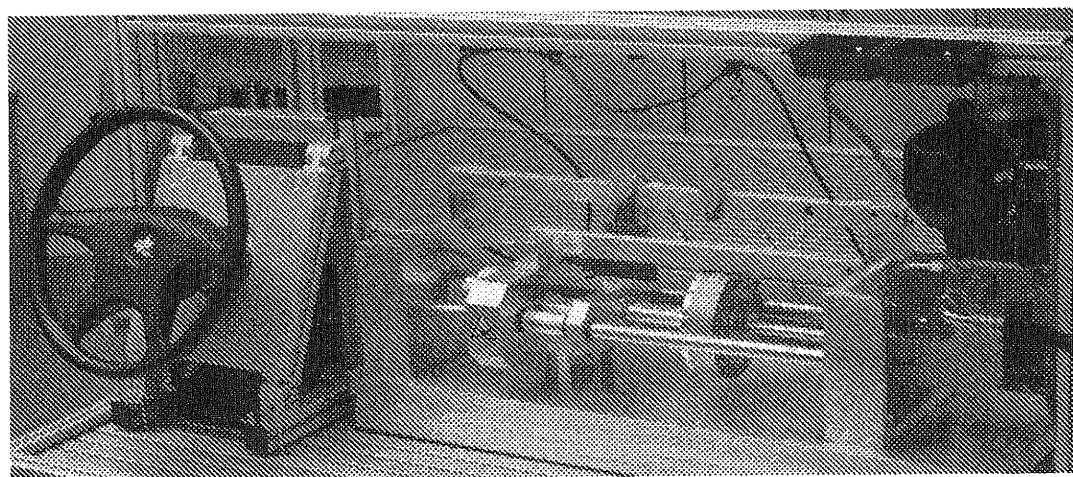


Abbildung 1: Der Steer-by-Wire Prüfstand am DLR



In der Aktuatorikebene müssen zwei entkoppelte Regelkreise entworfen werden: (a) der Fahrer-Kraftrückkopplungsaktuator und (b) der Fahrzeug-Lenkaktuator Regelkreis. In Abhängigkeit von der verwendeten Sensorik können diese grundsätzlich durch einen Momenten- (bzw. Kraft-) oder einen Positionsregelkreis, oder aber auch durch eine Kombination von beiden (hybride Kraft-Positionsregelung) realisiert werden. In diesem Vortrag wird beispielsweise für den Fahrer-Kraftrückkopplungs-Kreis eine Momentenregelung bevorzugt. Besonderes Augenmerk soll dabei der Robustheit des Kreises gegenüber der unsicheren Fahrersteifigkeit und der störenden Wirkung des vom Fahrer eingeleiteten Lenkmoments gerichtet werden. Erreicht wird dies durch zwei verschiedene Ansätze: (a) Modellfolgeregelung mittels *Disturbance-Observer*-Reglerstruktur, [1,2], und (b) durch Führungsregelung mittels einer neuartigen Inversionsreglerstruktur, gekennzeichnet als *Inverse-Disturbance-Observer*, [4].

In der Funktionsebene werden die Aktuatorregelkreise gekoppelt um eine gewünschte Referenzwechselwirkung zwischen dem Fahrer und dem Fahrzeug zu erzielen. Dabei ist es naheliegend, zunächst eine konventionelle Lenkung (hydraulische oder elektrische Servo-Lenkung) mittels SbW nachzubilden. Prinzipiell können vier mögliche Reglerstrukturen realisiert werden durch (a) bidirektionale Positionsrückführung (Admittanzdarstellung), (b) bidirektionale Kraftrückführung (Impedanzdarstellung), und (c) bidirektionale Positions- und Kraftrückführung (Hybriddarstellung). Bei den SbW-Systemen muss jedoch auf die konservative Entwurfsmethodik der Master-Slave Systeme in der Telerobotik, die auf der Passivitätstheorie beruht, aus zwei Gründen verzichtet werden: (1) die Umgebung, d. h. die Fahrzeugimpedanz ist aufgrund der kinetischen Energie des Fahrzeugs nicht, wie in der Regel angenommen, passiv, [2], und (2) die Fahrdynamik kann als nicht beliebig angenommen werden. Die hier verwendete Methodik besteht aus einem *Model-Matching*-Entwurfsschritt und einer Analyse im Parameterraum der relevanten unsicheren physikalischen Parameter. Der *Model-Matching*-Regler in der Admittanzdarstellung [2] wird durch  $H_\infty$  und in Form eines speziellen Kalman-Filters entwickelt, [2,3]. Die Robustheitsanalyse des resultierenden SbW Systems bezüglich Stabilität und Passivität wird im Parameterraum der Fahrersteifigkeit, Fahrzeuggeschwindigkeit und des Koeffizienten des Kraftschlusses zwischen dem Reifen und der Straßenbeladung durchgeführt.

Zur Validierung der regelungstechnischen Algorithmen und Entwicklung der mechatronischen Komponenten in einer wirklichkeitsnahen Umgebung wird der in Abb.1 dargestellte Steer-by-Wire-Prüfstand verwendet. Im Wesentlichen besteht dieser aus einem Kraftrückkopplungsaktuator und einem Lenkaktuator, sowie einer Fahrdynamiksimulations- und Visualisierungsumgebung in Echtzeit. Die Reaktionskräfte bzw. Nachgiebigkeit der Fahrbahn (Fahrzeugimpedanz) werden in Echtzeit berechnet und durch einen hydraulischen Aktuator implementiert.

## Literatur:

- [1] Bajcinca,N; Cortesao,R.; Hauschild,M; Bals,J; Hirzinger,G: *Haptic Control for Steer-by-Wire Systems*, IROS 2003, Las Vegas, USA.
- [2] Bajcinca,N; Cortesao,R.; Hauschild: *Robust Control for Steer-by-Wire Vehicles*, Special Issue of Autonomous Robots Journal, 2004.
- [3] Cortesao,R.; Bajcinca,N: *Model-Matching Control for Steer-by-Wire Vehicles with Under-Actuated Structure*, IROS 2004, Sendai, Japan.
- [4] Bajcinca,N; Bünte,T: *A novel control structure for dynamic inversion and tracking*, 16<sup>th</sup>IFAC World Congress, Prague, 2005.

# Mehrziel-Objektverfolgung mit Multi-Modell Filtern

Nico Kämpchen

Klaus Dietmayer

Abteilung Mess-, Regel- und Mikrotechnik  
Universität Ulm

Albert-Einsteil-Allee 41, 89081 Ulm

Tel.: +49 731 50 26326

Fax.: +49 731 50 26301

E-mail: Nico.Kaempchen@e-technik.uni-ulm.de

**Schlüsselwörter:** Multi-Modell Filterung, Mehrziel-Objektverfolgung, Fahrerassistenz

Eine weiterhin zunehmende Anzahl von Unfällen innerhalb der Grenzen der EU mit zahlreichen Verletzten und Toten erzeugen zunehmend den Wunsch nach aktiven Sicherheitssystemen, die auch das Fahrzeugumfeld in ihre Aktionsentscheidung mit einbeziehen. Gefährliche Situationen können dann vor dem tatsächlichen Eintreten eines Unfalls erkannt und frühzeitige Gegenmaßnahmen sowie Insassenschutzmaßnahmen eingeleitet werden.

Aktive Fahrerassistenzsysteme bestehen aus den drei Hauptbestandteilen der Umfelderkennung, Situationsanalyse mit Entscheidungsgenerierung und Aktorik. Die Umfelderkennung hat dabei die Aufgabe, die von den Sensoren gelieferten Daten zu einer konsistenten, dynamischen, geometrischen und semantischen Beschreibung zu verarbeiten. Im Allgemeinen werden dafür mehrere sich im Fahrzeugumfeld befindliche Gegenstände mit den Sensoren erkannt und mittels eines Mehrziel-Objekttrackings verfolgt [1, 2].

Die Objektverfolgung geschieht unter der Zuhilfenahme verschiedener Modellannahmen. Zunächst werden die Sensordaten vorverarbeitet, wobei ein Sensormodell zur Anwendung kommt. Aufgrund des Wissens über die Messcharakteristik des Sensors können aus den Sensordaten Merkmale extrahiert werden. Unter Verwendung eines Objektmodells werden dann aus diesen Merkmalen Objekte generiert. Die Objekte werden über die Zeit verfolgt, wobei der Objektzustand mit einem Zustandschätzer bestimmt wird. Dem Zustandsschätzer wiederum ist das Wissen über die Dynamik der verfolgten Gegenstände in Form von dynamischen Prozessmodellen unterlegt. Eine Messdatenassoziation ordnet den Objekten in jedem Zyklus die Sensormessdaten zu. Die Bestimmung der Modellannahmen für das Sensormodell, das geometrische und dynamische Objektmodell, sowie die Identifikation geeigneter Methoden, um diese Modellannahmen abzubilden, ist Gegenstand aktueller Forschung auf dem Gebiet der Fahrzeugumfelderfassung [3]. Dieser Beitrag befasst sich mit der dynamischen Modellierung und zeigt Methoden auf, den Objektzustand effizient zu schätzen.

Die formale dynamische Modellierung nach Bayes berechnet aus der a posteriori Wahrscheinlichkeitsdichte des Zustandes aller Objekte  $f_{k|k}(\mathbf{X} | \mathbf{Z}^{(k)})$  und der Mehrziel-Markov-Dichte  $f_{k+1|k}(\mathbf{Y} | \mathbf{X})$ , welche das Bewegungsmodell der Gegenstände abbildet, eine a priori Wahrscheinlichkeitsdichte  $f_{k+1|k}(\mathbf{X} | \mathbf{Z}^{(k)})$ , mit:

$$f_{k+1|k}(\mathbf{X} | \mathbf{Z}^{(k)}) = \int f_{k+1|k}(\mathbf{X} | \mathbf{W}) f_{k|k}(\mathbf{W} | \mathbf{Z}^{(k)}) d\mathbf{W}. \quad (1)$$

Da dieses Integral im Allgemeinen nicht geschlossen gelöst werden kann, existieren approximative Lösungen. Die wohl bekannteste und am weitesten verbreitete, ist die Prädiktion des linearen Kalman-Filters. Hierbei wird der geschätzte Zustand durch seine ersten beiden statistischen Momente beschrieben, wobei die Unsicherheit des Zustandes durch eine Normalverteilung modelliert wird. Der Zustandsübergang ergibt sich aus einem linearen

Gleichungssystem. Eine andere Approximation der Bayes'schen Modellierung bildet die Wahrscheinlichkeitsdichten statistisch durch Beispiele (*engl. Samples*) ab. Diese Partikel-Filter haben gegenüber dem Kalman-Filter den Vorteil, starke Nicht-Linearitäten und Multi-Modalitäten modellieren zu können, sind bisher allerdings für größere Zustandsräume noch nicht echtzeitfähig [4]. Eine echtzeitfähige Möglichkeit der Bayes'schen Modellierung näher zu kommen, ist die Verwendung von Multi-Modell-Filtern, wie dem Interacting Multiple Modell Algorithmus (IMM) [5]. Bei diesem hybriden Filter ist die dynamische Zustandsgleichung nicht nur vom kontinuierlichen Zustand  $x(t)$  und dem Rauschterm  $w(t)$ , sondern auch von dem diskreten Modus  $s(t)$  abhängig, der in unserem Fall am besten mit dem Fahrzustand des verfolgten Gegenstandes zu vergleichen ist:

$$\dot{\bar{x}}(t) = f(x(t), s(t), w(t)). \quad (2)$$

Mehrere Zustandsschätzer, beispielsweise Kalman-Filter, die jeweils einen Fahrzustand abbilden, agieren dabei parallel. Aus den Innovations-Residuen der einzelnen Filter werden Modellwahrscheinlichkeiten berechnet, die zur Gewichtung eines gemischten Zustandes herangezogen werden. Abb. 1 zeigt beispielhaft den Verlauf der Modellwahrscheinlichkeiten für drei Modelle während starker Beschleunigungsänderungen. Die Wahl des Modell-Sets und der

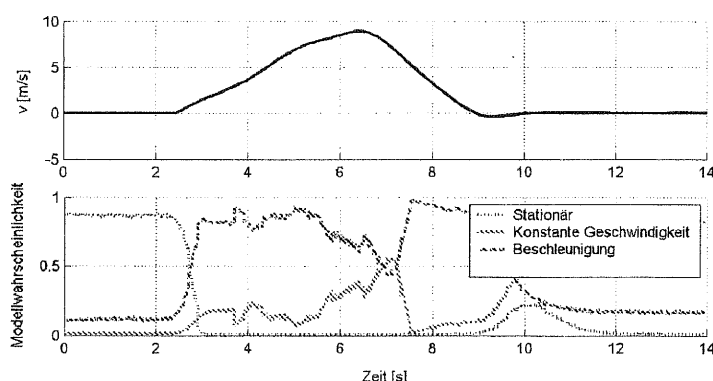


Abbildung 1: Oben: Geschwindigkeit  $v$  während einer starken Beschleunigung, gefolgt von einem starken Abbremsen. Unten: Modellwahrscheinlichkeiten.

Parameter des IMM spielt bei der Performance eine entscheidende Rolle. Daher wurden Verfahren entwickelt, diese Parameter systematisch aus Statistiken von realen Verkehrsszenarien herzuleiten und verschiedene IMM-Parametrierungen in Simulationen und anhand von realen Messdaten zu vergleichen [6]. Die Ergebnisse zeigen eine signifikante Verbesserung gegenüber herkömmlichen Ansätzen mit einem einzelnen Kalman-Filter.

## Literatur:

- [1] Bar-Shalom, Y.: "Estimation and Tracking: principles, techniques, and software", Artech House, 1993
- [2] Blackman, S.; Popoli, R.: "Design and Analysis of Modern Tracking Systems", Artech House, 1999
- [3] Kaempchen N.; Fuerstenberg, K.; Skibicki A.; Dietmayer, K.: "Sensor Fusion for Multiple Automotive Active Safety and Comfort Applications", 8th International Forum on Advanced Microsystems for Automotive Applications, Berlin, Germany, 2004, pp. 137-163.
- [4] Isard, M.; Blake, A.: "Condensation - conditional density propagation for visual tracking", International Journal of Computer Vision, 1998, pp. 5-28
- [5] Blom, H.; Bar-Shalom, Y.: "The Interacting Multiple Model Algorithm for Systems with Markovian Switching Coefficients", IEEE Transactions on Automatic Control, 33(8), 1988, pp. 780-783
- [6] Kaempchen N.; Dietmayer, K.: "IMM vehicle tracking for traffic jam situations on highways", 7th International Conference on Information Fusion, Stockholm, Sweden, 2004

# Multi Sensor Joined Probabilistic Data Association

Jan Effertz

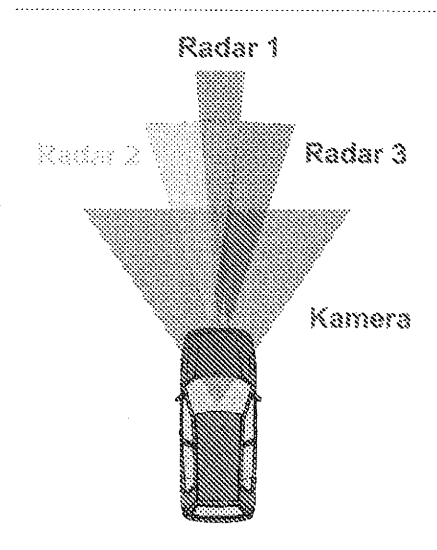
Institut für Regelungstechnik  
TU-Braunschweig  
Hans-Sommer-Straße 66  
Tel. 0531 391 3835  
Fax 0531 391 5194  
[effertz@ifr.ing.tu-bs.de](mailto:effertz@ifr.ing.tu-bs.de)

**Schlüsselwörter:** Umfelderkennung, Datenfusion, Joined Probabilistic Data Association

Bei der Entwicklung moderner Kraftfahrzeuge wird der Schwerpunkt zunehmend auf die Verbesserung von Fahrkomfort, Fahrsicherheit und in diesem Zusammenhang auf Fahrerassistenzsysteme gelegt. Während Assistenzfunktionen wie ABS oder ESP bereits nahezu selbstverständliche Grundausstattung eines modernen PKW sind, erlangten in den letzten Jahren komplexere Assistenzfunktionen, wie zum Beispiel das Adaptive Cruise Control (ACC) oder der Einparkassistent, die Serienreife. An weiter gehenden Assistenzfunktionen wird seitens Forschung und Industrie bereits gearbeitet. So befinden sich zur Zeit Systeme wie die automatische Notbremse oder die Erweiterung des ACC um eine automatische Fahrspurhaltung in der Entwicklung.

Eine Schlüsselrolle bei dieser neuen Generation von Assistenzsystemen nimmt die Fahrzeugumfeldererkennung ein. Einfache Aufgaben, wie etwa die Verfolgung des vorausfahrenden Fahrzeuges durch einen einzelnen Radarsensor beim ACC, lassen sich heute bereits zufriedenstellend lösen. Mit steigender Komplexität des Umfeldes und höheren Ansprüchen an die über das Umfeld gewonnenen Informationen ist jedoch beim heutigen Stand der Technologie ein einzelner Sensor nicht ausreichend. Hier empfiehlt sich der Einsatz eines Multi-Sensor-Netzwerkes, in dem verschiedene Umfeldsensoren einen gemeinsamen Beobachtungsbereich überwachen. Die Schwächen eines Sensortyps lassen sich auf diese Weise mit den Stärken eines anderen kompensieren.

Um anschließend aus den Messungen der verschiedenen Sensoren ein gemeinsames, künstliches Abbild der Fahrzeugumgebung zu erzeugen, ist eine Datenfusion notwendig, welche die durch die Messungen gewonnenen Informationen verdichtet und einer übergeordneten Auswertung zur Verfügung stellt.



*Abbildung 1: Beispiel für ein Multi-Sensor-Netzwerk*

Verschiedene Datenfusionsmethoden (z.B. Multi-Sensor-Kalman-Filter, Informationsfilter) wurden in der Literatur beschrieben, um diese Funktionalität zu gewährleisten. Diese im Folgenden klassische Ansätze genannten Verfahren basieren im Wesentlichen darauf, zunächst in einer Stufe der Datenzuordnung diejenigen Messungen zu ermitteln, die optimal zur Aktualisierung der Objekte in der künstlichen Fahrzeugumgebung (im Folgenden kurz Tracks genannt) herangezogen werden können.

Für jeden Track wird so je Sensor genau eine Messung ermittelt, dieses Prinzip wird 1-zu-1 Zuordnung genannt. Der Track wird anschließend mit den ihm zugeordneten Messungen beispielsweise durch einen Informationsfilter aktualisiert.

Erkennen die Sensoren die Objekte in der realen Umgebung eindeutig, so lassen sich auf diesem Wege sehr gute künstliche Abbilder der Fahrzeugumgebung erzeugen.

Bedingt durch das Prinzip der 1-zu-1 Zuordnung zeigen sich jedoch starke Nachteile, sobald die von den Sensoren übermittelten Informationen nicht mehr eindeutig den Tracks zugeordnet werden können, also ein Objekt der realen Umgebung von einem Sensor mehrfach erkannt wird oder zusätzliche Falschmessungen existieren, die von keinem realen Objekt herrühren.

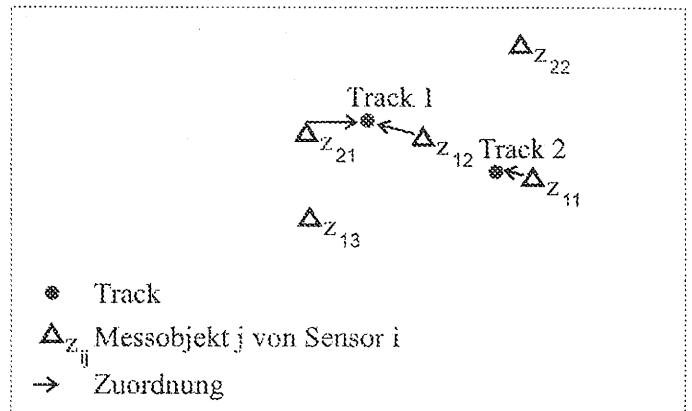


Abbildung 2: klassische 1-zu-1 Datenzuordnung

In diesem Beitrag wird ein Verfahren vorgestellt, dass diese Probleme umgeht, indem die Stufen Datenzuordnung und Datenfusion zusammenfasst werden. Anstelle der 1-zu-1 Datenzuordnung erfolgt eine probabilistisch gewichtete Einbeziehung aller Messdaten der einzelnen Sensoren. Dabei wird für jede Messung  $i$  und jeden Track  $j$  die Wahrscheinlichkeit  $\beta_{ij}$  bestimmt, dass die Messung eine korrekte Beobachtung des jeweiligen Trackzustandes ist. Anschließend erfolgt eine Aktualisierung des Tracks mit allen Einzelmessungen, gewichtet über deren  $\beta_{ij}$ .

Grundlage des Verfahrens bildet die Joined Probabilistic Data Association (JPDA), die für den Einsatz in einem Multi-Sensor-Netzwerk erweitert und für den automobilen Bereich angepasst wurde. Neben einer wirkungsvollen Unterdrückung von Sensorfehlern lässt sich mit diesem Ansatz eine effiziente und intelligente Erzeugung und Vernichtung neuer Tracks verwirklichen. Im Oktober 2004 wurde dieses Verfahren mit einem Sonderpreis der Fa. Hella KGaA Hueck & Co ausgezeichnet.

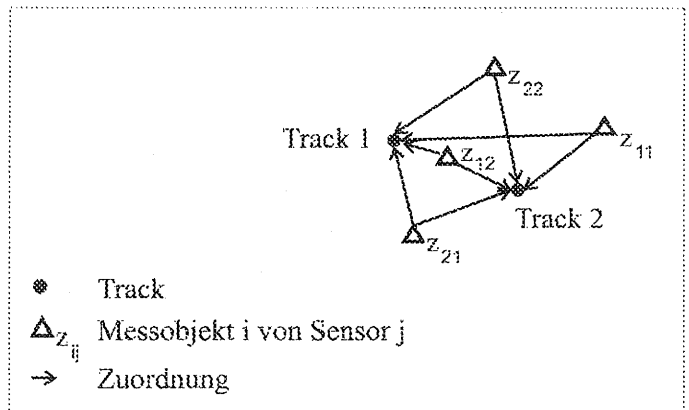


Abbildung 3: JPDA-Zuordnung

## Literatur:

- [1] J.-C. Becker: Fusion der Daten der objekterkennenden Sensoren eines autonomen Straßenfahrzeuges, Institut für Regelungstechnik, TU-Braunschweig, 2002.
- [2] Jan Effertz: Anwendung der Multi Sensor Joined Probabilistic Data Association zur Objekterkennung und Datenfusion in einem Multi-Sensor-Netzwerk. Institut für Regelungstechnik, TU-Braunschweig, 2002.
- [3] Y. Bar-Shalom: Multitarget-Multisensor Tracking: Advanced applications. Artec House, 1990.
- [4] Y. Bar-Shalom und T. E. Hoffmann: Tracking and Data Association. Academic Press INC., 1988.

# Vergleich verschiedener nichtlinearer Regelkonzepte für das Aufschwingen eines invertierten Einfachpendels auf einem Wagen

T. Schröder, W. Zhong  
Lehrstuhl für Automatisierungs- und Regelungstechnik  
Christian-Albrechts Universität Kiel  
Kaiserstraße 2, 24143 Kiel  
Tel. (0431) 880-6275  
Fax (0431) 880-6278  
Email: [ths@tf.uni-kiel.de](mailto:ths@tf.uni-kiel.de);  
[wz@tf.uni-kiel.de](mailto:wz@tf.uni-kiel.de)

**Schlüsselwörter:** nichtlineare Regelung, unteraktuierte Systeme

Das invertierte Einfachpendel auf einem Wagen stellt ein klassisches Beispiel eines Systems mit einem unteraktuierten Freiheitsgrad dar.

Fast alle Verfahren verwenden eine hybride Regelstrategie, bei der ein nichtlinearer Regler für das Aufschwingen verantwortlich ist und ein linearer Regler die Stabilisierung in der instabilen Gleichgewichtslage vornimmt.

Im Beitrag werden Implementierungen vorgestellt wie die teilweise Zustandslinearisierung [1,3] oder die Forwarding-Technik [2], mit denen gute bis sehr gute Ergebnisse erzielt werden. Ein Lyapunov-Entwurf, wie in [4], liefert dagegen nur in der Simulation brauchbare Ergebnisse - die Implementierung an einem realen Labormodell scheitert oft am fehlenden Verfahrensweg für den Wagen. Ein Lyapunov-Entwurf in Verbindung mit der Technik des „Energy-shaping“ [5] liefert dagegen auch bei beschränktem Verfahrensweg ein praktisch umsetzbares Regelkonzept

Eine bislang noch unveröffentlichte Methode, die man mit dem Begriff „verallgemeinerter Polvorgabe-Entwurf“ charakterisieren könnte, verwendet nicht die hybride Regelstrategie, sondern erlaubt eine globale Stabilisierung des Pendels in der instabilen Gleichgewichtslage [6]. Nachteilig ist bis jetzt allerdings der noch zu lange Verfahrensweg des Wagens.

## Literatur:

- [1] M. W. Spong, "Underactuated mechanical systems," In *Siciliano B., Valavanis K.P. (Eds.), Control Problems in Robotics and Automation, Lecture notes in Control and Information Sciences 230*, Springer-Verlag, London, UK, 1997.
- [2] L. Praly, "An introduction to some Lyapunov designs of global asymptotic stabilizers," <http://cas.ensmp.fr/~praly/Publications>.
- [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.
- [4] R. Lozano, I. Fantoni and D. J. Block, "Stabilization of the inverted pendulum around its homoclinic orbit," *System & Control letters*, 2000(40), pp 197-204.
- [5] W. Zhong, H. Röck, "Stabilization of the Double Inverted Pendulum on a Cart based on Lyapunov Design"; *36. Regelungstechnisches Kolloquium Boppard*, 20-22, Feb. 2002.
- [6] E. Pawluk, „Nichtlineares Aufschwingen des invertierten Pendels durch Polvorgabe über ein verallgemeinertes charakteristisches Polynom“, Interner Bericht 2001.

# Analyse und Synthese von Automaten in Zustandsraumdarstellung

Dipl.-Math Ch. Preusse \*

Prof. Dr.-Ing. U. Konigorski \*\*

\* Institut für Elektrische Informationstechnik  
Technische Universität Clausthal  
Leibnizstr. 28, 38678 Clausthal  
Tel. +49 5323 72-3518  
Fax +49 5323 72-3197  
Email christian.preusse@tu-clausthal.de

\*\* Institut für Elektrische Informationstechnik  
Technische Universität Clausthal  
Leibnizstr. 28, 38678 Clausthal  
Tel. +49 5323 72-2342  
Fax +49 5323 72-3197  
Email koni@iei.tu-clausthal.de

**Schlüsselwörter:** Ereignisdiskrete Systeme, Automaten, Zustandsraummethodik, Steuerungsentwurf

Neben zeitkontinuierlichen und zeitdiskreten Regelungen haben in der automatisierungstechnischen Praxis auch Systeme, die asynchron, also nicht oder in unbekannter Weise von der Zeit abhängig auf Ereignisse oder Steuerungen reagieren, eine große Bedeutung. Ein wesentliches Ziel der Modellierung ereignisgetriebener Systeme ist eine mathematisch und algorithmisch gut handhabbare Formulierung ihres dynamischen Verhaltens und ihrer strukturellen Eigenschaften. Außerdem kann die Suche nach Verfahren zum systematischen Steuerungsentwurf noch in keiner Weise als abgeschlossen angesehen werden. Zur Modellierung, Analyse und Synthese wurden in den letzten Jahrzehnten bemerkenswerte Fortschritte für verschiedene Klassen ereignisdiskreter Systeme gemacht. Als ein mögliches Hilfsmittel zur Beschreibung solcher ereignisgetriebener Systeme hat sich die Beschreibung durch Automaten durchgesetzt.

In diesem Beitrag wird eine neue Methodik vorgestellt, die die bereits bekannte graphisch-mathematische Beschreibung von Automaten in reelle Vektorräume einbettet. Auf dieser Grundlage wird das dynamische Verhalten von Automaten als zustandsbasierte Matrixgleichung formuliert. Diese stellt damit eine Weiterentwicklung und Verallgemeinerung der bereits bekannten Modellierung von Automaten durch Shegalkin-Polynome von D. Franke bzw. der Modellierung durch Walsh-Funktionen von J. Sonnenberg dar.

Die resultierende Darstellung ist dabei der Modellierung von Systemen aus der Theorie linearer zeitkontinuierlicher und zeitdiskreter Systeme äquivalent. So wird das dynamische Verhalten der Automatenzustände  $x$  vollständig durch  $x' = Ax + Bu$  beschrieben, wobei  $(.)'$  das Stattfinden eines Ereignisses, also die Dynamik beschreibt. Die Systemmatrix  $A$  und die Eingangsmatrix  $B$  umfassen dabei die strukturellen Eigenschaften des Automaten, beispielsweise in Form der Eigenwerte der Systemmatrix oder der Eigenschaften der aus der Theorie zeitgetriebener Systeme bekannten Kalmanschen Steuerbarkeitsmatrix.

Diese neue Art der Modellierung erlaubt neben der Analyse von Automaten auch die Synthese von Reglern zu verschiedenen Spezifikationen. Der Steuerungsentwurf basiert auf der Analogie zu zeitgetriebenen Systemen, indem mit einem Zustandsregler  $R$  eine Steuergröße  $u = Rx$  erzeugt wird. So lässt sich beispielsweise aus der direkten Vorgabe des Sollverhaltens des gesteuerten Automaten ein Regler ableiten, der das Sollverhalten im geschlossenen Kreis gewährleistet. Genauso können allerdings auch Reglermatrizen berechnet werden, die verbotene Zustände meiden oder dem gesteuerten System gewünschte

# Bewertung der Regelgüte von verfahrenstechnischen Anlagen mit Hilfe vorliegender Messreihen

## Möglichkeiten der Anwendung nichtparametrischer statistischer Methoden

Mirko Bebar \*

\* Lehrstuhl für Regelungssysteme und  
Steuerungstechnik  
Ruhr-Universität Bochum  
44780 Bochum  
Tel.: 0234 / 32 24052  
Fax: 0234 / 32 14155  
Email: bebar@rus.ruhr-uni-bochum.de

Gunter Reinig \*\*

\*\* Lehrstuhl für Regelungssysteme und  
Steuerungstechnik  
Ruhr-Universität Bochum  
44780 Bochum  
Tel.: 0234 / 32 24060  
Fax: 0234 / 32 14155  
Email: reinig@rus.ruhr-uni-bochum.de

**Schlüsselwörter:** Anlagenweite Bewertung der Regelgüte, Trennung stationärer und instationärer Messdaten

In modernen kontinuierlichen verfahrenstechnischen Anlagen liegen bis zu einigen Tausend Regelkreise vor, die wichtige Prozessgrößen stabilisieren sollen. Die Güte dieser großen Anzahl von Regelungen ist 'manuell' nicht zu überwachen, so dass in den letzten Jahren verschiedene Methoden entwickelt worden sind, die es dem Anwender ermöglichen, eine Gütebewertung von Regelungen im laufenden Betrieb durchzuführen [1].

Hierbei nutzt man die während des Betriebs anfallenden Prozessdaten (z. B. die Zeitreihen von Sollwert, Stellgröße und Regelgröße) zur Bewertung der Regelgüte und zur Diagnose von vorliegenden Fehlern in der Regelung. Diese Methoden lassen sich in zwei Klassen einteilen; die eine Klasse stellt Methoden zur Verfügung, die stationäre Messreihen untersuchen, z. B. [2], die andere Klasse stellt Methoden zur Verfügung, die instationäre Messreihen untersuchen, z. B. [3], hierbei kann es sich z. B. um die Analyse von Sprungantworten handeln.

Um diese Methoden erfolgreich in der Praxis anwenden zu können, benötigt man möglichst einfache Methoden zur Unterteilung einer großen Anzahl von Messreihen in stationäre und instationäre Anteile. Hierbei hat sich die Anwendung von nichtparametrischen statistischen Methoden als sehr vielversprechend gezeigt. Nichtparametrische statistische Methoden haben gegenüber den parametrischen statistischen Methoden Vorteile. Zum Beispiel ist keine Annahme über die Verteilung nötig, sie sind sehr robust und einfach anzuwenden, so dass eine Untersuchung von einer großen Menge von Messdaten bequem durchführbar ist [4].

### Literatur:

- [1] Dittmar, R., Bebar, M., Reinig, G.: Control Loop Performance Monitoring - Motivation, Methoden, Anwenderwünsche. Automatisierungstechnische Praxis 45 (2003) 4, S.94-103
- [2] Desborough, L. D., Harris, T. J.: Performance assessment measures for univariate feedback control. Canadian Journal of Chemical Engineering 70 (1992) S. 1186-1197.
- [3] Swanda, A., Seborg, D. A.: Controller performance assessment based on setpoint response data. Proceedings of the American Control Conference San Diego 1999, S. 3863-3867
- [4] Büning, H., Trenkler, G.: Nichtparametrische statistische Methoden, de Gruyter, 1994



Trajektorien aufprägen. Die Algorithmen sind ausschließlich von polynomieller Komplexität niedrigen Grades.

Die Einbettung der Zustände und Eingänge eines Automaten in reelle Vektorräume erlaubt allerdings auch die direkte Einbeziehung nichtdeterministischen Verhaltens in die Dynamik des Automaten. So ermöglicht die Darstellung der  $n$  Automatenzustände als Basisvektoren des  $n$ -dimensionalen reellen Raumes die Behandlung nicht determinierter Zustände als Linearkombination der Basisvektoren. Genauso können die  $p$  Steuerungen als Basisvektoren des  $p$ -dimensionalen reellen Raumes durch Linearkombination simultan an den Automaten angelegt werden. Insofern beinhaltet eine Matrixgleichung  $x' = Ax + Bu$  zur Beschreibung eines nichtdeterministischen gesteuerten Automaten ein weit reichhaltigeres dynamisches Verhalten, als es mit anderen algebraischen Darstellungen der Transition von Automaten möglich ist. In Verfahren zur Reglersynthese wird davon intensiv Gebrauch gemacht.

Eine Erweiterung dieser Grundidee liegt nahe. So beinhalten Linearkombinationen in reellen Räumen nicht nur die mengentheoretische Zugehörigkeit von Basisvektoren zu einem Vektor, sondern auch ein Maß dieser Zugehörigkeit. Damit ist die Grundlage für eine probabilistische Modellierung der Zustände und Steuerungen eines Automaten gelegt. Ein darauf aufbauender Regler kann nicht nur Steuerungen zu einem Zustand vorgeben, er kann auch eine Wahrscheinlichkeit oder ein Maß der Zweckmäßigkeit einer Steuerung zu einer bestimmten Konstellation nichtdeterministischer Zustände charakterisieren.

Im Vortrag werden die vorgestellten Verfahren zur Modellierung und Analyse von nichtdeterministischen gesteuerten Automaten und zur Synthese von Steuerungen anhand verschiedener Spezifikationen an Beispielen erläutert.

## Literatur:

- [1] X.-R. Cao, G. Cohen, A. Giua, W. M. Wonham, J. H. van Schuppen: *Unity in Diversity, Diversity in Unity: Retrospective and Prospective Views on Control of Discrete Event Systems*. Discrete Event Dynamic Systems: Theory and Applications, 12:253-264, 2002
- [2] D. Franke: *Sequentielle Systeme*. Vieweg, Braunschweig, Wiesbaden, 1994
- [3] Ch. G. Cassandras, St. Lafortune: *Introduction to Discrete Event Systems*. Kluwer, Boston etc., 1999
- [4] J. Sonnenberg: *Verfahren zur linearen Modellierung dynamischer ereignisdiskreter Systeme mittels Walsh-Funktionen*. Fortschrittsberichte VDI 8/811, Düsseldorf, 2000
- [5] Ch. Preusse: *Analyse und Synthese von Automaten in Zustandsraumdarstellung*. In Vorbereitung, VDI, 2005

