

25. - 27. Februar 2009

# Programm

**Kurzfassungen zum Download unter:**

[www.iitb.fraunhofer.de/Boppard](http://www.iitb.fraunhofer.de/Boppard)

## Mittwoch, 25. Februar 2009

Nachmittags **Anreise**

**18:00** **Abendessen** im Bellevue Rheinhotel

## Donnerstag, 26. Februar 2009

**08:15 - 08:30** **Eröffnung und Begrüßung (Raum 1)**  
*Prof. Dr.-Ing. Boris Lohmann*

	Raum 1	S.	Raum 2	S.
<b>08:30 - 10:00</b>	<b>Prädiktive und Robuste Regelung</b> Sitzungsleitung: Prof. Dr.-Ing. Jörg Raisch		<b>Automatisierungstechnik 1</b> Sitzungsleitung: Prof. Dr.-Ing. Lothar Litz	
08:30 - 09:00	Echtzeitfähiger Einsatz von Intervallmethoden zur Trajektorienplanung und modell-prädiktiven Regelung unsicherer dynamischer Systeme <i>Andreas Rauh (Lehrstuhl für Mechatronik, Universität Rostock, Prof. Aschemann, Gr. 24)</i>	1	Ein modellbasierter Ansatz für die automatische Überwachung von Produktflusswegen <i>Gustavo Quiros (Lehrstuhl für Prozessleittechnik, RWTH Aachen, Prof. Eppler, Gr. 1)</i>	7
09:00 - 09:30	Prädiktive Regelung großer Kühlsysteme mit geschalteten Dynamiken <i>Christian Sonntag (Lehrstuhl für Systemdynamik und Prozessführung, TU Dortmund, Prof. Engell, Gr. 8)</i>	3	Entwicklung formaler Begriffssysteme (zur Präzisierung von) für Eigenschaften von Automatisierungssystemen <i>Prof. E. Schnieder (Institut für Verkehrssicherheit und Automatisierungstechnik, TU Braunschweig, Gr. 4)</i>	8
09:30 - 10:00	Dynamische Positionierung mit Nanometerpräzision <i>Arvid Amthor (Institut für Automatisierungs- und Systemtechnik, TU Ilmenau, Prof. Ament, Gr. 15)</i>	5	Interaktive 3D-Visualisierung zur Unterstützung des Operators in Training und Prozessführung <i>Dorothea Pantförder (Fachgebiet Eingebettete Systeme, Universität Kassel, Prof. Vogel-Heuser, Gr. 19)</i>	10

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

25. - 27. Februar 2009

<b>10:30 - 12:00 Fahrzeuge</b> Sitzungsleitung: Prof. Dr.-Ing. Ansgar Trächtler		<b>Hybride Systeme und Netzwerke</b> Sitzungsleitung: Prof. Dr.-Ing. Stefan Kowalewski	
10:30 - 11:00	Ein analytisches Optimierungsverfahren zur segmentübergreifenden Bahnplanung für die autonome Fahrzeugführung in einer städtischen Umgebung <i>Jörn Marten Wille (Institut für Regelungstechnik, TU Braunschweig, Prof. Maurer, Gr. 4)</i>	<b>12</b> Ein-/Ausgangsbasierter Entwurf hierarchischer ereignisdiskreter Steuerungssysteme <i>Sebastian Perk (Lehrstuhl für Regelungstechnik, Universität Erlangen-Nürnberg, Prof. Moor, Gr. 12)</i>	<b>18</b>
11:00 - 11:30	Erfassung und Integration streckenbezogener Verkehrslageinformationen <i>Matthias Körner (Institut für Verkehrstelematik, TU Dresden, Prof. Krimmling, Gr. 10)</i>	<b>14</b> Spatially Interconnected Modeling and Controller Synthesis for Flow Transition Problems <i>Saulat Chughtai (Institut für Regelungstechnik, Technische Universität Hamburg-Harburg, Prof. Werner, Gr. 13)</i>	<b>20</b>
11:30 - 12:00	Nichtlineare Regelung der Motordrehzahl und des Momentenvorhalts im Leerlauf und beim Anfahrvorgang <i>Benedikt Alt (Institut für Steuer- und Regelungstechnik, Universität der Bundeswehr München, Prof. Svaricek, Gr. 22)</i>	<b>16</b> Neue Analyse- und Entwurfsmethoden für kooperierende Systeme unter Berücksichtigung von Kommunikationsbeschränkungen <i>Ulrich Münz (Institut für Systemtheorie und Regelungstechnik, Universität Stuttgart, Prof. Allgöwer, Gr. 27)</i>	<b>22</b>

**12:00 - 14:30 Mittagessen/Pause**

<b>14:30 - 16:00 Robotik</b> Sitzungsleitung: Prof. Dr.-Ing. Torsten Bertram		<b>Flachheit und PDE-Systeme</b> Sitzungsleitung: Prof. Dr.-Ing. Oliver Sawodny	
14:30 - 15:00	Ein diskret-kontinuierliches auf Aktionsprimitiven basierendes Regelungskonzept für humanoide Roboter <i>Giulio Milighetti (Fraunhofer-Institut für Informations- und Datenverarbeitung Karlsruhe, Prof. Beyerer, Gr. 18)</i>	<b>26</b> Reglerentwurf anhand von Approximationsmodellen für örtlich verteilte Systems <i>Jan Schlake (Institut für Automatisierungstechnik, TU Darmstadt, Prof. Konigorski, Gr. 7)</i>	<b>35</b>
15:00 - 15:30	Entwurf und Regelung von Telepräsenzsystemen vom Admittanz-Typ <i>Angelika Peer (Lehrstuhl für Steuerungs- und Regelungstechnik, TU München, Prof. Buss, Gr. 21)</i>	<b>28</b> Passivitätsbasierte Regelung von Brennstoffzellen <i>Michael Mangold (IFAT, Universität Magdeburg, Prof. Kienle, Gr. 20)</i>	<b>37</b>
15:30 - 16:00	Dynamische Grundflächenrekonstruktion beliebiger Objekte aus sequentiellen Entfernungsmessungen eines mobilen Roboters <i>Marko Reimer (Fachgebiet Echtzeitsysteme, Leibniz-Universität Hannover, Prof. Wagner, Gr. 14)</i>	<b>30</b> Flachheitsbasierte Reglerumschaltstrategie für Ein- und Mehrgrößensysteme <i>Semir Osmic (Institut für Regelungstechnik und Mechatronik, Universität Paderborn, Prof. Trächtler, Gr. 23)</i>	<b>39</b>

**16:00 - 16:30 Kaffee-/Teepause**

<b>16:30 - 17:30</b>	<b>Plenarvortrag</b> Wissenschaft im Weltraum: Was zum Teufel machen Astronauten im Himmel? <i>Prof. Dr. rer. nat. Ulrich Walter (Lehrstuhl für Raumfahrttechnik, TU München)</i>	<b>S. 41</b>
----------------------	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--------------

**18:30 Abendessen**

## Freitag, 27. Februar 2009

08:30 - 10:00 <b>Anwendungen</b> Sitzungsleitung: Prof. Dr.-Ing. Dirk Abel		<b>Lineare Systeme</b> Sitzungsleitung: Prof. Dr. rer. nat. Claus Hillermeier		
08:30 - 09:00	Modellbasierte Regelung von Entnahmedampfturbinen <i>Wolfgang Grote (Lehrstuhl für Regelungssysteme und Steuerungstechnik, Ruhr-Universität Bochum, Prof. Reinig, Gr. 3)</i>	<b>42</b>	Ausgangsrückführungen für lineare MIMO-Systeme mit Stellgrößenbeschränkungen: LMI-basierter Entwurf <i>Hendrik Lens (Institut für Automatisierungstechnik, TU Darmstadt, Prof. Adamy, Gr. 7)</i>	<b>48</b>
09:00 - 09:30	Roll to roll systems: methods for moving web strain and tension determination <i>Vincent Gassmann (Web Handling Research Group, Université de Strasbourg, Prof. Knittel, Gr. 25)</i>	<b>44</b>	Time Domain Model Reduction by Moment Matching <i>Rudy Eid (Lehrstuhl für Regelungstechnik, TU München, Prof. Lohmann, Gr. 22)</i>	<b>49</b>
09:30 - 10:00	Der intelligente Autositz - Modellbasierte Komfortregelung in aktiv klimatisierten Sitzen <i>Carolin Zschippig (BIMAQ, Universität Bremen, Prof. Goch, Gr. 5)</i>	<b>46</b>	Stabilität und Regelung von Systemen mit unsicherer zeitvarianter Abtast- und Totzeit <i>Daniel Görge (Lehrstuhl für Regelungssysteme, TU Kaiserslautern, Prof. Liu, Gr. 16)</i>	<b>50</b>

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

10:30 - 12:00 <b>Messen und Beobachten</b> Sitzungsleitung: Prof. Dr.-Ing. Georg Bretthauer		<b>Automatisierungstechnik 2</b> Sitzungsleitung: Prof. Dr.-Ing. Rudibert King		
10:30 - 11:00	Entwicklung robuster PI-Beobachter für unbekannte Eingänge sowie nichtlineare Systeme <i>Yan Liu (Lehrstuhl Steuerung, Regelung und Systemdynamik, Universität Duisburg-Essen, Prof. Söffker, Gr. 11)</i>	<b>52</b>	Prozessüberwachung bei der Produktion von Starterkulturen unter Zuhilfenahme Neuronaler Netze <i>Joachim Hörrmann (Lehrstuhl für Automatisierungs- und Regelungstechnik, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, Prof. Röck, Gr. 24)</i>	<b>58</b>
11:00 - 11:30	Zustandsmengenbeobachtung zur konsistenzbasierten Fehlerdiagnose nichtlinearer Systeme <i>Florian Wolff (Institut für Steuerungs- und Regelungssysteme, Universität Karlsruhe, Prof. Krebs, Gr. 17)</i>	<b>54</b>	Systemtechnische Methoden für die Betriebsführung von Energiesystemen mit dezentralen fluktuierenden Erzeugern <i>Peter Bretschneider (Fraunhofer Anwendungszentrum Systemtechnik Ilmenau, Prof. Ament, Dr. Rauschenbach, Gr. 15)</i>	<b>60</b>
11:30 - 12:00	Kreisellooses System zur Bestimmung der Nordrichtung mit Beschleunigungssensoren <i>Tom Pöthig (Lehrstuhl für Regelungssysteme und Leittechnik, BTU Cottbus, Prof. Lappus, Gr. 2)</i>	<b>56</b>	Effiziente Aggregation von Markov-Modellen für Sicherheitsnachweise in der Mechatronik <i>Michael Blum (Lehrstuhl für Informationstechnik im Maschinenwesen, TU München, Prof. Schiller, Gr. 23)</i>	

**12:00 - 12:30 Abschluss/Preisverleihung durch einen Vertreter der IAV GmbH; Aufruf für Boppard 2010**

**12:30 - 13:30 Mittagessen**

**13:30 Ende des Kolloquiums**

# Echtzeitfähiger Einsatz von Intervallmethoden zur Trajektorienplanung und modell-prädiktiven Regelung unsicherer dynamischer Systeme

Andreas Rauh \*

\* Lehrstuhl für Mechatronik  
Universität Rostock  
Justus-von-Liebig-Weg 6  
18059 Rostock  
Tel.: 0381/ 498-9216  
Fax: 0381/ 498-9092

e-Mail: andreas.rauh@uni-rostock.de

Harald Aschemann \*\*

\*\* Lehrstuhl für Mechatronik  
Universität Rostock  
Justus-von-Liebig-Weg 6  
18059 Rostock  
Tel.: 0381/ 498-9210  
Fax: 0381/ 498-9092

e-Mail: harald.aschemann@uni-rostock.de

**Schlüsselwörter:** Trajektorienplanung, modell-prädiktive Regelung, Intervallararithmetik, Unsicherheiten, differential-algebraische Gleichungssysteme, Robustheit, Optimierung

Mittels intervallararithmetischer Simulationsverfahren lässt sich für dynamische Modelle regelungstechnischer Systeme ein garantierter Nachweis über die Einhaltung von Zustands- und Stellgrößenbeschränkungen führen. In einer Vielzahl von Arbeiten wurden hierzu Simulationsverfahren entwickelt, mit denen sowohl für zeitdiskrete als auch für zeitkontinuierliche mathematische Modelle Intervalle berechnet werden können, die eine garantierte Einschließung der Menge aller erreichbaren Systemzustände darstellen. Dabei lassen sich unmittelbar wertebereichsbeschränkte Unsicherheiten der Systemparameter und Anfangsbedingungen eines dynamischen Prozesses berücksichtigen.

In bisherigen Forschungsarbeiten stand dabei eine während der Entwurfsphase von Steuerungen und Regelungen durchgeführte Verifikation im Mittelpunkt [2]. Im Gegensatz zu klassischen Ansätzen für den Entwurf von Steuerungen und Regelungen, bei denen der Entwurf zunächst für ein nominales Systemmodell durchgeführt wird, und erst im Anschluss ein Robustheitsnachweis erfolgt, werden Fragestellungen der Robustheit, Optimalität und Zulässigkeit einer Steuerungs- oder Regelungsstrategie bei einem intervallbasierten Entwurfsverfahren immer als untrennbare Gesamtheit betrachtet. Diese Ansätze lassen sich um Routinen zum Nachweis der Erreichbarkeit sowie Beobachtbarkeit von Zuständen nichtlinearer dynamischer Modelle unter Berücksichtigung wertebereichsbeschränkter Unsicherheiten erweitern.

In [2] wurde das Ziel verfolgt, ein möglichst allgemein einsetzbares Rahmenwerk zu realisieren, das sich sowohl für die rechnergestützte Analyse und Synthese von Steuerungen und Regelungen für dynamische Systemmodelle mit wertebereichsbeschränkten Unsicherheiten als auch für ihre Simulation in Verbindung mit Sensitivitätsuntersuchungen bezüglich der wichtigsten Parameter nutzen lässt. Durch die Wiederverwendung von grundlegenden Modulen, welche für

- die Simulation, den Robustheitsnachweis und die dynamische Optimierung unter Berücksichtigung von Parameterunsicherheiten,
- die Analyse und Synthese dynamischer Systemmodelle sowie
- die Anwendung auf zeitdiskrete und zeitkontinuierliche Beschreibungsformen

benötigt werden, ist eine Verwendung für eine breite Klasse von Anwendungen gewährleistet. Die in [2] entwickelten Algorithmen wurden in MATLAB mittels der Toolbox INTLAB beziehungsweise in C++ mittels PROFIL/BIAS umgesetzt.

Auf dieser Arbeit aufbauend wird im Rahmen dieses Beitrages ein Ansatz vorgestellt, der es erlaubt, Intervallmethoden auch im Kontext einer modell-prädiktiven Regelung im echtzeitfähigen Einsatz zu nutzen. Hierzu wird ein auf dem zur Simulation expliziter gewöhnlicher Dif-

ferentialgleichungssysteme entwickelten Programmpaket VALENCIA-IVP basierender Ansatz zur verifizierten Auswertung differential-algebraischer Gleichungssysteme verwendet [3]. Der Grundgedanke bei der intervallbasierten Systeminversion besteht darin, geeignete Stellgrößenverläufe für zeitkontinuierliche dynamische Prozesse numerisch derart zu bestimmen, dass die jeweiligen Ausgangsgrößen – im Rahmen vom Anwender vorgegebener Toleranzen – mit gewünschten Zeitverläufen übereinstimmen.

Zu diesem Zweck wird das mathematische Modell des zu steuernden oder regelnden Prozesses, welcher zunächst durch ein System von gewöhnlichen Differentialgleichungen  $\dot{x}(t) = f(x(t), p(t), u(t), t)$  mit den Stellgrößen  $u(t)$  beschrieben ist, um zusätzliche algebraische Gleichungen für die Trajektorienplanung und Systeminversion erweitert.

Diese algebraischen Gleichungen  $0 = g(x(t), q(t), t) = \tilde{g}(x(t), q(t)) - x_{\text{des}}(t)$  charakterisieren das gewünschte Zeitverhalten des Prozesses. Sämtliche Gleichungen beinhalten Intervallparameter  $q \in [\underline{q}; \bar{q}]$  zur Angabe zulässiger Abweichungen zwischen dem idealen Verlauf der Trajektorie  $x_{\text{des}}(t)$  und den im Extremfall zulässigen Abweichungen. Zusätzlich werden Modellierungsfehler und Störgrößen in der Systemdynamik durch die Intervallparameter  $p \in [\underline{p}; \bar{p}]$  berücksichtigt. Zusammengefasst resultiert aus dem obigen erweiterten Systemmodell ein differential-algebraisches Gleichungssystem, welches somit auch eine Modellierung des zu steuernden Prozesses als implizites System gewöhnlicher Differentialgleichungen oder differential-algebraischer Gleichungen zulässt.

Auf Basis dieses Systemmodells lassen sich nun drei Lösungsansätze unterscheiden. In den ersten beiden Ansätzen wird für Modelle mit nominalen Parametern eine modellbasierte Trajektorienberechnung ermöglicht. (1) Für differentiell flache Systeme, für die Solltrajektorien des flachen Ausgangs vorgegeben werden, lassen sich die zugehörigen Steuerungen bis zu einem gewissen Komplexitätsgrad symbolisch berechnen. (2) Eine Ausweitung auf höherdimensionale Systeme kann mittels nicht verifizierter numerischer Lösungsansätze für differential-algebraische Gleichungssysteme erfolgen. Hierbei hat sich insbesondere das Programm DAETS als sehr leistungsfähig erwiesen, da es sich gegenüber anderen Ansätzen durch eine höhere Simulationsgüte und durch geringere Einschränkungen in Bezug auf den maximal möglichen differentiellen Index auszeichnet [1]. (3) Intervallmethoden spielen für die verifizierte Problemlösung bei unsicherheitsbehafteten Systemmodellen eine wesentliche Rolle. Neben der Einhaltung gewünschter Ausgangsgrößenverläufe und der Berücksichtigung von Toleranzen lassen sich durch die Verwendung von VALENCIA-IVP auch Stellgrößenbeschränkungen berücksichtigen und – im Fall ihrer Verletzung – geeignete Modifikationen der vorgegebenen Sollverläufe der Zustandsgrößen ableiten [3].

In diesem Vortrag wird neben der offline durchgeführten Simulation und Trajektorienplanung für differential-algebraische Systemmodelle ein echtzeitfähiger Einsatz von Intervallmethoden zur modell-prädiktiven Regelung eines Wärmeleiters als typischem Vertreter eines verteilt-parametrischen Systems vorgestellt.

## Literatur:

- [1] Nedialkov, N.S.; Pryce, J.D.: *DAETS – Differential-Algebraic Equations by Taylor Series*, <http://www.cas.mcmaster.ca/~nedialk/daets/>, 2008.
- [2] Rauh, A.: *Theorie und Anwendung von Intervallmethoden für Analyse und Entwurf robuster und optimaler Regelungen dynamischer Systeme*, Dissertation, Universität Ulm, Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 8, Nr. 1148, 2008.
- [3] Rauh, A.; Auer, E.: *Validated Simulation of ODEs and DAEs in VALENCIA-IVP*, Book of Abstracts of SCAN 2008, <http://www.scan2008.com/>, El Paso, Texas, USA, 2008.

# Prädiktive Regelung großer Kühlsysteme mit geschalteten Dynamiken

Christian Sonntag

Sebastian Engell

Lehrstuhl für Systemdynamik und Prozessführung  
Technische Universität Dortmund  
Emil-Figge-Strasse 70, 44227 Dortmund  
Telefon: +49 231 755 {5341 | 5126}  
Fax: +49 231 755 5129  
E-Mail: {c.sonntag | s.engell}@bci.tu-dortmund.de

**Schlüsselwörter:** Hybride Systeme, Kühlsysteme, Prädiktive Regelung, Modelldekomposition

In den Verkaufsräumen nahezu aller Supermärkte werden große Kühlsysteme eingesetzt, um die Temperatur verderblicher Produkte in engen Grenzen zu halten und somit eine größtmögliche Haltbarkeit zu gewährleisten. Abb. 1 zeigt eine schematische Darstellung eines solchen Supermarkt-Kühlsystems. Die Kühlung der Vitrinen wird durch die Versorgung mit einem flüssigen Kühlmittel durch Expansionsventile erreicht. Das Kühlmittel verdampft in den Vitrinen bei niedrigem Druck und nimmt somit thermische Energie auf. Das über ein Sammelrohr aus den Vitrinen ausströmende gasförmige Kühlmittel wird über mehrere Kompressoren auf ein hohes Druckniveau gebracht. Dem Gas wird im nachgeschalteten Kondensator wieder thermische Energie entzogen und das flüssige Kühlmittel wieder in die Vitrinen zurückgeführt. Da diese Kühlsysteme oft nur diskret geschaltete Eingänge (Ventile und Kompressoren) aufweisen und die nichtlinearen kontinuierlichen Dynamiken sich zudem mit dem Schalten dieser Eingänge qualitativ ändern, gehören Supermarkt-Kühlsysteme zur Klasse der *hybriden dynamischen Systeme*.

Die Regelung von Supermarkt-Kühlsystemen ist heutzutage dezentral ausgelegt, d. h. die Ventile und Kompressoren werden durch getrennte Steuereinrichtungen so geschaltet, dass die Temperaturen in den Vitrinen und der Druck im Gas-Sammelrohr innerhalb gültiger Grenzen bleiben. Eines der Hauptprobleme dieser Strategie liegt in unerwünschten Interaktionen zwischen den Regelkreisen, die dazu führen, dass die Schaltungen der Expansionsventile zeitlich synchronisiert werden (siehe z. B. [2]). Dieses Verhalten erzeugt starke Fluktuationen des Drucks im Gas-Sammelrohr und führt somit zu einer hohen Abnutzung der Kondensatoren, da diese unverhältnismäßig oft zu- oder abgeschaltet werden müssen, um den Druck im erlaubten Bereich zu halten. Weiterhin führt die dezentrale Strategie oft zu übermäßig starken Variationen der Temperaturen in den Vitrinen, die die Haltbarkeit der Lebensmittel negativ beeinflussen können. Aus diesen Gründen wurden in den

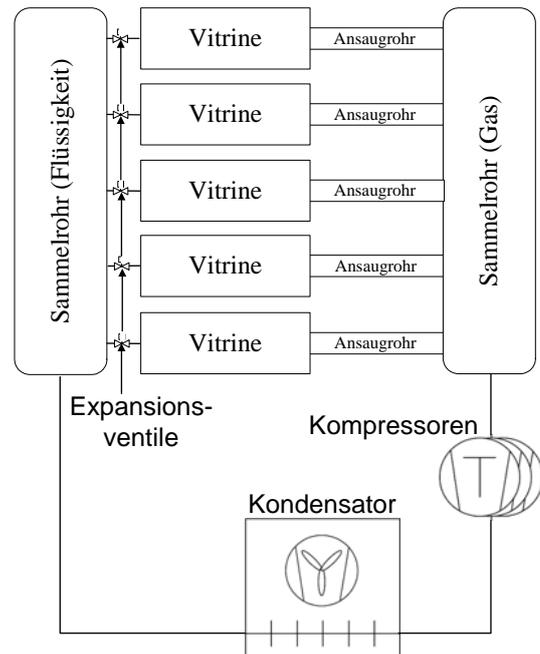


Abbildung 1: Schema eines großen Supermarkt-Kühlsystems [1].

letzten Jahren verschiedene modellprädiktive optimierungsbasierte Regelungsansätze zur zeitlichen Desynchronisation der Temperaturen in den Vitrinen entwickelt, die sowohl auf linearen [3] als auch auf nichtlinearen Prozessmodellen [4-6] basieren. Obwohl all diese Regelungsansätze signifikante Verbesserungen im Vergleich zur dezentralen Regelung erreichen, ist die Echtzeitregelung von Systemen mit vielen Kühlvitrinen (und entsprechend komplexen Prozessmodellen) mit diesen Ansätzen noch nicht möglich.

In diesem Vortrag wird ein echtzeitfähiger Ansatz zur prädiktiven Regelung großer Kühlsysteme vorgestellt, der auf zwei Ebenen arbeitet. Auf einer unteren Ebene schalten einfache ereignis- und zeitgesteuerte Regler die diskreten Eingänge während ein prädiktiver Regler auf der oberen Ebene die Parameter dieser Regler variiert. Die Echtzeitfähigkeit dieser Regelungsstrategie für große Systeme wird zum einen durch eine geeignete Dekomposition der Anlage erreicht. Basierend auf einer Sensitivitätsanalyse werden hier Anlagenteile identifiziert, die zur Auslegung des prädiktiven Reglers getrennt betrachtet werden können. Hierdurch wird die Komplexität des Regelungsproblems signifikant verringert. Zum anderen wird in der prädiktiven Regelung kein dynamisches Prädiktionsmodell zur Bestimmung der optimalen Reglerparameter benutzt. Da das geregelte Kühlsystem zu einer wichtigen Unterklasse der hybriden Systeme, zu den sogenannten *ereignisgesteuerten kontinuierlichen Systemen* gehört, kann das Systemverhalten an den Schaltzeitpunkten der unterlagerten Regler algebraisch approximiert werden, wie z. B. in [7,8] beschrieben. Somit kann die modellbasierte Bestimmung optimaler Reglerparameter sehr effizient durchgeführt werden.

Tests an einem rigorosen Simulationsmodell eines sehr großen Kühlsystems mit 10 Kühlvitrinen zeigen die Echtzeitfähigkeit der entwickelten Strategie bei erhöhter Regelgüte im Vergleich zu vorherigen Ansätzen.

### Literatur:

- [1] L. F. S. Larsen, R. I. Zamanabadi, R. Wisniewski und C. Sonntag: Supermarket Refrigeration Systems - A Benchmark for the Optimal Control of Hybrid Systems. Technischer Bericht für das europäische Exzellenznetzwerk HYCON, 2007, <http://tinyurl.com/23nrkc>.
- [2] R. Wisniewski und L. F. S. Larsen: Method for Analysis of Synchronization Applied to Supermarket Refrigeration System. In *Proc. 17<sup>th</sup> IFAC World Congress*, Seoul, Korea, 2008, 3665-3670.
- [3] L. F. S. Larsen, T. Geyer und M. Morari: Hybrid MPC in Supermarket Refrigeration Systems. In *Proc. 16th IFAC World Congress*, 2005.
- [4] C. Sonntag, A. Devanathan und S. Engell: Hybrid NMPC of a Supermarket Refrigeration System using Sequential Optimization. In *Proc. 17<sup>th</sup> IFAC World Congress*, Seoul, Korea, 2008, 13901-13906.
- [5] C. Sonntag, A. Devanathan, S. Engell und O. Stursberg: Hybrid Nonlinear Model-Predictive Control of a Supermarket Refrigeration System. In *Proc. 16th Int. Multi-Conference on Systems and Control (MSC)*, Singapore, 2007, 1432-1437.
- [6] D. Sarabia, F. Capraro, L. F. S. Larsen und C. de Prada: Hybrid Control of a Supermarket Refrigeration System. In *Proc. American Control Conference*, New York, USA, 2007, 4178-4185.
- [7] A. Schild und J. Lunze: Stabilisierung der periodischen Betriebsweise ereignisgesteuerter kontinuierlicher Systeme. *42. Regelungstechnisches Kolloquium*, Boppard, 2008.
- [8] H. Dankowicz und P. T. Piiroinen: Exploiting Discontinuities for Stabilization of Recurrent Motions. In *Dynamical Systems 17*, 2002, 317-342.

# Dynamische Positionierung mit Nanometer- präzision

Arvid Amthor \*

Christoph Ament \*\*

\* Systemanalyse/Informatik und Automatisierung  
TU Ilmenau  
Gustav-Kirchhoff-Str. 1, 98693 Ilmenau  
03677/691467  
03677/691434  
arvid.amthor@tu-ilmenau.de

\*\* Systemanalyse/Informatik und Automatisierung  
TU Ilmenau  
Gustav-Kirchhoff-Str. 1, 98693 Ilmenau  
03677/692815  
03677/691434  
christoph.ament@tu-ilmenau.de

**Schlüsselwörter:** Nanopositionierung, Trajektorienfolgeregelung, Reibkompensation, nichtlineare Regelungen

Derzeit werden zur präzisen Vermessung von Objekten hochgenaue Positioniertische verwendet, um die Probe unter einem beliebigen Messsystem zu positionieren. Die Position muss dabei ständig mit der geforderten Auflösung nachgeführt werden, um exogenen Einflüssen aktiv entgegenzuwirken. Die aktuelle Forschungstätigkeit auf dem Gebiet der Nanopositionierung ist geprägt von einer ständigen Vergrößerung der Arbeitsvolumina dieser Positioniersysteme. Zur Lagerung der Bewegungsachsen werden Kugelführungen eingesetzt, um die Vakuumtauglichkeit dieser Maschinen zu gewährleisten. Um die Messdauer von großen Prüflingen auf heutigem Niveau zu halten, muss die derzeit gebräuchliche stationäre durch eine dynamische Messstrategie ersetzt werden. Das dynamische Verhalten der eingesetzten mehrheitlich klassisch motivierten Regelungsansätze ist aber unzureichend und so bietet eine modellbasierte Folgeregelung erhebliches Verbesserungspotential (siehe Abb. 1).

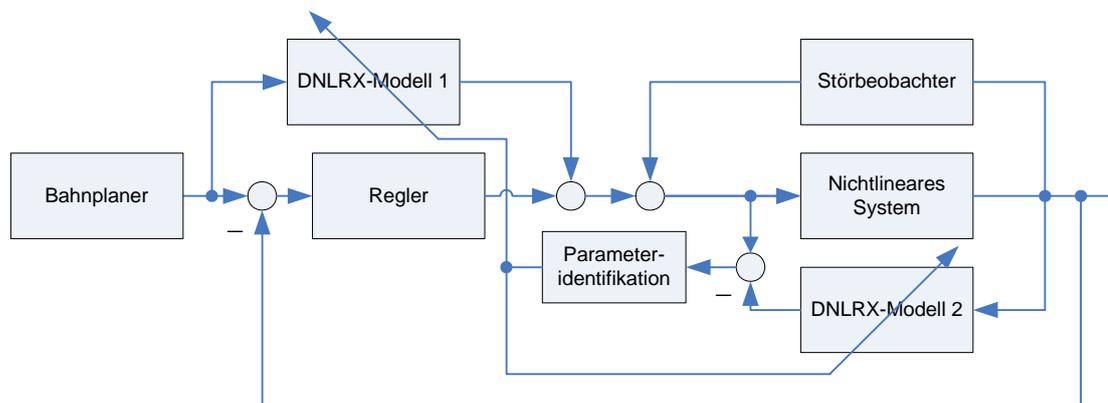


Abbildung 1: Struktur der eingesetzten Trajektorienfolgeregelung

Die Anwendung eines solchen Konzeptes für Positioniergenauigkeiten im Nanometerbereich gestaltet sich jedoch recht problematisch, da das bisher vernachlässigte stark nichtlineare Reibverhalten der Kugelführungen explizit mit betrachtet werden muss. Zur Lösung des Problems wird das dynamische Verhalten des 200x200 mm<sup>2</sup> xy-Demonstrators (siehe Abb. 2) mit Hilfe des sog. "The Dynamic NonLinear Regression with direct application of eXcitation" (DNLRX)-Modells abgebildet [3]. Während der Modellbildung zeigt sich, dass die Reibkraft aufgrund von Normalkraftwechseln, Staub und produktionsbedingten Toleranzen ein zusätzlich stark positionsabhängiges Verhalten zeigt. Um dieser Erkenntnis Rechnung zu tragen, wird das eingesetzte DNLRX-Modell um eine onlinefähige Nachführung der linearen Modellparameter erweitert.

Hierzu werden die linearen und nichtlinearen Parameter offline mit Hilfe eines zweistufigen Optimierungsverfahrens identifiziert und validiert [2]. Anschließend wird das Modell als Vorsteuerung in das Regelungssystem integriert und ein Adaptionsmechanismus für die Schätzung der linearen Modellparameter implementiert.

Eine rekursive Regression auf Basis der U-D-Zerlegung erweist sich als stabil sowie recheneffizient und wird in ausgiebigen experimentellen Untersuchungen erfolgreich eingesetzt. Darüber hinaus wird neben der adaptiven Vorsteuerung eine Störbeobachtung auf Kalman-Filter Basis realisiert mit dem Zweck unmodellierete Störeinflüsse zu kompensieren [1].

Anhand von sinusförmigen und linearen Bewegungen wird gezeigt, dass der dynamische Schleppfehler im Vergleich zu einer klassischen Regelung ohne Vorsteuerung und Störbeobachtung signifikant reduziert werden kann (siehe Abb. 3).

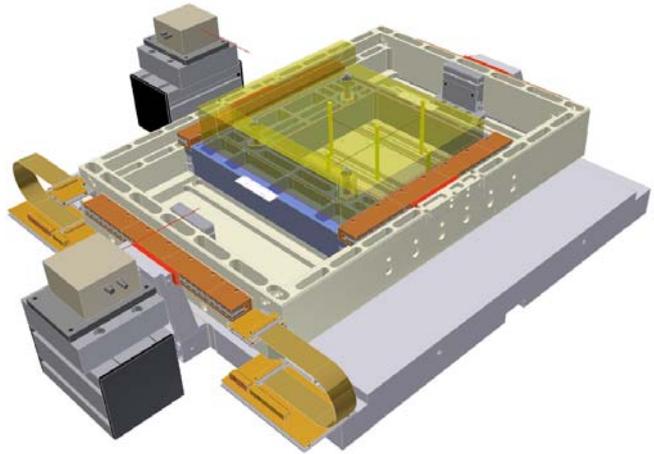


Abbildung 2: Experimenteller Aufbau

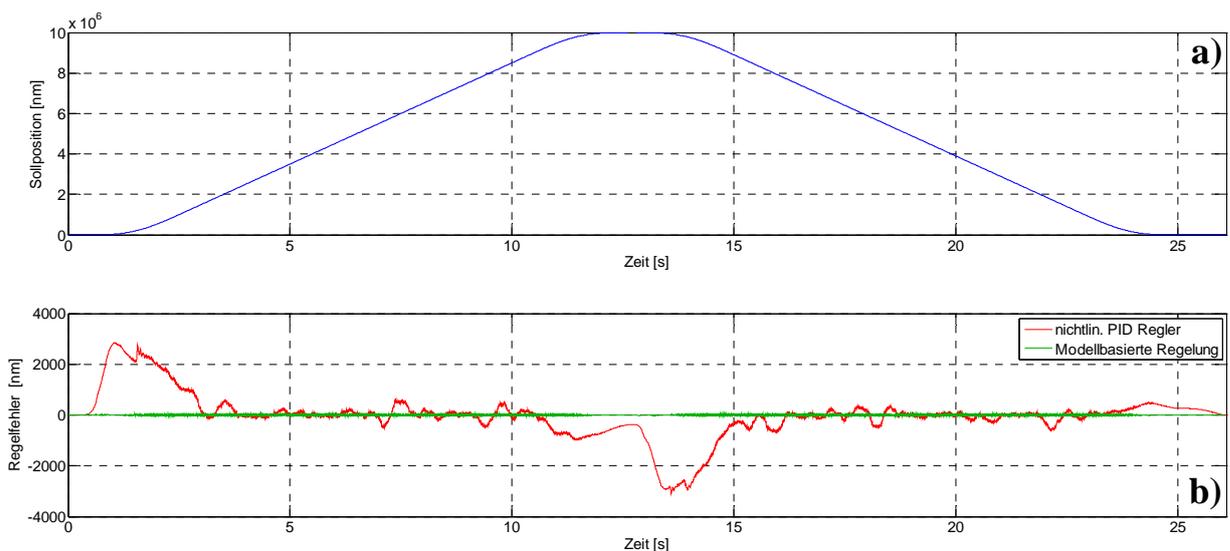


Abbildung 3: Dynamische Sollposition (a) und dynamischer Schleppfehler mit und ohne modellbasierte Folgeregelung (b)

## Literatur:

- [1] AMTHOR, A. ; ZSCHAECK, S. ; AMENT, C.: Position Control on Nanometer Scale based on an Adaptive Friction Compensation Scheme., In: *IECON'08*, Proceedings, Orlando (USA), 2008
- [2] AMTHOR, A. ; HAUSOTTE, T. ; AMENT, C. ; LI, P. ; JÄGER, G.: Friction Identification and Compensation on Nanometerscale., In: *IFAC World Congress 2008*, Proceedings, S. 2014-2019, Seoul, 2008
- [3] RIZOS D.D., FASSOIS S.D., "Friction Identification based upon the LuGre and Maxwell Slip Models", – In: *IFAC World Congress 2005*, Proceedings, Prag, 2005

# Ein modellbasierter Ansatz für die automatische Überwachung von Produktflusswegen\*

Gustavo Quirós M.Sc., Prof. Dr.-Ing. Ulrich Epple  
Lehrstuhl für Prozessleittechnik, RWTH Aachen University  
Turmstraße 46, 52064 Aachen  
g.quirós@plt.rwth-aachen.de

In diesem Beitrag wird ein formales Modell zur Beschreibung von Flusswegen vorgestellt.

In prozesstechnischen Anlagen werden Produkte auf definierten, durch die Struktur der Anlage vorgegebenen Wegen transportiert. Eine Anlage bietet im Allgemeinen ein ganzes Wegenetz mit einer Vielzahl von möglichen Wegen an. Für jeden Transportvorgang wird ein bestimmter Weg ausgewählt und steuerungstechnisch geschaltet. Einen so ausgewählten Weg bezeichnet man als Flussweg. Er beschreibt einen zeitlich und räumlich abgeschlossenen Förderraum. Zu einem Flussweg gehören sowohl die produktdurchflossenen Anlagenelemente als auch die Anlagenelemente, die den Flussweg zur Umgebung hin abschließen. Für den Betrieb stellt sich die Aufgabe Flusswege zu identifizieren, zu verwalten, zu überwachen und zu sichern. So müssen durch eine Analyse aktuell bestehende Flusswege erkannt werden können [7]. Flusswege sind eigene temporäre Objekte, die mit ihren Merkmalen und Zuständen erfasst, in ihrem Lebenszyklus überwacht und dokumentiert werden müssen. Um zu verhindern, dass durch Steuerfehler Stellglieder, die einen Flussweg von seiner Umgebung abgrenzen, geöffnet werden, sind entsprechende Sicherungsmaßnahmen zu treffen. Diese Aufgabenstellung ist direkt vergleichbar mit der Sicherung von Fahrstraßen in Eisenbahnnetzen [5, 6].

In der Prozesstechnik sind zur Zeit keine Modelle zur expliziten Beschreibung von Flusswegen bekannt. Funktionen zur Flusswegverwaltung, Überwachung und Sicherung müssen für jeden möglichen Flussweg speziell projiziert werden. In diesem Beitrag wird ein Konzept vorgestellt, das es erlaubt, Flusswege automatisch zu identifizieren, zu verwalten, zu überwachen und zu sichern. Grundlage ist die Modellierung aller möglichen Transportwege und Stellorgane der Anlage in einer Graphstruktur und die Abbildung des aktuellen Steuerzustands der Anlage auf entsprechende Knotenzustände. Die Ermittlung der Graphstruktur und der aktuellen Zustände im Einzelfall erfolgt regelbasiert aus den Engineering- und den Laufzeitdaten und ist projektionsfrei im Sinne der Idee der Automatisierung der Automatisierung. Die Modellierung der Anwendungsfunktionen erfolgt durch einen dezentralen komponentenbasierten Ansatz. Dabei werden die Knoten des Graphen durch Komponenten repräsentiert, die entsprechend den Kanten miteinander verschaltet sind. Diese Komponenten interagieren kooperativ miteinander und lösen so die geforderten Aufgaben. In der softwaretechnischen Implementierung werden die Komponenten durch IEC 61131-3 Bausteine realisiert und sind so direkt in der leittechnischen

---

\*This research has been partially funded by the DFG Research Training Group 1298 "Algorithmic synthesis of reactive and discrete-continuous systems" (AlgoSyn).




---

Elemente:	$E$
Konnectoren:	$C$
Zuordnung:	$\varepsilon : C \rightarrow E$
Verbindungen:	$\circ \subseteq C \times C$
Mögliche Schaltzustände:	$\beta : C \rightarrow \{0, 1, 0\} \times \{0, 1, 0\}$
Aktuelle Schaltzustände:	$S \subseteq [C \rightarrow \{0, 1\} \times \{0, 1\}]$
Mögliche Verbindungszustände:	$\rightarrow \subseteq E \times E$
Aktuelle Verbindungszustände:	$\overset{\sigma}{\rightarrow} \subseteq E \times E, \sigma \in S$
Flusswege:	$P \subseteq E^+$
Flusswegsicherheitzustand:	$\alpha : P \times S \rightarrow \{0, 1\}$

---

Umgebung lauffähig [3]. Auf dieser Struktur lassen sich auch anspruchsvolle formale Methoden der Informatik (Monotone Dataflow Analysis Frameworks [1], Prozesskalkül [2, 4], Prozesssynchronisation [8]) anwenden. Eine prototypische Implementierung des Konzepts wird zur Zeit in einer petrochemischen Produktionsanlage erprobt.

## Literatur

- [1] Alfred V. Aho, Ravi Sethi, and Jeffrey D. Ullman. *Compilers, Principles, Techniques, and Tools*. Addison-Wesley, 1986.
- [2] C. A. R. Hoare. *Communicating Sequential Processes*. Prentice Hall International Series in Computer Science. Prentice Hall, 1985.
- [3] IEC, International Electrotechnical Commission. *IEC 61131-3 Ed. 1.0 en:1993: Programmable controllers — Part 3: Programming languages*. International Electrotechnical Commission, Geneva, Switzerland, 1993.
- [4] Robin Milner. *Communicating and Mobile Systems: the Pi-Calculus*. Cambridge University Press, June 1999.
- [5] Jörn Pachl. *Railway Operation and Control*. VTD Rail Publishing, Mountlake Terrace, USA, 2004.
- [6] Gustavo Quirós and Ulrich Epple. From railroads to processing plants: Decentralised automatic assurance of product flow paths. In *EKA 2008, Entwurf komplexer Automatisierungssysteme: Beschreibungsmittel, Methoden, Werkzeuge und Anwendungen*, Magdeburg, Germany, 15-17 April, 2008.
- [7] Gustavo Quirós, Martin Mertens, and Ulrich Epple. Function blocks for decentralised analysis of product flow paths. In *ETFA 2008, 13th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation*, Hamburg, Germany, 15-18 September, 2008.
- [8] Avi Silberschatz, Peter Baer Galvin, and Greg Gagne. *Operating System Concepts*. John Wiley & Sons, Inc., 6th edition, 2001.

# Entwicklung formaler Begriffssysteme (zur Präzisierung von) für Eigenschaften von Automatisierungssystemen

Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c.  
Eckehard Schnieder

Institut für Verkehrssicherheit und Automatisierungstechnik  
Technische Universität Braunschweig  
Langer Kamp 8  
38106 Braunschweig  
Tel.: 0531/391-3317  
E-Mail: [e.schnieder@tu-bs.de](mailto:e.schnieder@tu-bs.de)

Viele Begriffe in den anerkannten Regeln der Automatisierungstechnik sind unscharf und z. T. sogar widersprüchlich. Dies ist Ursache für Vertragsstreitigkeiten oder strafrechtliche Probleme, oder auch bei ihrer Interpretation in der technischen Entwicklung und Abnahme.

Eine begriffliche Analyse auf terminologischer und taxonomischer Grundlage und formalisierter Darstellung kann zu einer Präzision und konsistenten Begriffsentwicklung führen.

Die Repräsentation mit modernen Mitteln der Informatik in Form so genannter Ontologien und webbasiertem Zugriff beschleunigt den Reifungs- und Konsolidierungsprozess.

Beispiele zur Verlässlichkeit automatisierungstechnischer Systeme und für automatisierte Bahnübergänge veranschaulichen die Vorgehensweise.



# Interaktive 3D-Visualisierung zur Unterstützung des Operators in Training und Prozessführung

Dipl.-Ing. Dorothea Pantförder

Fachgebiet Eingebettete Systeme  
Universität Kassel  
Wilhelmshöher Allee73, 34121 Kassel  
+49 561 804 - 6026  
+49 561 804 - 6022  
pantfoerder@uni-kassel.de

Prof. Dr.-Ing. Birgit Vogel-Heuser

Fachgebiet Eingebettete Systeme  
Universität Kassel  
Wilhelmshöher Allee73, 34121 Kassel  
+49 561 804 - 6020  
+49 561 804 - 6022  
vogel-heuser@uni-kassel.de

**Schlüsselwörter:** 3D-Prozessdatenvisualisierung, Operatortraining

Die steigende Komplexität industrieller Anlagen, sowohl im verfahrenstechnischen als auch im fertigungstechnischen Bereich sowie intelligenter werdende Gerätetechnik führt zu einer immer weiter steigenden Anzahl von Prozessinformationen. Diese müssen von Operator in zentralisierten Leitwarten überwacht und bewertet werden. Derzeit werden in der klassischen Prozessvisualisierung vorwiegend zweidimensionale Darstellungen verwendet. Diese Visualisierungskonzepte reichen unter Umständen nicht mehr aus, um den Operator geeignet beim Bedienen und Beobachten des Prozesses zu unterstützen. Der Ansatz einer interaktiven 3D-Prozessdatenvisualisierung und ein darauf aufbauendes Training, speziell für die Prozessklasse, für die derzeit kein rigoroses Modell existiert, können den Operator bei seiner Aufgabe weiter unterstützen.

Verschiedene Studien der letzten Jahre haben zum einen gezeigt, dass es in der Prozessführung Vorteile einer 3D-Prozessdatenvisualisierung gibt [1][2][3]. Zum anderen konnte durch die prototypische Entwicklung von 3D-Pattern gezeigt werden, dass diese auch ähnlich einfach einzusetzen ist wie eine herkömmliche 2D-Datenvisualisierung [4].

Über den Nutzen einer 3D-Prozessdatenvisualisierung in Bezug auf bessere Fehlererkennung und/oder schnellere Reaktionszeiten bei der Prozessführung ist bisher nur wenig bekannt. In einem Vorversuch [5] wurde bereits eine 2D mit einer 3D-Prozessdatenvisualisierung vergleichend evaluiert. Das Ergebnis dieser experimentellen Evaluation zeigte schnellere Reaktionszeiten in der 3D-Prozessdatenvisualisierung für komplexe Problemsituationen. Im Gegensatz zu den realen Tätigkeiten eines Operators, die im Rahmen einer Analyse der Arbeitsaufgabe in einer Leitwarte einer kontinuierlichen Hydraulikpresse erhoben wurden, musste die Versuchsumgebung und die Problemsituationen jedoch stark vereinfacht werden, um Versuchspersonen in einer begrenzten Zeit angemessen trainieren zu können. Dies führte dazu, dass nur eins von fünf Problemen komplex genug war, um überhaupt einen Vorteil von 3D zeigen zu können.

Die Versuchsumgebung wurde entsprechend der realen Bedingungen in einer Leitwarte angepasst. Es wurden Nebentätigkeiten, wie das Führen eines Schichtprotokolls und ein Chat eingeführt, der das Gespräch mit Kollegen, z.B. Wartungstechniker simulieren sollte. Auch die Problemsituationen wurden an reale Bedingungen angepasst. So wurden zwei Problemklassen ausgewählt: einfache und komplexe Probleme. Für die Fehlererkennung bei den komplexen Problemen war es erforderlich mindestens zwei Diagramme gleichzeitig oder mehrere Prozessgrößen in einem Diagramm zu beobachten. Dies steigerte die Arbeitsbelastung des Operators und sollte sich positiv auf die Fehlererkennung in der 3D-Umgebung auswirken.

Der Einfluss des Trainings wurde in der Voruntersuchung noch nicht betrachtet. Die für den Versuch angewandte Fallstudie der kontinuierlichen Hydraulikpresse gehört zu der Prozessklasse ohne rigoroses Modell. Nach Ansicht der Autoren kann der im Vorfeld entwickelte 3D-Slider [4] dazu dienen, anhand vorhandener Prozessdaten die Prozessdynamik im Normalbetrieb und in kritischen Situationen zu erlernen. Bei der Funktionalität des Sliders wird ein bestimmter Datenbereich aus einem Archiv, z.B. einer Tabelle, ausgewählt und an eine geeignete Darstellungsform übergeben. Mittels eines Schiebereglers kann das ausgewählte Datenfenster über die Tabellendaten geschoben werden. Die Daten können so im Zeitraffer bzw. in Zeitdehnung analysiert werden. In dem beschriebenen Experiment werden neben der vergleichenden Evaluation von 2D und 3D-Prozessdatenvisualisierungen auch der Einfluss von drei verschiedenen Trainingsvariationen untersucht: das Training mit Standbild, Training mit Slider und das Training mit Slider und Interaktion. Unter Interaktion verstehen wir das Drehen der Diagramme in geeignete Beobachtungspositionen um den 3D-Effekt auf einem 2D-Monitor zu verstärken.

Derzeit sind die Versuche noch nicht vollständig statistisch ausgewertet. Erste Ergebnisse zeigen jedoch einen Vorteil der beiden Versuchsgruppen, die mit dem 3D-Slider trainierten. Beide Versuchsgruppen (3D-Slider und 3D-Slider mit Interaktion) waren tendenziell besser in der Fehlererkennung. Betrachtet man die Gruppen einzeln wird der Vorteil in der Fehlererkennung für die 3D-Interaktionsgruppe signifikant ( $\chi^2=22.671$ ,  $df=12$ ,  $p=0.031$ ), d.h. die Gruppe, die die Möglichkeit hatten mit dem 3D-Slider zu trainieren und während der Trainings- und Testphasen mit der Visualisierung zu interagieren, machten in den Testphasen signifikant weniger Fehler. Ein weiteres Ergebnis ist, dass dieser Vorteil auf den ersten von zwei Testdurchgängen beruht. Es kann somit angenommen werden, dass die 3D-Interaktionsgruppe auch schneller lernt als alle anderen Versuchsgruppen.

## Literatur:

- [1] Beuthel, C. M.: Dreidimensionale Prozessvisualisierung zur Führung technischer Anlagen am Beispiel eines Kohlekraftwerks. Dissertation TU Clausthal, 1997.
- [2] Hoppe, S. M., Essenberg, G. R., Wiegmann, D. A., Overbye, T. J.: Three-Dimensional Displays as an Effective Visualization Technique for Power Systems, Technical Report, University of Illinois, 2004.
- [3] Vogel-Heuser, B., Zeipelt, R.: Nutzen der 3D-Prozessdatenvisualisierung in der industriellen Prozessführung. *atp - Automatisierungstechnische Praxis*, 45 (3), 2003, S. 45-50
- [4] Pantförder, D.; Vogel-Heuser, B.: Nutzen von 3D-Pattern in der Prozessführung am Beispiel geeigneter Anwendungsfälle. In: *Automatisierungstechnische Praxis (atp)*, Oldenbourg-Verlag, München, 2006 – Jahrgang 48, Heft 11, S. 62-70.
- [5] Vogel-Heuser, B., Schweizer, K., Burgeler, van A., Fuchs, Y., Pantförder, D.: Auswirkungen einer dreidimensionalen Prozessdatenvisualisierung auf die Fehlererkennung. *Zeitschrift für Arbeitswissenschaft*, 2007 - Heft 1, S. 23-34.

# Ein analytisches Optimierungsverfahren zur segmentübergreifenden Bahnplanung für die autonome Fahrzeugführung in einer städtischen Umgebung

Jörn Marten Wille \*

Prof. Dr.-Ing. Markus Maurer \*\*

\* Institut für Regelungstechnik  
TU Braunschweig  
Hans-Sommer-Straße 66  
0531-391-3824  
0531-391-5194  
wille@ifr.ing.tu-bs.de

\*\* Institut für Regelungstechnik  
TU Braunschweig  
Hans-Sommer-Straße 66  
0531-391-3837  
0531-391-5194  
maurer@ifr.ing.tu-bs.de

**Schlüsselwörter:** Bahnplanung, Optimierung, Autonome Fahrzeugführung

Nach der erfolgreichen Teilnahme der TU Braunschweig bei der DARPA Urban Challenge 2007 werden die gesammelten Erfahrungen in einem Folgeprojekt mit dem Namen „Stadtpilot“ vertieft. Ziel des Projektes ist die vollständig autonome Fahrt auf dem Braunschweiger Stadtring.

Eine Fahrt auf dieser teilweise baulich getrennten zweispurigen Straße beinhaltet u.a. Spurwechselmanöver, Abbiegevorgänge an Kreuzungen und das Einfädeln in den fließenden Verkehr. Dazu werden zurzeit neue Fahrzeuge aufgebaut. Ein wichtiges Modul innerhalb der autonomen Fahrzeugführung stellt die Bahnplanung dar. Viele der bisher eingesetzten Bahnplanungen, die u.a. auf Klothoiden, Sigmoid-Funktionen oder Splines basieren, generieren segmentweise Trajektorien.

Die Rahmenbedingungen des Braunschweiger Stadtringes stellen durch die im Vergleich zu Autobahnen oder den Verhältnissen in der Urban Challenge schmalen Fahrbahnen und engen Kurvenradien besondere Anforderungen an das Bahnplanungsmodul. Im Folgenden soll ein neuartiges analytisches Bahnplanungsverfahren auf Basis des Elastischen Bandes und Smoothing Splines vorgestellt werden, das segmentübergreifend krümmungs- und krümmungsänderungsoptimierte Trajektorien berechnet und damit eine bessere Spurtreue und einen erhöhten Fahrkomfort ermöglicht.

Die Bahnplanung besteht im Wesentlichen aus zwei Teilen: einer a-priori-Planung auf Basis von Kartendaten und einer dynamischen Online-Anpassung. Aufgabe der a-priori-Planung ist es, anhand des zur Verfügung stehenden Kartenmaterials eine für die Gesamtstrecke optimierte Trajektorie zu finden. Dieser Ansatz eröffnet insbesondere

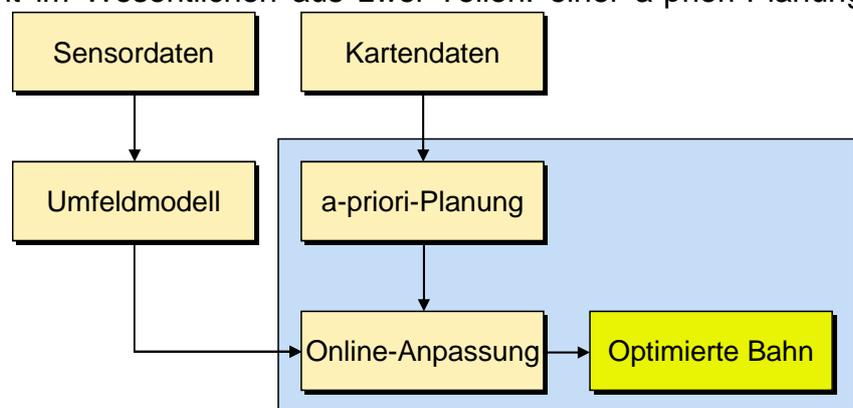
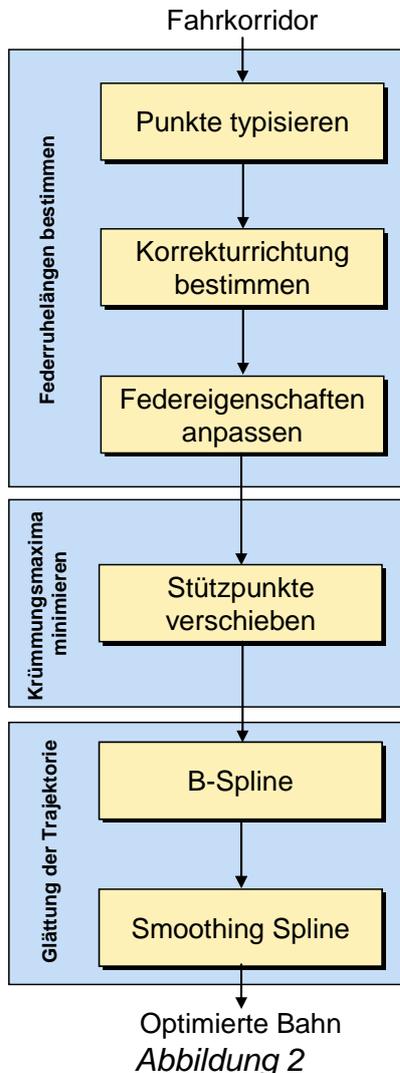


Abbildung 1

auf kurvenreichen Strecken neue Möglichkeiten der Optimierung. Die Kenntnis des kompletten Kurvenverlaufes ermöglicht es, Kurven optimal anzufahren und damit die Lenkaktivität des Lenkaktuators sowie die Querbeschleunigung zu minimieren. Ausweichmanöver innerhalb der eigenen Fahrspur und Spurwechsel zwischen zwei Spuren erfordern es, die ursprünglich geplante Bahn an die veränderte Verkehrssituation anzupassen. Um auf diese dynamischen Veränderungen der Umgebung zu reagieren, erfolgt auf Grundlage der a-priori geplanten Bahn ein dynamisches Anpassen während der autonomen Fahrt.



Beiden Verfahren liegt ein Optimierungsalgorithmus unter Anwendung der Ausgleichsbewegung des Elastischen Bandes sowie dem Einsatz von Smoothing Splines zugrunde, der in einem gegebenen Fahrkorridor eine fahrdynamisch optimierte Trajektorie bestimmt. Der Algorithmus besteht aus drei Teilen:

1. einem analytischen Teil zur Bestimmung der Federruhelängen des Elastischen Bandes durch Kategorisierung der Stützpunkte,
2. der Anwendung des ausgleichenden Kräftegleichgewichtes des Elastischen Bandes mit dem Ziel, durch das Verschieben von Stützpunkten die Krümmungsmaxima der Bahn zu reduzieren,
3. einer Glättung des Krümmungsverlaufes durch B- und Smoothing Splines und einer abschließenden Berechnung der optimierten Bahn.

Abbildung 2 verdeutlicht den Ablauf. Das Ergebnis ist eine segmentübergreifende krümmungsoptimierte Bahn. Fahrversuche haben die Wirksamkeit der Methode bestätigt. Da die Querregelung durch die Optimierung der Bahn entlastet wird, kann eine autonome Fahrt mit geringerer Querablage und höherem Fahrkomfort gewährleistet werden.

## Literatur:

- [1] S. Quinlan, *Real-Time Modification of Collision-Free Paths*, Dissertation, Stanford University, 1994.
- [2] C. de Boor, *A Practical Guide to Splines*, Springer-Verlag, 2001.
- [3] J.M. Wille und T. Form: *Realizing Complex Autonomous Driving Maneuvers - The Approach Taken by Team CarOLO at the DARPA Urban Challenge*, in IEEE International Conference on Vehicular Electronics and Safety, Columbus, Ohio, 2008.

# Erfassung und Integration streckenbezogener Verkehrslageinformationen

Matthias Körner

Technische Universität Dresden  
Fakultät Verkehrswissenschaften „Friedrich List“  
Institut für Verkehrstelematik  
Lehrstuhl für Prozessautomatisierung und -leitsysteme  
Tel. 0351-463-36768  
Fax 0351-463-36785  
Email: Matthias.Koerner@tu-dresden.de

**Schlüsselwörter:** streckenbezogene Verkehrslageerfassung, Verkehrslagemodellierung, Datenfusion, operatives Verkehrsmanagement

Durch den automatisierten Einsatz verkehrstelematischer Komponenten und Dienste ist es möglich, sowohl auf zufällige als auch geplante Ereignisse im Verkehrsfluss schnell und wirkungsvoll Einfluss zu nehmen [1]. Grundlage für gezielte und konzertierte Beeinflussungen des Straßenverkehrs durch Verkehrssteuerung und Verkehrsinformation ist ein aktuelles und umfassendes Verkehrslagebild. Zu dessen Ermittlung steht ein breites Spektrum verschiedenartiger Verkehrsdetektionstechnik zur Verfügung. Bedingt durch unterschiedliche Herkunftssysteme mit spezifischen Zielstellungen und angepassten Detektionsmethoden liegen unterschiedliche Verkehrskenngrößen und Erfassungsintervalle vor. Maßgebliches Unterscheidungskriterium ist aber der jeweilige räumliche Abbildungsbereich der einzelnen Detektoren. Hier ist zwischen querschnitts- und streckenbezogener Detektion zu unterscheiden.

Bei der querschnittsbezogenen Detektion handelt es sich in der Regel um kontinuierliche punktuelle Datenerfassungen. Beispiel hierfür sind Induktionsschleifen. Für die Verkehrslageermittlung kommen typischer Weise robuste Schwellenwertverfahren zum Einsatz [2]. Bei der streckenbezogenen Detektion dagegen handelt es sich um die Erfassung von Verkehrskenngrößen mit einer größeren räumlichen Ausdehnung. Bedeutendes Beispiel sind Systeme, welche auf der Auswertung von Floating Car Data basieren. Die Verkehrslage wird hier überwiegend anhand von Reisezeitaussagen ermittelt. Einen – aufgrund weit reichender Anforderungen an die Datenbereitstellung – noch wenig verbreiteten, aber hoch genauen Ansatz, stellt die Interpretation von Fahrprofilen dar (vgl. Abb. 1). Ausgewertet werden hierbei Geschwindigkeiten, Halte und Staulängen. Zu berücksichtigen ist bei der Nutzung von Floating Car Data, dass es sich bei den ermittelten Datensätzen um Stichproben handelt. D.h. es kann nicht von kontinuierlicher Datenverfügbarkeit ausgegangen werden.

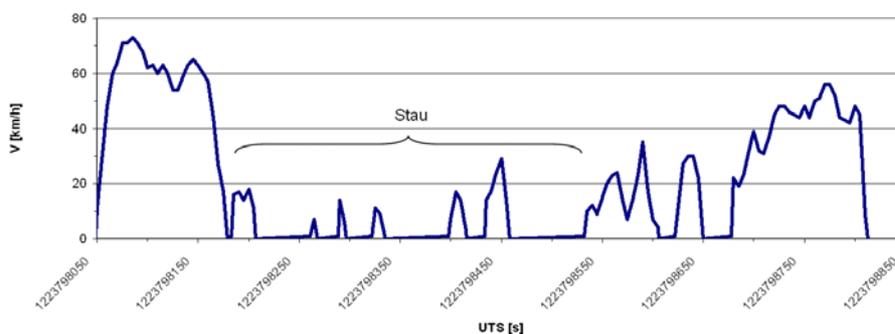


Abb. 1: Interpretation eines Floating Car-Fahrprofils

Um die Vorteile beider Ansätze – die gute zeitliche Verfügbarkeit der Messwerte aus querschnittsbezogener Detektion und die breitere räumliche Abdeckung von streckenbezogenen Detektionsverfahren – nutzen zu können, ist eine angepasste Datenaufbereitung, insbesondere bei Verkehrslagemodellierung und Datenfusion, erforderlich [3].

Den bei den Detektionssystemen aufkommenden unterschiedlichen Verkehrskenngrößen kann damit begegnet werden, dass Mindestanforderungen einzuhalten sind. Entweder wird die Verkehrslage direkt durch die Auswerteeinheit des Detektors ermittelt, oder es müssen Kenngrößen bereitgestellt werden, aus denen die Verkehrslage ermittelt werden kann. Auf unterschiedliche Erfassungsintervalle kann reagiert werden, indem immer der aktuelle Wert für eine Kenngröße eines Detektors vorzuhalten ist. Dieses Vorgehen ermöglicht die Verbindung von Detektoren mit festen Erfassungsintervallen und solchen, welche ereignisorientiert die erfassten Werte absetzen.

Die für die Datenfusion erforderliche Verkehrslagemodellierung erfolgt günstiger Weise mittels eines Ansatzes zur indirekten Verknüpfung von Erfassungs- und Steuerungssystemen. Verknüpfungskriterium ist der Raumbezug. Sowohl Detektoren als auch verkehrsbeeinflussende Systeme sind dabei über ein Straßennetzmodell als Korrespondenzebene miteinander verbunden (vgl. Abb. 2). Die Logiken für Schalthandlungen bzw. für Informationsausgaben beinhalten Interpretationen oder Abwägungen der Verkehrslage bestimmter Straßennetzelemente. Sowohl querschnitts- als auch streckenbezogene Detektoren werden in Abhängigkeit ihrer räumlichen Repräsentation den Netzelementen des Infrastrukturabbilds zugeordnet. Durch den raumbezogenen und mit einem Qualitätsmaß gewichteten Verschnitt ihrer Verkehrslageinformationen kann eine Verkehrslageaussage bezüglich der Netzelemente getroffen werden [4].

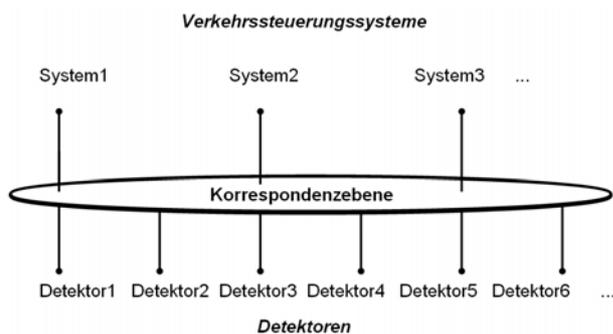


Abb. 2: Indirekte Verknüpfung von Detektion und Aktorik

Die Vorteile der Entkopplung von Erfassungs- und Steuerungssystemen liegen u.a. darin, dass alle Verkehrslageinformationen allen auf dem Modell aufsetzenden Systemen zur Verfügung stehen und Ergänzungen der Detektionstechnik ohne folgende Änderungen in Steuerungslogiken realisiert werden können. Durch die Fusion aller verfügbaren Verkehrslageinformationen erfolgt eine weitere Näherung an ein aus zeitlicher und räumlicher Sicht vollständiges Abbild.

#### Literatur:

- [1] Krimmling, J.; Franke, R. und Körner, M.: Verkehrsdatenaufbereitung und -modellierung im operativen Verkehrsmanagementsystem VAMOS, Straßenverkehrstechnik, Nr. 8, S. 453-458, FGSV-Verlag Köln, 2006.
- [2] Schnabel, W.; Lohse, D.: Grundlagen der Straßenverkehrstechnik und der Verkehrsplanung Band I, Verlag für Bauwesen Berlin, 1997.
- [3] Körner, M.: Traffic Data Processing and Modelling for the Dresden Operational Traffic Management System, Proc. of 10th IFAC Symposium Control in Transportation Systems Delft, Publ.-No. 181, 2006.
- [4] Hall, D. L.; Llinas, J.: Handbook of Multisensor Data Fusion, CRC Press, 2001.

# Nichtlineare Regelung der Motordrehzahl und des Momentenvorhalts im Leerlauf und beim Anfahrvorgang

Benedikt Alt\*, Ferdinand Svaricek \*

Jan Peter Blath\*\*, Matthias Schultalbers \*\*

\* Institut für Steuer- und Regelungstechnik  
Universität der Bundeswehr München  
Werner-Heisenberg-Weg 39  
Tel. 089-6004-3580  
Fax 089-6004-4565  
Email: benedikt.alt@unibw.de

\*\* IAV GmbH  
Powertrain Mechatronik Ottomotoren Systeme  
Rockwellstraße 16  
Tel. 05371-805-2065  
Fax 05371-805-1489  
Email: jan.peter.blath@iav.de

**Schlüsselwörter:** Motorregelung, Antriebsstrangregelung, Sliding Mode Control, Integrator Backstepping, Reglerumschaltung.

Bei einem modernen Ottomotor stellt die Regelung der Leerlaufdrehzahl eine wichtige Aufgabe dar. Dabei liegt das Hauptaugenmerk auf dem Störgrößenverhalten, d.h. die Lastmomente externer Verbraucher (z.B. Servolenkung, Klimaanlage, elektrische Verbraucher) sowie die damit verbundenen Drehzahleinbrüche sollen schnell kompensiert werden. Hierzu muss das vom Motor an die Kurbelwelle abgegebene Moment entsprechend variiert werden. Für diese Aufgabe wird hauptsächlich der Drosselklappenwinkel und damit die dem Motor zur Verfügung gestellte Luftmasse verwendet. Dabei wird vereinfachend davon ausgegangen, dass aus dem momentanen Luftmassenstrom ein theoretisch maximal mögliches Motormoment aufgebaut wird. Allerdings liegt die zugehörige Zeitkonstante im Bereich einiger 100ms.

Neben dem Drosselklappenwinkel wird in den heutigen Ottomotoren u.a. der Zündwinkel als zusätzliche Stellgröße eingesetzt [1,2]. Damit kann das Motormoment bereits im nächsten Arbeitsspiel geändert werden. Allerdings ist eine Erhöhung des Motormoments im Leerlauf nur möglich, wenn der Motor davor nicht mit dem optimalen Zündwinkel betrieben und somit gezielt ein geringerer Wirkungsgrad eingestellt wird. Damit stellt sich wie in Abbildung 1 gezeigt ein Momentenvorhalt ein, der im Leerlauf ebenso wie die Drehzahl auf seinem Sollwert gehalten werden muss. In diesem Zusammenhang hat sich ein Mehrgrößenansatz zur kombinierten Regelung der Leerlaufdrehzahl und des Momentenvorhalts bereits als vorteilhaft erwiesen [3].

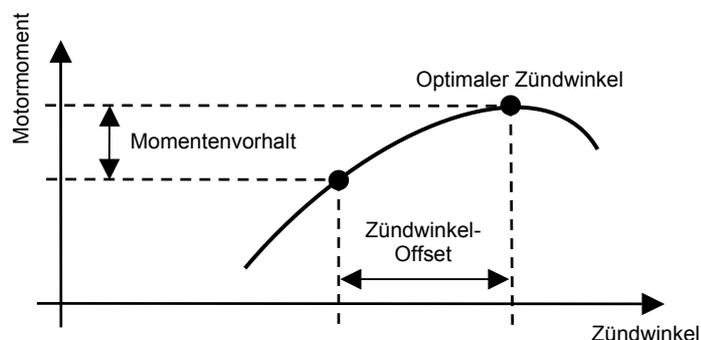


Abb. 1: Motormoment als Funktion des Zündwinkels [1]

In den heute eingesetzten Motormanagementsystemen werden die Momentenanforderungen (z.B. Fahrerwunsch oder die Anforderungen der externen Verbraucher) in der so genannten Momentenstruktur zentral koordiniert und schließlich über statische, nichtlineare Zusammenhänge in die physikalischen Stellgrößen umgerechnet [4]. Somit stehen bei den heutigen Motorregelungen im Leerlauf anstelle der physikalischen Stellgrößen nur die Momenteneingriffe auf dem „Luftpfad“ sowie auf dem „Zündpfad“ zur Verfügung. Daher muss die Momentenstruktur für die Entwicklung und Erprobung zukünftiger Ansätze im Bereich der Motorregelung zwingend mitberücksichtigt werden.

In diesem Beitrag wird ein bestehender Reglerentwurf [5] für die oben beschriebene, regelungstechnisch interessante Streckenkonfiguration weiter ausgebaut, so dass die Leerlaufrehzahl und der Momentenvorhalt selbst beim Anfahrvorgang eines Kraftfahrzeugs mit Handschaltgetriebe auf ihren Sollwerten gehalten werden können. Dadurch kann ein separater Anfahrregler für den Leerlauf eingespart werden. Anschließend werden die Regelgüte und die Robustheit der vorgestellten Methode über nichtlineare Simulationsstudien abgeschätzt. Hierzu werden außerdem entsprechende experimentelle Ergebnisse gezeigt.

## Literatur:

- [1] Reif, K.: Automobil-Elektronik. Eine Einführung für Ingenieure. 2. Auflage. Wiesbaden: Vieweg Verlag, 2007.
- [2] Kiencke, U.; Nielsen, L.: Automotive control systems for engine, driveline and vehicle. 1. Auflage. Berlin: Springer Verlag. 2000.
- [3] Ford, R.; Glover, K.: Spark ignition engine idle speed control using a novel framework and enabling control of the tradeoff between fuel consumption and load rejection capability. Vehicle System Dynamics. Vol. 36(2-3), 2001, S. 225-251.
- [4] Gerhardt, J.; Benninger, N.; Hess, W.: Torque based system structure of an electronic engine management system (ME7) as a new base for drivetrain systems. Proceedings of the FISITA Congress. Paris, France, 1998, Paper F98T624.
- [5] Alt B.; Svaricek, F.; Blath J.P.; Schultalbers, M.: Multiple sliding surface control of idle engine speed and torque reserve with load torque estimation. Proceedings of the 10th IEEE Workshop on Variable Structure Systems. Antalya, Turkey, 2008.

# Ein-/Ausgangsbasierter Entwurf hierarchischer ereignisdiskreter Steuerungssysteme

Sebastian Perk \*

Thomas Moor \*\*

\* Lehrstuhl für Regelungstechnik  
Universität Erlangen-Nürnberg  
Cauerstr. 7, 91058 Erlangen  
09131-85-27133  
09131-85-28715

sebastian.perk@rt.eei.uni-erlangen.de

\* Lehrstuhl für Regelungstechnik  
Universität Erlangen-Nürnberg  
Cauerstr. 7, 91058 Erlangen  
09131-85-27129  
09131-85-28715

thomas.moor@rt.eei.uni-erlangen.de

**Schlüsselwörter:** ereignisdiskrete Systeme, hierarchischer Entwurf

Mit der Supervisory Control Theory nach Ramadge und Wonham liegt seit den späten 1980er Jahren eine fundierte regelungstheoretische Methodik für ereignisdiskrete Systeme vor (siehe z.B. [1]). Diese ermöglicht prinzipiell einen modellbasierten Steuerungsentwurf anhand formaler Sprachen und endlicher Automaten und in letzter Konsequenz die automatische Generierung von beweisbar korrektem Programmcode beispielsweise für speicherprogrammierbare Steuerungen. Die direkte Anwendung dieser Methodik ist jedoch mit einem unbezwingbaren Rechenaufwand verbunden, welcher im Allgemeinen exponentiell mit der Anzahl der Komponenten des Gesamtsystems wächst. Diesem Umstand begegnen wir mit einer mehrstufigen hierarchischen Steuerungsarchitektur, siehe Abbildung 1.

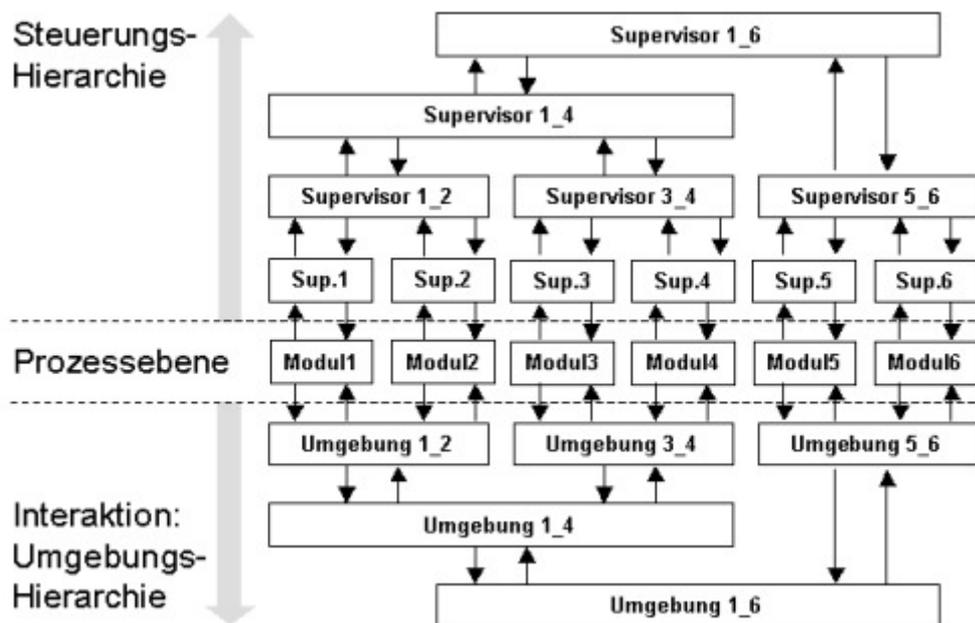


Abbildung 1: hierarchische Steuerungsarchitektur

Von zentraler Bedeutung ist in diesem Zusammenhang die Möglichkeit des abstraktionsbasierten Steuerungsentwurfs, also dem Entwurf der Steuerung (Supervisor) auf Grundlage eines vereinfachten Prozessmodells. Hierzu liegen mit Arbeiten zu hybriden Systemen prinzipiell geeignete Resultate vor, die im wesentlichen auf der Willems'schen Behavioural Systems Theory [2] und der dort üblichen Eingangs-/Ausgangs-Struktur (kurz: E/A-Struktur) beruhen. Um unmittelbar

auf die aus der Literatur bekannten Grundlagen zurückgreifen zu können, werden anstelle der Willems'schen Behaviours die in der ereignisdiskreten Regelungstheorie etablierten formalen Sprachen als Modell herangezogen.

Jeweils in E/A-Struktur werden zunächst einzelne Prozesskomponenten (Module) isoliert betrachtet und gemäß einer lokalen Spezifikation mit einer lokalen Steuerung versehen. Beim Übergang auf die nächsthöhere Schicht einer Hierarchie sind jeweils mehrere lokal gesteuerte Komponenten zusammenzufassen und ihre Interaktion durch ein dynamisches Umgebungsmodell zu modellieren.

Aufgrund der E/A-Struktur haben wir die Möglichkeit, beim Steuerungsentwurf auf eine Modellabstraktion auf Grundlage der lokalen Spezifikationen zurückzugreifen, was den Rechenaufwand wirkungsvoll begrenzt. Durch gezieltes Abwechseln von Modellabstraktion und Steuerungsentwurf lässt sich ein Gesamtsystem überlagerter Steuerungen und unterlagerter Umgebungsmodelle entwickeln, welches mit der Anzahl der Prozesskomponenten gut skaliert.

### **Literatur:**

- [1] P.J. Ramadge and W.M. Wonham. The control of discrete event systems. Proceedings of the IEEE, 77:81-98, 1989.
- [2] J.C. Willems. Paradigms and puzzles in the theory of dynamic systems. IEEE Transactions on Automatic Control, 36:258.294, 1991.
- [3] Perk, S. ; Moor, T. ; Schmidt, K.: Hierarchical Discrete Event Systems with Inputs and Outputs. In: IEEE Proc. WODES'06 - 8th International Workshop on Discrete Event Systems, S. 427-432, 2006.

# Spatially Interconnected Modeling and Controller Synthesis for Flow Transition Problems

Saulat S. Chughtai, Herbert Werner  
 Institute of Control Systems  
 Hamburg University of Technology  
 Hamburg 21073 Germany  
 Email: {saulat.chughtai, h.werner}@tu-harburg.de

## I. SUMMARY

In many engineering applications, the process of laminar-turbulent transition is of particular importance. Laminar flow exhibits less drag and heat transfer, whereas turbulent flow is required for thorough mixing. The use of linear control theory for controlling flow instabilities, which cause the transition, is a fairly new approach. Control schemes considered for this purpose are based on an array of sensors and actuators: sensors measure stream-wise and span-wise skin friction in terms of shear force, while actuators - mounted on the walls - can change the wall normal component of the fluid velocity. A schematic diagram of such a control system is shown in Fig 1. A detailed exposition of the problem can be found in [1].

Earlier work related to the control of transition from laminar to turbulent flow focussed on superimposing anti-phase modes. This requires transformation of the measured signals into spatial Fourier domain and then the generation of anti-phase modes corresponding to the dominating modes. More recently, optimal feedback control techniques have been considered, which can be implemented in Fourier domain. In this case the control signal is converted into physical domain before being applied to the actuators. For all these calculations a central processing unit is required.

With current MEMS technology it is now possible to implement local controllers which interact with each other [1] without requiring central processing. A theoretic framework for the design of such spatially interconnected controller networks - based on minimizing the worst-case  $l_2$ -induced norm - has been recently proposed in [2]. In the work presented here, the application of this approach to the problem of flow transition control is investigated.

As an initial study, we consider two dimensional plane Poiseuille flow, where fluid flows between two parallel, infinitely extended plates. The dynamic behavior of this flow can be modeled by the Navier-

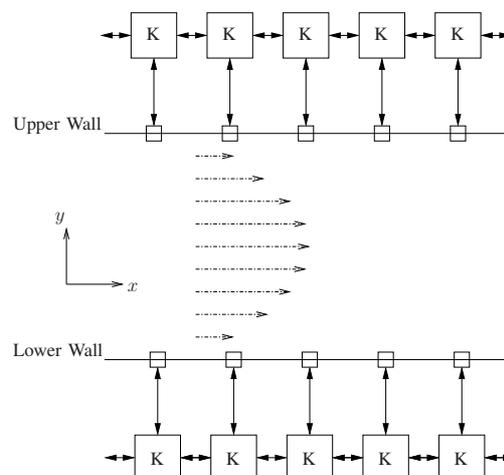


Fig. 1: Flow transition control system.

Stokes and continuity equations, which are nonlinear partial differential equations in fluid velocity ( $V$ ) and pressure ( $P$ ). These nonlinear equations can be linearized and represented in the form of an infinite dimensional linear state space model, where the elements of the model matrices  $A$ ,  $B$ ,  $C$  and  $D$  are spatial partial differential operators. In order to apply the framework and techniques proposed in [2], this model needs to be converted into finite dimensional form with real matrices.

Previously proposed conversions were based on spectral representations, where Fourier series were used in stream direction. The models are then valid only for a single spatial wave number. In [3] we proposed a model based on a finite difference representation in stream direction, which is valid for all spatial frequencies, thus making it possible to use the framework of [2] for controller synthesis. The resulting controller network is easier to implement as it does not require the transformation of signals between Fourier domain and physical domain.

Features of the approach presented here that are different from previous work such as [4], include the following:

- The model used here is based on a velocity-vorticity formulation.
- Whereas control action considered in previous work involves simultaneous blowing and suction, in our approach blowing or suction can be applied independently as required.
- The model presented here is independent of the length of the spatial chain considered, in contrast e.g. to the model in [4] which is only applicable to vibrating ribbon problems.

In this study, a model for plane Poiseuille flow has been validated both in time and frequency domain. For time domain validation, the transient energy is calculated and compared with previously published results. The frequency domain validation is based on nonlinear simulation: a sinusoidal disturbance is applied at the lower boundary and its effects at different locations of the channel are simulated. From a Fourier analysis of the simulated responses, the spatio-temporal frequency responses are obtained and compared with the linearized model. The results suggest that the model captures the dominant features of the problem and can be used for the design of spatially interconnected controllers. Finally controller network is synthesized for this model using a  $H_\infty$  loop shaping approach, and it is shown that this control scheme effectively rejects input disturbances.

## REFERENCES

- [1] T. Bewley, "Flow control: new challenges for a new renaissance," *Progress in Aerospace Sciences*, vol. 37, no. 1, pp. 21–58, 2001.
- [2] R. D'Andrea and G. E. Dullerud, "Distributed control design for spatially interconnected systems," *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 48, no. 9, pp. 1478–1495, 2003.
- [3] S. Chughtai and H. Werner, "Transition control of plane Poiseuille flow - a spatially interconnected model," in *Proceedings of the 47th IEEE Conference on Decision and Control.*, 2008.
- [4] L. Baramov, O. Tutty, and E. Rogers, " $H_\infty$  control of nonperiodic two-dimensional channel flow," *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 12, no. 1, pp. 111–122, 2004.

# Neue Analyse- und Entwurfsmethoden für kooperierende Systeme unter Berücksichtigung von Kommunikationsbeschränkungen

Ulrich Münz

Institut für Systemtheorie und Regelungstechnik  
Universität Stuttgart  
Pfaffenwaldring 9, 70550 Stuttgart  
Tel. 071168566526  
Fax 071168567735  
E-Mail [muenz@ist.uni-stuttgart.de](mailto:muenz@ist.uni-stuttgart.de)

Frank Allgöwer

Institut für Systemtheorie und Regelungstechnik  
Universität Stuttgart  
Pfaffenwaldring 9, 70550 Stuttgart  
Tel. 071168567733  
Fax 071168567735  
E-Mail [allgower@ist.uni-stuttgart.de](mailto:allgower@ist.uni-stuttgart.de)

## **Schlüsselwörter: Kooperierende Systeme, Kommunikationsbeschränkungen.**

Die Lösung komplexer Aufgaben wird heutzutage häufig nicht mehr von einzelnen Systemen erledigt sondern an die Mitglieder einer Gruppe von Systemen delegiert. Beispielhaft seien hier Transportsysteme oder das Internet genannt. Um die Lösung einer Aufgabe durch eine solche Gruppe zu garantieren, ist eine Kooperation zwischen den Systemen unerlässlich. Aus Sicht der Regelungstechnik stellt sich nun die Frage, welche Eigenschaften solche *kooperierenden Systeme* besitzen müssen, um gemeinsam eine Aufgabe zu erledigen.

Seit Anfang dieses Jahrzehnts werden kooperierende dynamische Systeme in der Regelungstechnik intensiv erforscht, siehe [2,5,7] und deren Referenzen. Dabei stehen technische Anwendungen wie die dezentralen Regelung von autonomen, unbemannten Fahrzeugen, z.B. [4,6,9], oder die Synchronisation von Oszillatoren [3,8] im Vordergrund. Die Dynamik der Teilsysteme wird hierbei i.d.R. stark vereinfacht und die Netzwerktopologie zwischen den Teilsystemen wird mithilfe von Graphen modelliert. Durch das Zusammenspiel von Regelungs- und Graphentheorie können so grundlegende Kooperationseigenschaften wie Konsensbildung nachgewiesen werden.

In diesem Vortrag werden neue Methoden im Zeit- und Frequenzbereich vorgestellt, mit denen kooperierende Systeme analysiert und entworfen werden können. Gegenüber herkömmlichen Ergebnissen bieten diese Methoden zwei Vorteile:

- Sie können auf lineare und nichtlineare Dynamiken höherer Ordnung angewendet werden.
- Sie berücksichtigen Kommunikationsbeschränkungen wie Übertragungsverzögerungen oder die begrenzte Reichweite drahtloser Kommunikationsnetzwerke.

In der Literatur werden kooperierende Systeme meistens als Einfach- oder Doppelintegratoren modelliert [1-3,5-7,9]. Die Erweiterung auf lineare und nichtlineare Dynamiken höherer Ordnung ermöglicht es, nun auch die Kooperation komplexerer Systeme zu analysieren. Der Einfluss von Übertragungsverzögerungen auf kooperierende Systeme wurde bisher nur in wenigen Publikationen untersucht. Zumeist wurde hierbei vereinfachend angenommen, dass die Verzögerungen in allen Übertragungskanälen identisch sind, vgl. [7]. Der Einfluss von heterogenen

Verzögerungen wurde z.B. in [1] untersucht, allerdings nur für Einfachintegratorenmodelle. Die neuen Methoden liefern u.a. notwendige und hinreichende Konsensbedingungen für lineare kooperierende Systeme höherer Ordnung mit heterogenen Verzögerungen und erlauben erstmals einen Vergleich verschiedener Konsensalgorithmen.

## Literatur:

[1] P.-A. Bliman und G. Ferrari-Trecate, Average consensus problems in networks of agents with delayed communications, *Automatica*, 44(8), pp. 1985-1995, 2008.

[2] A. Jadbabaie, J. Lin und S. Morse, Coordination of groups of mobile autonomous agents using nearest neighbor rules, *IEEE Transactions on Automatic Control*, 48(6), pp. 988-1001, 2003.

[3] A. Jadbabaie, N. Motee und M. Barahona, On the stability of the Kuramoto model of coupled nonlinear oscillators, In: *Proceedings of the American Control Conference*, pp. 4296-4301, 2004.

[4] R. M. Murray, Recent research in cooperative control of multivehicle systems, *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 129(5), pp. 571-583, 2007.

[5] W. Ren und R. W. Beard, *Distributed consensus in multi-vehicle cooperative control*, London, UK: Springer, 2008.

[6] R. Olfati-Saber, Flocking for multi-agent dynamic systems: Algorithms and theory, *IEEE Transactions on Automatic Control*, 51(3), pp. 401-420, 2006.

[7] R. Olfati-Saber, J. A. Fax und R. M. Murray, Consensus and cooperation in networked multi-agent systems, *Proceedings of the IEEE*, 95(1), pp. 215-233, 2007.

[8] G.-B. Stan und R. Sepulchre, Analysis of interconnected oscillators by dissipativity theory, *IEEE Transactions on Automatic Control*, 52(2), pp. 256-270, 2007.

[9] H. G. Tanner, A. Jadbabaie und G. J. Pappas, Flocking in fixed and switching networks, *IEEE Transactions on Automatic Control*, 52(5), pp. 863-868, 2007.

# Ein diskret-kontinuierliches auf Aktionsprimitiven basierendes Regelungskonzept für humanoide Roboter

Giulio Milighetti

Fraunhofer-Institut IITB  
 Fraunhoferstraße 1, 76131 Karlsruhe  
 0721-6091-502  
 0721-6091-413  
 milighetti@iitb.fraunhofer.de

Helge-Björn Kuntze

Fraunhofer-Institut IITB  
 Fraunhoferstraße 1, 76131 Karlsruhe  
 0721-6091-310  
 0721-6091-413  
 kuntze@iitb.fraunhofer.de

**Schlüsselwörter:** diskret-kontinuierliche Regelung, optimale Entscheidungsfindung, humanoide Roboter, Aktionsprimitive

Gegenwärtig werden im Bereich der Robotik starke Anstrengungen unternommen, um eine neue Generation von sog. humanoiden Robotern zu entwickeln, die in der Lage sind, anspruchsvolle Aufgabenstellungen im häuslichen Umfeld weitgehend autonom sowie auch interaktiv mit dem Menschen zu erfüllen. Um den höheren Anforderungen hinsichtlich Flexibilität und Autonomie in einer weitgehend unstrukturierten Umgebung mit ständig ändernden Umwelteinflüssen und Aufgabenstellungen gerecht werden zu können, benötigt der Roboter menschenähnliche Fähigkeiten. Diese werden einerseits durch entsprechende Sensoren erreicht, die das komplette Spektrum der menschlichen Wahrnehmungsmöglichkeiten abdecken, andererseits durch eine Intelligenz, die die Messdaten kombiniert, auswertet und anhand der Ergebnisse zielführende Handlungen planen kann. Schließlich ist noch eine geeignete Steuerungs- und Regelungsarchitektur erforderlich, die erheblich flexibler hinsichtlich wechselnder Aufgabenstellungen ist, als bei marktüblichen Industrierobotern.

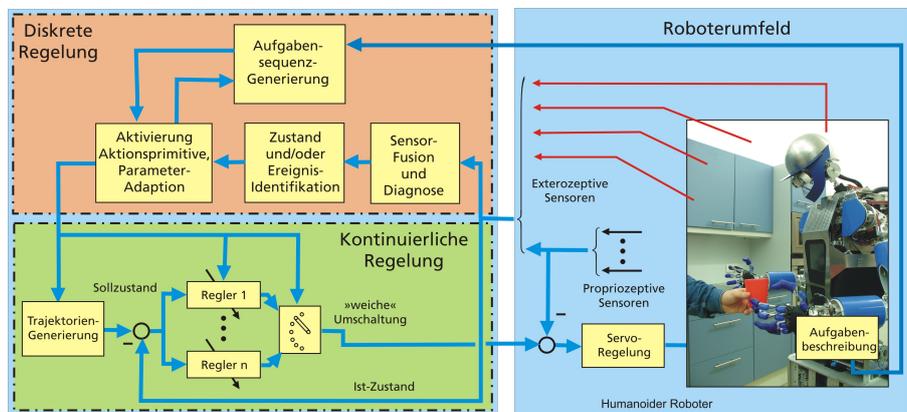


Abbildung 1: Diskret-kontinuierliches Regelungskonzept

Um der Komplexität solch anspruchsvoller Aufgaben begegnen zu können, muss dem Roboter ein situationsabhängiger Entscheidungsfindungsalgorithmus, d. h. eine ereignisdiskrete Regelung zur Verfügung stehen, die den komplexen Handlungsplan in eine dynamisch konfigurierbare Folge sog. Aktionsprimitive zerlegt [6], die dann unter Verwendung aktionsspezifischer kontinuierlicher Regelungsalgorithmen ausgeführt werden.

Die Entwicklung und Optimierung einer solchen hybriden diskret-kontinuierlichen Regelung basiert auf einem geeigneten diskreten Modell, das durch Petri-Netze

beschrieben wird [1],[5],[2],[3]. Eine solche Struktur dient sowohl zur Modellierung und Planung komplexer Aufgaben, als auch zu deren Überwachung und Regelung. Für das am Fraunhofer IITB entwickelte, auf Aktionsprimitiven basierende diskret-kontinuierliche Regelungskonzept [4], wird in diesem Beitrag ein neuer Fuzzy-basierter Entscheidungsfindungsalgorithmus vorgestellt, welcher den Roboter mit aufgabenspezifischer Intelligenz ausstattet und seine Eigenständigkeit und Flexibilität beträchtlich verbessert. Im Falle von Störeinflüssen (z. B. Rauschen oder Fehlfunktionen von Sensoren) oder unvorhergesehenen Ereignissen (z. B. Hindernisse), ist der Roboter in der Lage, dynamisch zu reagieren, indem er den Ablauf seiner elementaren Aktionen anpasst. Die Effizienz des vorgestellten Konzeptes wird anhand einer Greifaufgabe, bei der verschiedene optische Sensoren zur Anwendung kommen, demonstriert.

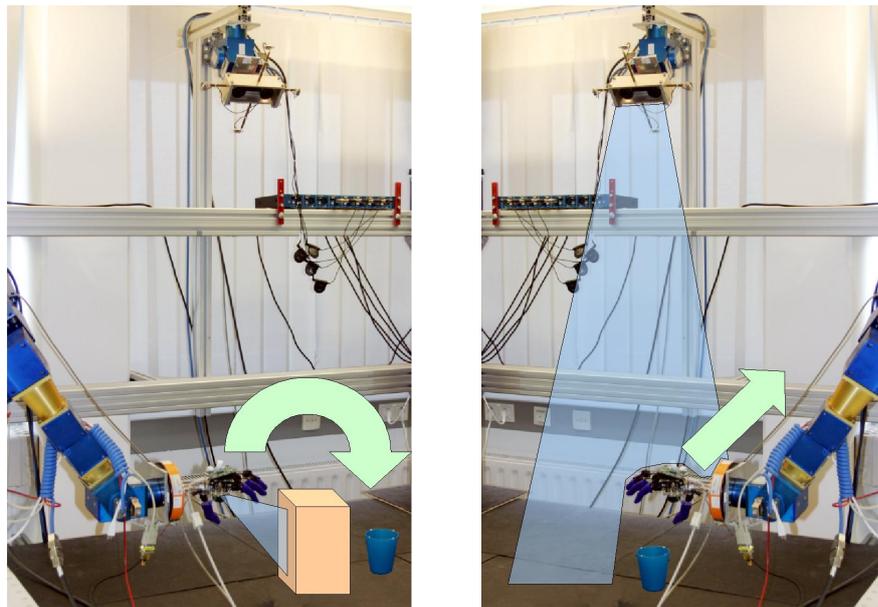


Abbildung 2: Greifvorgang mit Hilfe verschiedener Kameras

### Literatur:

- [1] Antsaklis, P.J.; Koutsoukos, X.D.; Zaytoon, J., "On Hybrid Control of Complex Systems: A Survey", 3rd International Conference ADMP'98, Automation of Mixed Processes: Dynamic Hybrid Systems, March 1998
- [2] Kobayashi, K.; Nakatani, A.; Takahashi, H.; Ushio, T., "Motion planning for humanoid robots using timed Petri net and modular state net", IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, 6-9 October 2002
- [3] Lehmann, A.; Mikut, R.; Asfour, T., "Petri Nets for Task Supervision in Humanoid Robots", In Proceedings: 37th International Symposium on Robotics (ISR 2006), München, May; 2006
- [4] Milighetti, G.; Kuntze, H.-B., "On the Discrete-Continuous Control of Basic Skills for Humanoid Robots", International Conference on Intelligent Robots and Systems IROS 2006, Beijing, China, 9-15 October 2006
- [5] Nenninger, G.; Krebs, V., "Modeling and Analysis of Hybrid Systems: A New Approach Integrating Petri Nets and Differential Equations", Proceedings of the Joint Workshop on Parallel and Distributed Real-Time Systems, 1997
- [6] Thomas, U.; Finkemeyer, B.; Kröger, T.; Wahl, F.M., "Error-Tolerant Execution of Complex Robot Tasks Based on Skill Primitives", IEEE International Conference on Robotics and Automation, Taipei, Taiwan, May 2003.

# Entwurf und Regelung von Telemanipulationssystemen vom Admittanz-Typ

Angelika Peer

Martin Buss

Lehrstuhl für Steuerungs- und Regelungstechnik  
Technische Universität München  
Theresienstrasse 90  
Tel.: 089-289-23412  
Fax.: 089-289-23840  
E-Mail: [Angelika.Peer@tum.de](mailto:Angelika.Peer@tum.de)

Lehrstuhl für Steuerungs- und Regelungstechnik  
Technische Universität München  
Theresienstrasse 90  
Tel.: 089-289-28395  
Fax.: 089-289-23840  
E-Mail: [mb@tum.de](mailto:mb@tum.de)

**Schlüsselwörter:** Teleoperation, haptisches Eingabegerät, Admittanzregelung, Parameterraumverfahren

Während zur Durchführung sich oft wiederholender Aufgaben in bekannten, strukturierten und dem Menschen unzugänglichen Umgebungen meist automatisierte Roboter Systeme zum Einsatz kommen, erfordern unstrukturierte, unbekannte und sich dynamisch verändernde Umgebungen Systeme, die sich an die jeweiligen Anforderungen anpassen können. Dies beinhaltet insbesondere das Treffen von Entscheidungen und die Adaption von Aktionsplänen. Die Anpassungsfähigkeit von Robotersystemen der heutigen Generation reicht jedoch bislang bei Weitem nicht an die menschlichen Fähigkeiten heran, so dass zur Durchführung vieler Manipulationsaufgaben immer noch das direkte Eingreifen eines Menschen erforderlich ist.

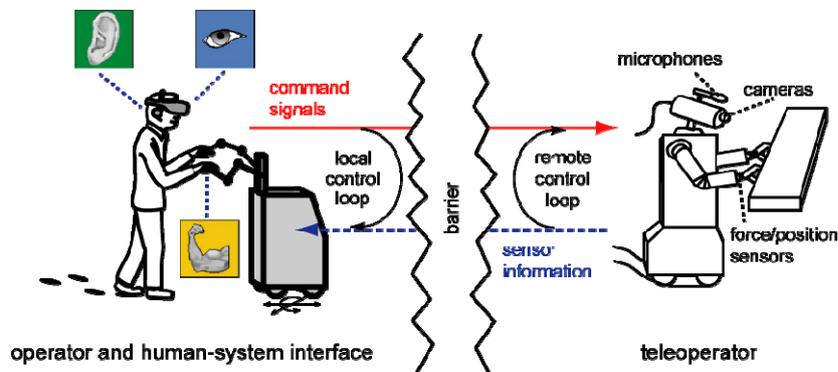


Abbildung 1: Multi-modales Telepräsenz- und Teleaktionssystem

Telemanipulationssysteme hingegen verbinden Fähigkeiten wie die menschliche Anpassungs- und Entscheidungsfähigkeit mit den Vorteilen einer rein durch einen Roboter durchgeführten Manipulation. In einem Teleoperationssystem tritt der Bediener nämlich nicht mehr direkt mit der Umgebung in Kontakt, sondern agiert mit dieser über ein technisches System. Eine sogenannte Mensch-System-Schnittstelle erlaubt es hierbei dem Bediener einen entfernten Teleoperator zu steuern, der wiederum an Stelle des Menschen mit der Umgebung interagiert. Die Mensch-System-Schnittstelle stellt dazu multi-modale Rückmeldungen in Form von visueller, auditorischer und haptischer Information bereit und dient zusätzlich als Eingabegerät.

In der Vergangenheit wurden zahlreiche Anwendungsfelder für derartige Telemanipulationssysteme aufgezeigt. Dazu gehören unter anderem die Durchführung von Manipulationsaufgaben im Weltraum oder der Tiefsee, die minimalinvasive Chirurgie, die Mikromontage, die Beseitigung toxischer Rückstände sowie die Telemontage.

Diese Arbeit beschäftigt sich insbesondere mit der haptischen Modalität in Telemanipulationssystemen. Die Darbietung dieser Modalität erfolgt dabei durch sogenannte haptische Eingabegeräte, wobei je nach Ausführungsart, Geräte vom Impedanz- oder Admittanz-Typ unterschieden werden können. Die Verwendung von Admittanz-Typ Geräten ist in der Literatur nur wenig untersucht und steht deshalb im Mittelpunkt dieser Arbeit. Insbesondere wird auf den Entwurf eines haptischen Eingabegerätes vom Admittanz-Typ und die Regelung desselben näher eingegangen.

Die Verwendung von Manipulatoren des Admittanz-Typs im Gegensatz zu klassischen Geräten des Impedanz-Typs bringt auch neue Herausforderungen an die Regelung des Telemanipulationssystems mit sich. Verschiedene Arten von bilateralen Regelalgorithmen, welche sich speziell für Manipulatoren des Admittanz-Typs eignen, werden vorgeschlagen und deren Robustheit mit Hilfe des Parameterraumverfahrens untersucht. Eine Vielzahl an Laborexperimenten dient schließlich zur Evaluation und Validierung der vorgeschlagenen Soft- und Hardwareentwicklungen.

## **Literatur:**

- [1] B. Stanczyk, A. Peer, and M. Buss. Development of a High Performance Haptic Telemanipulation System with Dissimilar Kinematics. *Advanced Robotics*, 20(11):1303–1320, 2006.
- [2] A. Peer, Y. Komoguchi, and M. Buss. Towards a Mobile Haptic Interface for Bimanual Manipulations. In *Proc. of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pages 384–391, 2007.
- [3] A. Peer and M. Buss. A New Admittance Type Haptic Interface for Bimanual Manipulations. *Transactions on Mechatronics*, 13(4):416–428, 2008.
- [4] A. Peer and M. Buss. Robust Stability Analysis of a Bilateral Teleoperation System Using the Parameter Space Approach. In *Proc. of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2008.

# Dynamische Grundflächenrekonstruktion beliebiger Objekte aus sequentiellen Entfernungsmessungen eines mobilen Roboters

Marko Reimer

Institut für Systems Engineering / Fachgebiet Echtzeitsysteme  
Leibniz Universität Hannover  
[reimer@rts.uni-hannover.de](mailto:reimer@rts.uni-hannover.de)

**Schlüsselwörter:** Objektbeschreibung, Umweltverständnis, B-Splines,

Seit einigen Jahren werden autonome mobile Systeme (Serviceroboter) erfolgreich zur Erfüllung industrieller Aufgaben eingesetzt. Sie bewältigen unterschiedliche Transport- und Überwachungsaufgaben mit ständig zunehmender Komplexität. Moderne Systeme sind dabei in der Lage, natürliche Merkmale ihrer Umgebung zur Navigation zu verwenden und keine besondere Vorbereitung der Arbeitsumgebung, wie Reflektormarken oder Leitdrähte, zu benötigen. Während des Einsatzes erkennt die Mehrheit der Systeme nur Hindernisse und Landmarken. Es findet keine Unterscheidung zwischen verschiedenen Hindernissen statt. Zur besseren Umweltinteraktion wurden in den letzten Jahrzehnten viele neue Verfahren zur Objekterkennung vorgestellt. Diese Ansätze erkennen bestimmte im Voraus gelernte Objekte. Sie tragen jedoch nicht zum Verständnis der Umwelt bei. Die Mehrheit dieser Systeme nimmt eine Messung auf und vergleicht die Sensorwerte nach einer Vorverarbeitung mit einer Datenbank von bekannten Objekten. Die resultierende Menge an möglichen Objekten wird weiter reduziert, indem jede weitere Messung nur noch mit dieser möglichen Objektmenge verglichen wird. Dieses Vorgehen skaliert nicht in einer realen Umgebung und bietet dem mobilen System selbst nur begrenzt Informationen.

Dieser Beitrag zeigt ein Verfahren, um die Objektbeschreibung eines beliebigen, noch nicht identifizierten Objektes zu verbessern und damit das Objektverständnis des autonomen, mobilen Systems zu erweitern. Es wird die reale 2-dimensionale Grundfläche des Objektes durch die Kombination unterschiedlicher Ansichten auf dieses Objekt mittels eines 360°-3D-Laserscanners bestimmt. Generell liefert ein einzelner 3D-Laserscann dafür eine Dimension, die 'Breite' genannt wird. Nur in speziellen Fällen liefert eine einzelne Messung ebenfalls Werte für die zweite Dimension 'Tiefe'. Ein 3D-Laserscanner liefert zusätzlich

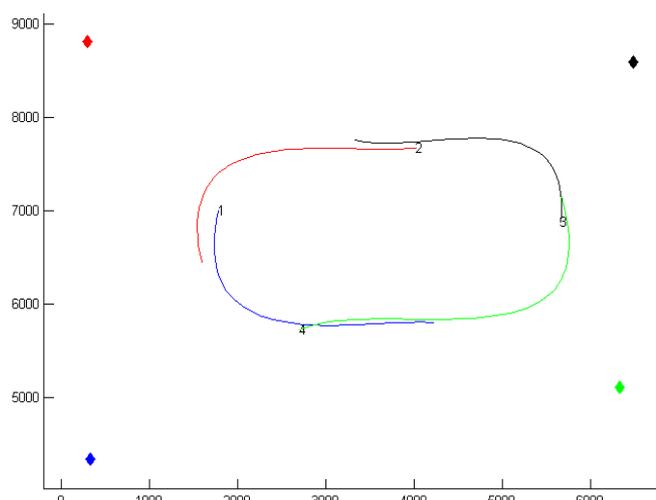


Abbildung 1: Kurven von vier Positionen

Informationen über die Höhe eines Objektes, die hier nicht betrachtet wird. Um aussagekräftige Informationen über Breite und Tiefe zu erhalten, ist es notwendig, mehrere Messungen aus unterschiedlichen Perspektiven zu kombinieren.

Die Kombination unterschiedlicher Ansichten zu einem Gesamtobjekt wird in der Industrie bei der Digitalisierung (kleiner) Objekte bereits erfolgreich eingesetzt. Diese bekannten Verfahren basieren auf der exakten Kenntnis der Sensorposition. Ein mobiles System bietet mit den bisherigen Lokalisationsverfahren keine dafür ausreichend genaue Position. In der mobilen Robotik existiert mit dem „Simultaneous Localization And Mapping“ (SLAM) ein Ansatz zur Erstellung einer Umgebungskarte in einer unbekanntenen Umgebung von einem mobilen System aus. Ansätze des SLAM werden als Grundlage zur Kombination von Objekten im hier vorgestellten Verfahren verwendet. Im Gegensatz zum SLAM bieten einzelne Objekte jedoch nicht ausreichend Messwerte, um eine globale Übereinstimmung in den einzelnen Messpunkten zu ermitteln.

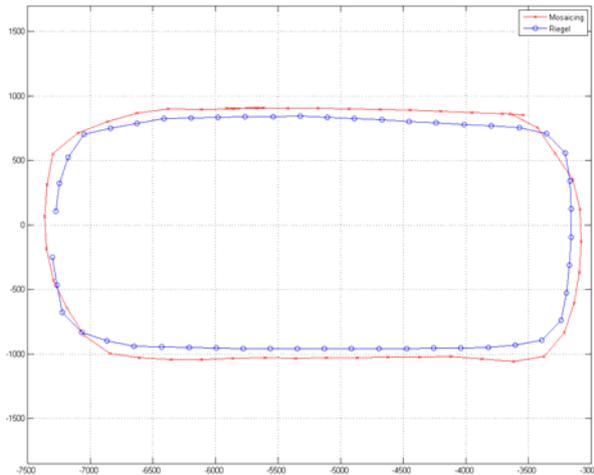


Abbildung 2: Referenzkurve und zusammengesetzte Kurve

In diesem Rekonstruktionsverfahren werden Objekte in der Aufsicht betrachtet. Es wird folglich die Form des Objektes in der Bodenebene rekonstruiert. Um Messungen mit unterschiedlichen Auflösungen und Genauigkeiten miteinander zu kombinieren, werden die 3D-Laserscannermesspunkte mit dem Verfahren der „virtuellen 2D-Scans“ in die Bodenebene reduziert und anschließend mit speziellen 2-dimensionalen Kurven, so genannten „Non-Uniform Rational B-Splines“ (NURBS), abstrahiert. Abbildung 1 zeigt diesen Schritt am Beispiel eines Autos. Von jeder Raute aus wurde eine der Messungen durchgeführt, die in der entsprechend eingefärbten Kurve dargestellt ist. Die einzelnen abstrahierten Kurven sind

einander überlagert. NURBS bieten die Möglichkeit, beliebige Formen in einer mathematisch exakten Form zu beschreiben. Durch ihre Lokalität kann dabei immer nur der jeweils aktuell sichtbare Bereich verbessert werden, während alle nicht sichtbaren Bereiche unverändert bleiben. Dieses ist notwendig, da das Verfahren mit den geringen Rechenressourcen eines mobilen Systems auskommen soll. Ebenso sind NURBS invariant gegenüber affinen Transformationen, wodurch Messungen an unterschiedlichen Orten leicht kombiniert werden können. In Abbildung 2 ist die zusammengeführte Kurve (x-rot) einer auf 12mm genauen Referenzkurve (o-blau) überlagert. Die resultierende Form bietet eine gute Abschätzung der Größe als auch der Form des Objektes, auch wenn diese in Details nicht dem realen Objekt entspricht. Der mittlere Abstand der zwischen den Kurven beträgt 70 mm. Diese Form der Objektbeschreibung wurde unter Matlab realisiert und durch Tests mit gespeicherten, unveränderten Messdaten eines realen Roboters validiert.

### Literatur:

- [1] R.J. Campbell and P.J. Flynn, “A Survey Of Free-Form Object Representation and recognition techniques”, Computer Vision and Image Understanding, 2001
- [2] Y. Chen and G. Medioni, “Description of Complex Objects from Multiple Range Images Using an inflating Balloon Model”, Computer Vision and Image, 1995
- [3] F.S. Cohen and Z.H. Huang and Z. Yang, “Invariant matching and identification of curves using B-spline representation”, IEEE Transactions on Image Processing, 1995
- [4] D. Haehnel, R. Triebel, W. Burgard and S. Thrun, “Map building with mobile robots in dynamic environments”, ICRA, 2003
- [5] E. Kishon and T. Hastie and H. Wolfson, “3-D Curve Matching Using Splines”, Journal of Robotic Systems, 1991

# Reglerentwurf anhand von Approximationsmodellen für örtlich verteilte Systeme

J. Schlake \*

\* FG Regelungstechnik und Mechatronik  
Institut für Automatisierungstechnik  
TU Darmstadt  
Landgraf-Georg-Straße 4  
64283 Darmstadt  
Tel.: +49 (0) 6151 / 16 - 22 68  
Fax: +49 (0) 6151 / 16 - 61 14  
Email: jschlake@iat.tu-darmstadt.de

U. Konigorski \*\*

\*\* FG Regelungstechnik und Mechatronik  
Institut für Automatisierungstechnik  
TU Darmstadt  
Landgraf-Georg-Straße 4  
64283 Darmstadt  
Tel.: +49 (0) 6151 / 16 - 30 14  
Fax.: +49 (0) 6151 / 16 - 61 14  
Email: ukonigorski@iat.tu-darmstadt.de

**Schlüsselwörter:** Örtlich Verteilte Systeme, Early-Lumping, Ausgangsrückführung, Eigenwertabschätzungen

Bei der Modellbildung zwecks Simulation, Systemanalyse und/oder Reglerentwurf für örtlich verteilte Systeme sind prinzipiell zwei Wege gangbar. Zum einen kann versucht werden, mittels so genanntem Early-Lumping die die Systemdynamik beschreibende partielle Differentialgleichung in eine herkömmliche, endliche Zustandsraumdarstellung zu überführen und so das Ein-/Ausgangsverhalten zu approximieren. Vorteilhaft an diesem Weg ist, dass die bekannten Verfahren für endliche Zustandsraumdarstellungen auf örtlich verteilte Systeme übertragen werden können [1]. Problematisch ist dabei jedoch, dass diese endliche Approximation nicht eindeutig ist. Abhängig von dem zur Erzeugung der endlichen Zustandsraumdarstellung verwendeten Verfahren ergeben sich unterschiedliche Approximationsmodelle, welche sich i.A. nicht durch eine reguläre Transformation ineinander überführen lassen. Folglich kann es auch beim modellbasierten Reglerentwurf zu Problemen kommen, da die Basis ein „falsches“ Modell ist. Unter anderem in [2] und [3] wird in diesem Zusammenhang von Fehlern aufgrund der Diskretisierung, des Reihenabbruchs und von Aliasing gesprochen.

Die zweite Möglichkeit zur Synthese örtlich verteilter Systeme ist der Entwurf eines örtlich verteilten Reglers auf Basis von funktionalanalytischen Methoden. Dieser Late-Lumping genannte Zugang hat den Vorteil, zu eindeutigen Ergebnissen zu führen, bedeutet aber evtl. einen nicht unerheblichen mathematischen Aufwand. Hinzu kommt, dass örtlich verteilte Regler in der Regel nicht direkt implementiert werden können, sondern ebenfalls diskretisiert werden müssen.

Deutscher hat in [4] gezeigt, wie die vollständige Modale Synthese auf eine Klasse von örtlich verteilten Systemen übertragen und dazu genutzt werden kann, lediglich eine endliche Anzahl der unendlichen Eigenwert/Eigenfunktions-Paare durch eine Zustandsrückführung auf Basis des örtlich verteilten Zustands  $x(t,z)$  zu verändern, wobei  $t$  die Zeit und  $z$  den Ort bezeichnen soll. Durch Festlegung der Freiheitsgrade in den Parametervektoren kann diese Methode z.B. dazu genutzt werden, die zu den entsprechenden Eigenwerten korrespondierenden Eigenfunktionen innerhalb eines linearen Unterraumes vorzugeben und so eine Entkopplung zu erreichen. Der hierfür verwendete Regler ist ein Integraloperator, dessen Kern durch die Linearkombination einer endlichen Anzahl von Eigenfunktionen des offenen Regelkreises gegeben ist.

Besonders vorteilhaft bei diesem Entwurf ist die Tatsache, dass die in diesem Operator nicht verwendeten Moden durch den Regler nicht beeinflusst werden.

Durch Diskretisierung des Integraloperators mittels numerischer Quadraturformeln braucht nicht die gesamte Zustandsinformation  $x(t,z)$  zur Verfügung zu stehen. Es werden nur die Funktionswerte  $x(t,z_k)$  an den durch die Quadraturformel bestimmten Auswertepunkte  $z_k$  benötigt. Gleichzeitig geht die Integration in eine Matrizenmultiplikation des Auswertevektors mit einer Matrix  $M$  über.

Diese Idee lässt sich auch für Early-Lumping Modelle verwenden. Wie angedeutet, liefern die endlich dimensionalen Modelle eine Näherung für das Ein-/Ausgangsverhalten des örtlich verteilten Systems und somit auch für dessen Eigenwerte bzw. Eigenfunktionen. Je höher die Ordnung der Zustandsraumdarstellung gewählt wird, desto besser ist i.A. die Approximation der Eigenwerte und Eigenfunktionen. Werden in diesem Näherungsmodell nur die „vertrauenswürdigen“ Informationen in Form von Eigenfunktionen und Eigenwerten für den Reglerentwurf verwendet, so kann hieraus die Matrix  $M$  konstruiert werden. Diese ist üblicherweise aber nicht quadratisch, so dass anstelle einer vollständigen Zustandsrückführung, eine konstante Ausgangsrückführung mit der fiktiven Ausgangsmatrix  $M$  zu entwerfen ist. Diese lässt sich wiederum als eine strukturbeschränkte konstante Zustandsrückführung auffassen [5].

Anhand von Beispielen kann gezeigt werden, dass sich auf diese Weise der Fehler bei der Polvorgabe mittels konstanter Zustandsrückführung auf Basis von Approximationsmodellen signifikant reduzieren lässt.

## Literatur:

- [1] D. Franke: Systeme mit örtlich verteilten Parametern, Eine Einführung in die Modellbildung, Analyse und Regelung, Springer-Verlag, Berlin, 1987
- [2] J. P. Boyd: Chebyshev and Fourier spectral methods, second edition (revised), Dover Publications, Inc., Mineola, New York, 2001
- [3] C. Canuto, M.Y. Hussaini, A. Quarteroni, T. A. Zang: Spectral Methods in Fluid Dynamics, Springer-Verlag, New York, 1988
- [4] J. Deutscher, C. Harkort: Vollständige Modale Synthese eines Wärmeleiters, at-Automatisierungstechnik, 2008, vol. 56, S. 539-548
- [5] U. Konigorski: Ein direktes Verfahren zum Entwurf strukturbeschränkter Zustandsrückführungen durch Polvorgabe, Fortschrittberichte VDI, Reihe 8, Nr. 156, 1988

# Passivitätsbasierte Regelung von Brennstoffzellen

Michael Mangold

Max-Planck-Institut für Dynamik komplexer technischer Systeme  
Sandtorstraße 1, 39106 Magdeburg  
Telefon 0391-6110361  
Fax 0391-6110513  
mangold@mpi-magdeburg.mpg.de

**Schlüsselwörter:** Brennstoffzelle, Passivität, irreversible Thermodynamik

Brennstoffzellen sind eine attraktive neue Technologie zur Erzeugung elektrischer Energie. Sie zeichnen sich durch einen hohen Wirkungsgrad aus, da sie chemische Energie auf direktem Wege ohne mechanische Zwischenstufen in Elektrizität umwandeln. Obwohl bislang nur wenige Brennstoffzellensysteme Marktreife erreicht haben, gibt es eine Vielzahl von Anwendungen im Prototypenstadium, die von der portablen Energieerzeugung für Kleinverbraucher wie Laptops oder Handys über Fahrzeugantriebe bis hin zu Kleinkraftwerken zur stationären dezentralen Energieversorgung reichen.

Brennstoffzellen stellen hoch integrierte nichtlineare Prozesse dar, deren Verhalten durch komplexe Wechselwirkungen zwischen externer elektrischer Last und internen physiko-chemischen Vorgängen wie elektrochemischer Reaktion, Stoff-, Wärme- und Ladungstransport bestimmt wird. Darüber hinaus ist die Zahl von Stell- und Regelgrößen verhältnismäßig groß. Regelgrößen sind typischerweise die Zellspannung oder Zelleistung, die Zelltemperatur und bei Niedertemperaturzellen der Befeuchtungsgrad. Mögliche Stellgrößen sind die Gasströme und Gaszusammensetzungen auf der Anoden- und auf der Kathodenseite, der Zellstrom sowie die Kühlleistung. Die genannten Eigenschaften von Brennstoffzellen stellen Herausforderungen für den Reglerentwurf dar. Die Wahl geeigneter Reglerstrukturen und die Paarung von Eingangsgrößen und Ausgangsgrößen sind nicht trivial. Die Mehrheit der Publikationen zur Brennstoffzellenregelung löst diese Probleme auf recht empirische Weise [1]. Zur nichtlinearen Regelung von Brennstoffzellen existieren noch recht wenige Arbeiten [2,3,4].

Dieser Beitrag beschäftigt sich mit einem passivitätsbasierten Ansatz für die Regelung von Brennstoffzellen. Bekanntlich verfügen passive Systeme über eine Reihe günstiger Eigenschaften für die Regelung [5]. Die Hauptschwierigkeit bei chemischen oder elektrochemischen Systemen besteht aber darin, geeignete Ljapunowfunktionen zu finden, mit deren Hilfe der Nachweis der Passivität gelingt. Ydstie und Mitarbeitern schlagen vor, Prinzipien der irreversiblen Thermodynamik zu diesem Zweck zu nutzen [6,7]. So stellen die Entropie oder die Gibbsche Energie für offene Systeme im Allgemeinen zwar keine Ljapunowfunktionen dar, die Konvexitätseigenschaften dieser und anderer thermodynamischer Potentiale können aber genutzt werden, um geeignete Ljapunowfunktionen zu konstruieren. Diese Idee wird hier auf ideal durchmischte und örtlich verteilte Modelle von PEM-Brennstoffzellen angewandt. Die resultierenden Regler werden in Simulationen getestet und mit konventionellen Ansätzen verglichen.

## Literatur:

- [1] J. Pukrushpan, A. Stefanopoulou, H. Peng. Control of fuel cell power systems: principles, modeling, analysis and feedback design. Springer, London (2004)
- [2] J. Golbert, D.R. Lewin. Model-based control of fuel cells: (1) regulatory control, Journal of Power Sources, 135, 135-151 (2004).
- [3] M. Danzer, E. Hofer. Dynamic Modelling and decentralised flatness-based control of a PEM fuel cell system. Proceedings of the International Hydrogen Energy Congress IHEC, Istanbul, Turkey (2005).
- [4] J. Niemeyer, T. Bauer, M. Gemmar, S. Philipps, C. Ziegler, V. Krebs. State estimation and optimal control for a PEM fuel cell system. Fuel Cells Science & Technology , Turin (2006)
- [5] H.K. Khalil. Nonlinear Systems. Pearson Education, Upper Saddle River (2000).
- [6] C.A. Farschman, K.P. Viswanath, B.E. Ydstie. Process systems and inventory control. AIChE Journal, 44, 1841-1857 (1998).
- [7] Ydstie, B.E.: Passivity based control via the second law. Computers & Chemical Engineering, 26, 1037-1048 (2002).

# Flachheitsbasierte Reglerumschaltstrategie für Ein- und Mehrgrößensysteme

Semir Osmic

Institut für Regelungstechnik und Mechatronik  
 Universität Paderborn  
 Pohlweg 98, 33098 Paderborn, Deutschland  
 +49 5251 / 60 - 5577  
 +49 5251 / 60 - 5579  
 semir.osmic@rtm.upb.de

**Schlüsselwörter:** Reglerumschaltung, Mehrgrößensysteme, Flachheit

Die wachsende Komplexität und die Anforderungen an mechatronische Systeme erfordern neue Vorgehensweisen, um zur Laufzeit nicht nur Reglerparameter, sondern auch Reglerstrukturen und Regelgrößen auszuwechseln (umzuschalten). Beispielsweise wird bei einem Fahrzeug mit Abstandsregelautomat zwischen Abstands- und Geschwindigkeitsregelung umgeschaltet. Das Gesamtsystemverhalten soll dabei während des Umschaltvorgangs unterschiedliche Anforderungen erfüllen. Z. B. sollte ein Stabilitätsnachweis möglich sein, das Umschalten sollte ruckfrei und ohne Überschwinger erfolgen, oder es werden sprungfreie Stell-/Zustands- oder Ausgangsgrößen verlangt.

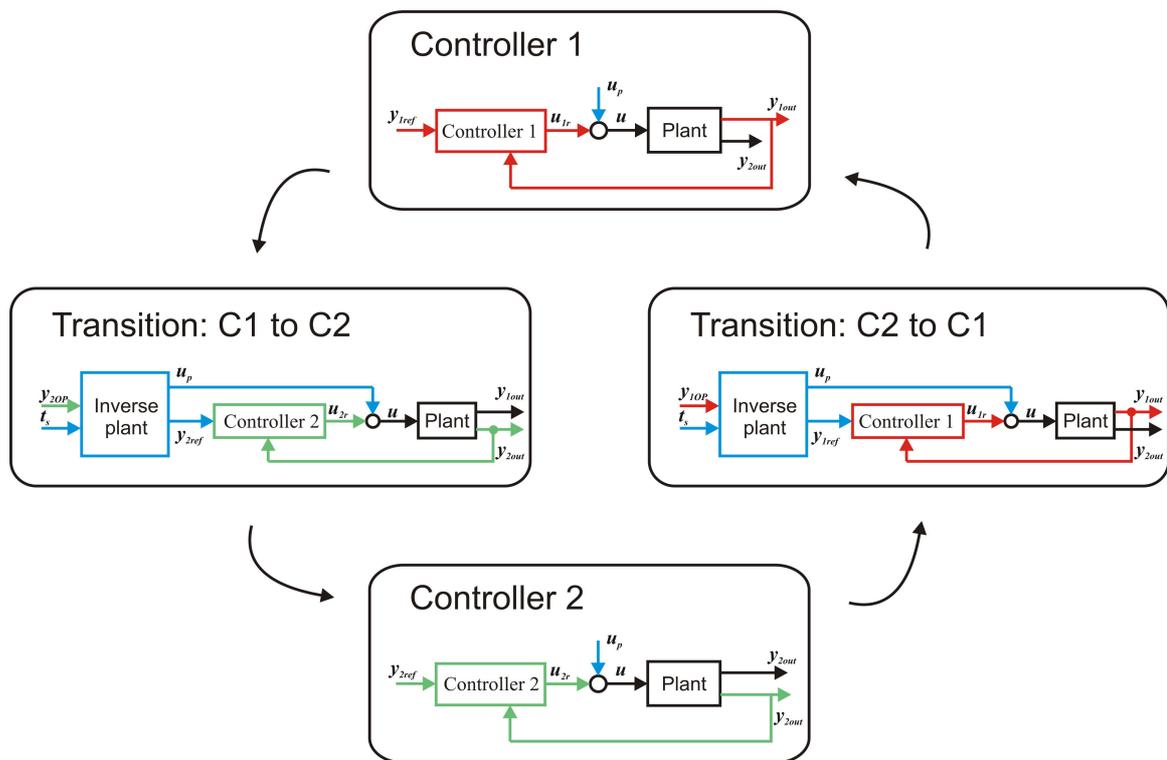


Abbildung 1: Umschaltungsstrategie zwischen zwei Reglern

Um dies zu erreichen wurde eine neue, auf der Flachheit der Systeme aufbauende, Reglerumschaltungsstrategie entworfen, welche explizit die Sprung-/Ruckfreiheit und Vorgabe für die Dauer des Umschaltens erfüllt, implizit auch Überschwinger

berücksichtigt. Beim Anwenden dieser Methode entstehen auch einige Vorteile für die Auslegung der Regler; einer von denen ist, dass der Regler „scharf“ auf das Störverhalten eingestellt werden kann ohne Überschwinger zu erzeugen.

Der Grundgedanke ist, das Wissen über das System auszunutzen um für den Übergang zum neuen Arbeitspunkt, der beim Umschalten notwendig ist, Solltrajektorien für die Regelgrößen und an diese Solltrajektorien angepasste Vorsteuerungen für die Eingänge des Systems zu berechnen. Wenn man das System genau kennt und keine Störungen einwirken, würde die berechnete Vorsteuerung alleine das System in den neuen Arbeitspunkt bringen. Der flache Ausgang des Systems (im Allgemeinfall kein Ausgang des Systems) spielt bei der Berechnung der Vorsteuerung eine wesentliche Rolle.

Die Umschaltstrategie wird an zwei Beispielen veranschaulicht: einem SISO Viertelfahrzeugprüfstand und einem MIMO 3-Tank-System.

## Literatur:

- [1] M. Fliess, J. Levine, P. Martin, and P. Rouchon. *On differentially flat nonlinear systems*. Nonlinear Control Systems Design, Pergamon Press, Oxford, GB, 408-412, 1992.
- [2] R. Rothfuß. *Anwendung der flachheitsbasierten Analyse und Regelung nichtlinearer Mehrgrößensysteme*. VDI-Reihe 8, Nr. 664, VDI-Verlag, Düsseldorf, Germany, 1997.
- [3] H. Sira-Ramirez and S. K. Agrawal. *Differentialy Flat Systems*. Marcel Dekker, New York, USA, 2004.
- [4] S. Osmic et al. *Safe Online-Reconfiguration of Self-Optimizing Mechatronic Systems*. 7th International Heinz Nixdorf Symposium, Paderborn, Germany, 411-426, 2008.
- [5] S. Osmic and A. Trächtler *Flatness-based Online Controller Reconfiguration*. IECON 2008, Orlando, Florida, USA, 2008.

# Modellbasierte Regelung von Entnahmedampfturbinen

Dipl.-Ing. Wolfgang Grote Prof. Dr. Gunter Reinig

Lehrstuhl für Regelungssysteme und Steuerungstechnik

Ruhr-Universität Bochum

Universitätsstr. 150

44801 Bochum

Tel.: +49 (0)234 32 28060

Email: {grote,reinig}@rus.rub.de

**Schlüsselwörter:** Modellierung von Dampfturbinen, Modellprädiktive Regelung, generische Modelle, MIMO Regelung, Betriebsartenspezifische Regelung

Entnahmeturbinen stellen neben der üblichen mechanischen Leistung Anzapfdampf auf verschiedenen Temperatur- und Druckniveaus zur Verfügung, der für zahlreiche verfahrenstechnische Prozesse, z.B. in der Petrochemie oder Papierindustrie benötigt wird (siehe Abb. 1). Die Regelung einer solchen Entnahmeturbine stellt eine Herausforderung dar; es kommt zu starken Wechselwirkungen zwischen den zu regelnden Größen, wie Entnahmedrücken, Drehzahl oder elektrischer Leistung, was echte Mehrgrößenverfahren erfordert, um Querkopplungseffekte zu minimieren. Hierbei steht die Optimierung des Störverhaltens im Vordergrund, da durch plötzliche Dampfentnahmen und Leistungsanforderungen des Spannungsnetzes das nichtlineare MIMO System stoßartig angeregt wird.

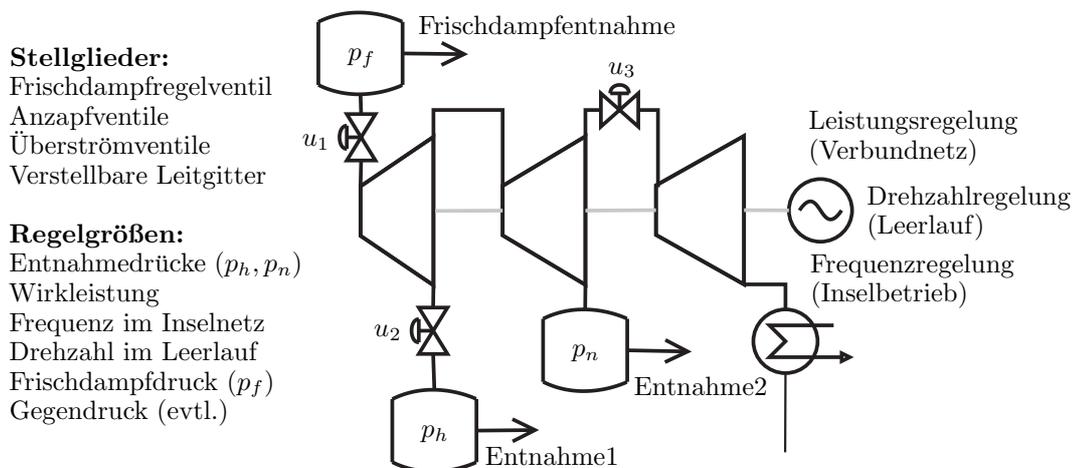


Abb. 1: Mehrfach-Entnahmeturbine mit Kondensationsteil

Weiterhin erfordern verschiedene Betriebsarten der Maschine — wie der Leistungsbetrieb, der Inselbetrieb, die Frischdampf- und Gegendruckregelung — bisher komplexe Regler mit einer Umschaltstruktur, deren zahlreiche einzustellenden Parameter die Inbetriebnehmer vor große Probleme stellen. Erschwerend kommt hinzu, dass i.d.R. die Inbetriebnahme unter großem Zeitdruck auf der Baustelle erfolgt.

Bisherige Regelungskonzepte basieren auf parallel betriebenen dezentralen PID-Reglern,

die je nach Betriebsart im Eingriff sind, während die inaktiven Regler nachgeführt werden. Falls eine Entkopplung durchgeführt wird, erfolgt diese nur unter rudimentären physikalischen Betrachtungen und berücksichtigt weder die genaue Statik noch die Dynamik der Regelstrecke. Die Reglerparameter werden oft nach Erfahrungswerten eingestellt, eine Optimierung auf ein gewünschtes Regelverhalten findet mangels zur Verfügung stehender Zeit und Methoden nicht statt.

Da jede Entnahmeturbine individuell für den Kunden projektiert wird, besitzt jede Anlage auch spezifische Eigenschaften und individuelle Systemparameter. Die Affinität der Anlagen führt jedoch geradezu auf eine allgemeine generische Modellierung nach dem Baukastenprinzip. Hierfür werden die Anlagenkomponenten physikalisch bzw. mathematisch modelliert und anlagenspezifisch zu einem dynamischen Simulationsmodell der Regelstrecke verknüpft. Das nichtlineare Streckenmodell kann einerseits zur Synthese der klassischen PID Regler und zum Entwurf einer (linearen) modellbasierten Entkopplungsmatrix herangezogen werden, wobei bewährte Methoden der Regelungstechnik zum Einsatz kommen. Andererseits wird langfristig das Ziel verfolgt, einen modellprädiktiven MIMO Regler zu etablieren, der das System entkoppelt, die verschiedenen Betriebsarten unkompliziert und elementar berücksichtigt und zudem durch eine geringere Anzahl an prozessnahen Tuning-Parametern die Inbetriebnahme stark vereinfacht. Die Realisierung des MPC Reglers erfolgt auf der Basis des linearisierten diskreten Zustandsraummodells der im Vorfeld modellierten Anlage.

Erste Simulationen auf einem Real Time System haben gezeigt, dass der entwickelte MPC Regler die geforderte Taktzeit von 100 ms auf aktuellen Prozessrechnern erreichen und unterschreiten kann.

Das Konzept der generischen mathematischen Modellierung von Entnahmeturbinen nach dem Baukastenprinzip und die Nutzung dieser Modelle einerseits für das Reglertuning, andererseits aber auch für modellbasierte Einheiten, wie Zustandsschätzer oder modellprädiktive Regler kann stellvertretend für viele Systeme aus dem verfahrens-, energie- und anlagentechnischen Sektor stehen. Dabei muss gewährleistet sein, dass die relevanten Modellparameter bekannt sind und die Modelle so genau, wie für die jeweilige Aufgabe benötigt, die Realität abbilden.

Im Vortrag wird sowohl auf die Modellierung als auch auf die betriebsartenspezifische modellprädiktive Regelung eingegangen.

## Literatur

- [1] Yrjö Majanne. Model predictive pressure control of steam networks. *Control Engineering Practice*, 13:1499–1505, 2005.
- [2] Asok Ray. Dynamic modeling of power plant turbines for control design. *Appl. Math. Modelling*, 4:109–112, 1980.
- [3] Meinhard Schobeiri. *Turbomachinery Flow Physics and Dynamic Performance*. Springer, Berlin, Heidelberg, New York, 2005.
- [4] M. Venturini. Development and experimental validation of a compressor dynamic model. *Journal of Turbomachinery*, 127:599–608, 2005.

# Roll to roll systems: methods for moving web strain and tension determination

Vincent Gassmann  
Université de Strasbourg  
Web Handling Research Group  
15 rue du Mal Lefèbvre  
F-67100 Strasbourg  
vincent.gassmann@ipst-ulp.u-strasbg.fr

Prof. Dominique Knittel  
Université de Strasbourg  
Web Handling Research Group  
15 rue du Mal Lefèbvre  
F-67100 Strasbourg  
dominique.knittel@ipst-ulp.u-strasbg.fr

Prof. Marie-Ange Bueno  
ENSISA/LPMT, Université de Haute Alsace  
11 rue Alfred Werner, F-68093 Mulhouse  
Marie-Ange.Bueno@uha.fr

**Keywords:** roll to roll systems, modeling,  $H_\infty$ -observer, Kalman filter, optical extensometer, fixed-order  $H_\infty$ -control

## Abstract:

All flexible materials such as textiles, papers, polymers or metals are handled on rollers during their processing. Maintaining web tension in the entire processing line under changing web speed is a key factor for achieving good final product quality. Many industrial applications use load cells mounted on idle rollers to regulate the system by direct measurement of web tension. Nevertheless another widely spread method consists in the position control of a dancer. Dancers are mobile mechanisms located in specific area of the processing line, usually next to an unwinder or a rewinder, to regulate indirectly web tension and to attenuate several sources of disturbances thanks to their dumping properties. There exist mainly two kinds of dancers: linearly moving dancers and pendulum dancers. These last ones have been studied very little in the literature and are used in this contribution.

After a summary of the main laws used for roll to roll systems modeling, alternatives to industrial standard practice based on fixed-order  $H_\infty$  controllers are proposed. The controllers are synthesized using  $H_\infty$  approach thanks to non-convex optimization algorithms.

Due to sources of disturbance and the high coupling introduced by elastic webs, robust multivariable control strategies such as  $H_\infty$ -controllers require the knowledge of web tension in each span of the process. Estimators or observers represent a cost-effective method in order to limit the number of load cells or dancers. Two different approaches to design tension observers in a section of a process line are presented and discussed. The first approach is based on  $H_\infty$ -observers. The second approach uses extended Kalman filtering theory. Both approaches are analyzed and discussed with variations in friction torques and nominal set points of the web velocity and tension. The limitation of assuming negligible friction and inertia in the idler rolls are also discussed. Simulation results for different situations with the two approaches are shown and discussed.

Furthermore, one of the main disadvantages for the calculation of efficient controllers for a strip processing line comes from the characteristics of the web, especially its elasticity, which are most of the time bad-known and can vary substantially. Consequently, this contribution investigates methods for the determinations of web strain. The first one is based on extended Kalman filtering and the second uses an optical sensor developed in [4] which enables to measure variations of the web pattern. The assets and limits of both approaches are also discussed.

## References :

- [1] M. Vedrines, V. Gassmann and D. Knittel, "Moving Web Tension Determination by Out of Plane Vibrations Measurements using a Laser," IEEE Transactions on Instrumentation & Measurement, 2008
- [2] Gassmann V., D. Knittel, " $H_\infty$ -based PI-observers for web tension estimations in industrial unwinding-winding systems," IFAC World Congress, Seoul, July 2008
- [3] Gassmann V., D. Knittel, "Tension observers in elastic web unwinder-winder systems," ASME International Mechanical Engineering Congress (IMECE2007), Seattle, Washington, USA, Nov. 11-15, 2007
- [4] M. Tournonias, M.-A. Bueno, L. Bigué, B. Durand, and M. Renner, "Contactless optical extensometer for textile materials," Experimental Mechanics, vol. 45, 2005.



# Der intelligente Fahrzeugsitz - Modellbasierte Komfortregelung in aktiv klimatisierten Sitzen

C. Zschippig \*

\* Friedrich-Wilhelm-Bessel-Institut  
Forschungsgesellschaft (FWBI)  
Universität Bremen  
Postfach 10 63 64  
28063 Bremen  
Tel. +49 (0)421-218-64614  
Fax +49 (0)421-218-646 70  
Email c.zschippig@bimaq.de

G. Goch\*\*

\*\* Bremer Institut für Messtechnik,  
Automatisierung und Qualitätswissenschaft (BIMAQ)  
Universität Bremen  
Linzer Straße 13  
28359 Bremen  
Tel. +49 (0)421-218-646 01  
Fax +49 (0)421-218-646 70  
Email gg@bimaq.de

**Schlüsselwörter:** Klimaregelung, modellbasierte Regelungstechnik, Komfortregelung, Fahrerassistenzsysteme

Um eine optimale Fahrleistung zu erbringen und maximale Verkehrssicherheit zu erreichen, muss sich ein Fahrer im Fahrzeug wohl fühlen. Ein Faktor für das Wohlbefinden ist das Fahrzeugklima. Stand der Technik ist die geregelte Klimaanlage für den Fahrzeuginnenraum in Kombination mit einem manuell vom Fahrer geregelten Klimasitz. Ziel ist es, Mess- und Regelungsverfahren zu entwickeln, die den Klimasitz in die Klimaautomatik des Innenraums integrieren[1].

Hierzu müssen die einzelnen Umwelteinflüsse und deren Wechselwirkungen zueinander identifiziert werden, die das Komfortempfinden des Menschen beeinflussen [3,4] (Abbildung 1). Im Gegensatz zur klassischen Klimatechnik, wo der Komfort einer Person oder Personengruppe anhand der Umgebungsbedingungen vorhergesagt wird, können im Fahrzeug geeignete Sensoren ausgewählt und positioniert werden, die direktes Feedback über das Mikroklima im Sitzkontaktbereich liefern. Anhand dieser personenbezogenen Messdaten kann der Komfort und dessen dynamische Veränderung bewertet und geregelt werden. Trotz individueller Unterschiede wird ein optimales Mikroklima im Sitzkontaktbereich geschaffen, in dem sich den Fahrer dauerhaft wohl fühlt.

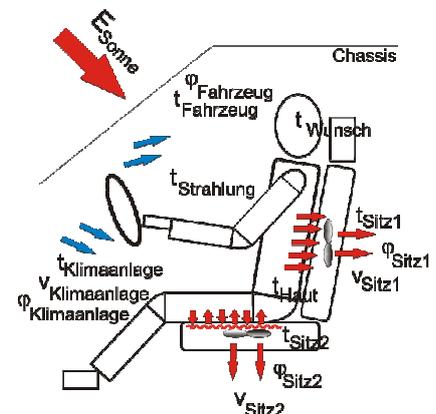


Abbildung 1: Einflussgrößen des thermischen Komforts

Im Rahmen des Vorhabens wurde ein echtzeitfähiges MATLAB Simulinkmodell des menschlichen Komfortempfindens und des Klimas in einer Pkw-Fahrgastzelle[2] entwickelt (Abbildung 2).

Im Beitrag wird vorgestellt, wie das Komfortmodell anhand von Sitzversuchen in einer Klimakammer validiert und optimiert wurde. Außerdem werden Ansätze und Regelungsstrategien vorgestellt, mit welchen der Klimasitz in Interaktion mit der Klimaautomatik des Fahrzeugs individuellen Sitzkomfort gewährleistet.

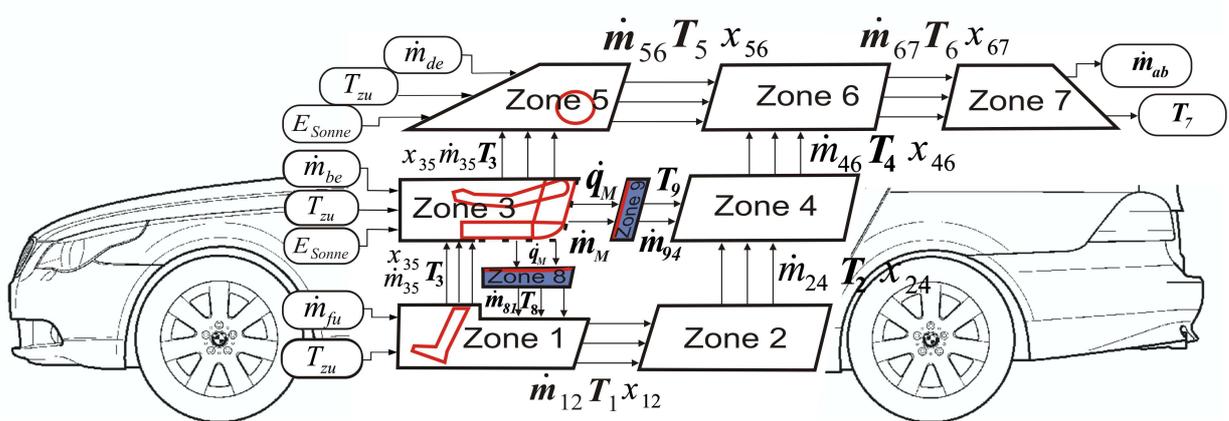


Abbildung 2: Klimamodell der Fahrgastzelle

Die Reglerkonzepte werden mit Methoden des „Rapid Control Prototyping“ entwickelt. Die Regelung des Klimasitzes wird über einen ARM-Microcontroller realisiert. Dadurch kann das Modell während der Sitzversuche parallel ausgeführt werden (Software-in-the-loop), was bei der hohen Anzahl variabler Parameter das Prozessverständnis erheblich verbessert.

## Literatur:

- [1] Behrmann T; Bartels, V; Goch G. Schöne A: Benutzerfreundliche integrierte Klimaregelungssysteme für PKW-Innenräume und -Sitze und hierfür geeignete Regelungskonzepte, in Tagungsband zur DFMRs-Fachtagung 2006, Bremen
- [2] Zhao, N.: Modellbildung und Simulation klimatischer Prozesse im PKW für die Regelung eines intelligenten Klimasitzes, Diplomarbeit Universität Bremen, 2006
- [3] DIN EN ISO 14505-2:2006 Ergonomie der thermischen Umgebung- Beurteilung der thermischen Umgebung in Fahrzeugen
- [4] Bröde, P; Griefahn, B.: Kriterien zur Beurteilung der Komfortbeeinträchtigung durch Feuchte-Entwicklung auf Kfz-Sitzen unter Hitzebelastung, Institut für Arbeitsphysiologie an der Universität Dortmund

# Ausgangsrückführungen für lineare MIMO Systeme mit Stellgrößenbeschränkungen: LMI-basierter Entwurf

Hendrik Lens

TU Darmstadt, Institut für Automatisierungstechnik  
Landgraf-Georg-Straße 4, 64283 Darmstadt  
Tel: +49(0)6151/166055, E-Mail: hlens@rtr.tu-darmstadt.de

In diesem Beitrag wird die Frage behandelt, wie man einen Regler für lineare MIMO Systeme mit Stellgrößenbeschränkungen, bei denen nicht alle Zustände gemessen werden, entwerfen kann. Dabei soll für eine vorgegebene Menge von möglichen Anfangsbedingungen die Stabilität garantiert und die Konvergenzrate möglichst hoch sein. Der hier gewählte Ansatz verwendet dazu sättigende Ausgangsrückführungen. Es wird ein Verfahren vorgestellt, mit dem die Nebenbedingungen des Entwurfsproblems als lineare Matrixungleichungen (LMIs) formuliert werden können. Dadurch kann der Entwurf mit effizienten Algorithmen der konvexen Optimierung durchgeführt werden.

Viele Regelstrategien für Systeme mit Stellgrößenbeschränkungen, die auf eine hohe Regelgüte ausgerichtet sind, benötigen den vollständigen Zustandsvektor und setzen ihn als gemessen voraus [1, 4, 5]. Bei realen Systemen hat man jedoch in der Regel nicht alle Zustände als Messwerte zur Verfügung und muss beispielsweise auf einen Beobachter zurückgreifen. Die übliche Vorgehensweise aus der linearen Theorie, zuerst eine Zustandsrückführung und dann einen Beobachter zu entwerfen, kann hier nicht angewendet werden, weil das aus der linearen Theorie bekannte Separationstheorem nicht für Strecken mit Stellgrößenbeschränkungen gilt. Wenn man eine Zustandsrückführung für ein System mit Stellgrößenbeschränkungen mit einem Beobachter kombiniert, bleibt die Ruhelage zwar grundsätzlich stabil [2], allerdings verkleinert sich das Einzugsgebiet bezogen auf die Anfangszustände des Systems unter Umständen drastisch. Es ist deshalb bei beschränkten Stellgrößen nicht sinnvoll, wie im linearen Fall Regler und Beobachter nacheinander zu entwerfen.

Der Entwurf von Regler und Beobachter sollte vielmehr simultan durchgeführt werden. Dabei ergeben sich allerdings Nebenbedingungen, die nichtkonvex in den Entwurfsvariablen sind [6]. Probleme mit nichtkonvexen Nebenbedingungen können in der Regel nur lokal mit Suchverfahren optimiert werden. Solche Verfahren sind rechenintensiv und ihr Ergebnis ist im Allgemeinen vom Startwert abhängig.

Wenn die Nebenbedingungen jedoch als lineare Matrixungleichungen (LMIs) [3, 9] formuliert werden können und das Gütemaß eine konvexe Funktion der Parameter ist, kann die Optimierung der Reglerparameter schnell und global erfolgen. Für die konvexe Optimierung mittels LMIs sind verschiedene Softwarepakete für MATLAB erhältlich, wie z. B. [8]. Deshalb ist eine Darstellung des Entwurfsproblems in LMI-Form sehr vorteilhaft.

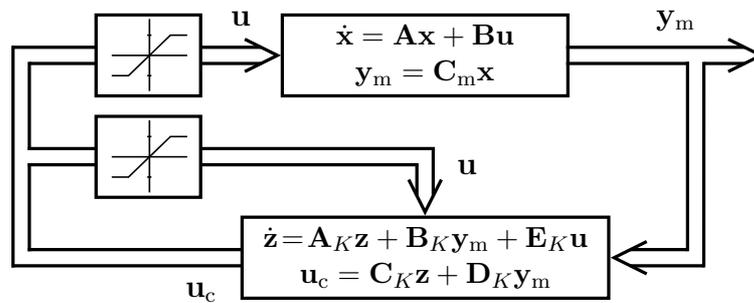


Abbildung 1: Sättigende dynamische Ausgangsrückführung. Die Entwurfsvariablen sind  $\mathbf{A}_K$ ,  $\mathbf{B}_K$ ,  $\mathbf{C}_K$ ,  $\mathbf{D}_K$  und  $\mathbf{E}_K$ .

In diesem Beitrag wird die beobachterbasierte Regelung auf eine dynamische Ausgangsrückführung, wie in Abbildung 1 dargestellt, verallgemeinert. Es wird gezeigt, dass man mit einem solchen Regler eine Darstellung der Nebenbedingungen in Form von LMIs erreichen kann. Diese LMI-Darstellung wird durch eine nichtlineare, invertierbare Variablentransformation, die der in [7] sehr ähnlich ist, ermöglicht. Nach der Optimierung können die Reglerparameter dann einfach mittels der inversen Transformation berechnet werden.

Zunächst wird der Entwurf von Ausgangsrückführungen betrachtet, die immer im linearen Bereich bleiben. Darauf aufbauend wird mit Hilfe von Methoden für sättigende Zustandsrückführungen [5] ein LMI-basierter Entwurf für sättigende Ausgangsrückführungen entwickelt. Schließlich wird anhand des linearisierten Modells eines Industrieroboters sechster Ordnung mit drei Messwerten und drei Eingangsgrößen aus [10] die Effektivität des Ansatzes gezeigt.

## Literatur

- [1] ADAMY, J. ; FLEMMING, A. : Soft variable-structure controls: a survey. In: *Automatica* 40 (2004), Nr. 11, S. 1821–1844
- [2] ADAMY, J. ; LENS, H. : Stabilitätsnachweis für weiche strukturvariable Regelungen mit Zustandsbeobachter. In: *at - Automatisierungstechnik* 55 (2007), Nr. 3, S. 107–118
- [3] BOYD, S. ; GHAOUI, L. E. ; FERON, E. ; BALAKRISHNAN, V. : *Linear Matrix Inequalities in System and Control Theory*. Philadelphia : SIAM, 1994
- [4] BUHL, M. ; JOOS, P. ; LOHMANN, B. : Sättigende weiche strukturvariable Regelung. In: *at - Automatisierungstechnik* 56 (2008), Nr. 6, S. 316–323
- [5] HU, T. ; LIN, Z. : *Control Systems with Actuator Saturation*. Birkhäuser, 2001
- [6] LENS, H. ; ADAMY, J. : Observer Based Controller Design for the Stabilization of Linear Systems with Input Constraints. In: *Proceedings of the 17th World Congress of the International Federation of Automatic Control (IFAC), Seoul, Korea, 2008*, S. 9916–9921
- [7] SCHERER, C. ; GAHINET, P. ; CHILALI, M. : Multiobjective Output-Feedback Control via LMI Optimization. In: *IEEE Transactions on Automatic Control* 42 (1997), Nr. 7, S. 896–911
- [8] STURM, J. F.: Using SeDuMi 1.02, a MATLAB toolbox for optimization over symmetric cones. In: *Optimization Methods and Software* 11-12 (1999), 625–653. <http://sedumi.mcmaster.ca/>
- [9] VANANTWERP, J. G. ; BRAATZ, R. D.: A tutorial on linear and bilinear matrix inequalities. In: *Journal of Process Control* 10 (2000), S. 363 – 385
- [10] WREDENHAGEN, G. F. ; BÉLANGER, P. R.: Piecewise-linear LQ Control for Systems with Input Constraints. In: *Automatica* 30 (1994), Nr. 3, S. 403–416

# Time Domain Model Reduction by Moment Matching

Rudy Eid \*

\* Lehrstuhl für Regelungstechnik  
Technische Universität München  
Boltzmann Str. 15  
+49 89 289 15592  
+49 89 289 15653  
eid@tum.de

Boris Lohmann \*\*

\*\* Lehrstuhl für Regelungstechnik  
Technische Universität München  
Boltzmann Str. 15  
+49 89 289 15662  
+49 89 289 15653  
lohmann@tum.de

**Schlüsselwörter:** Order reduction, Krylov subspace, Large-scale systems.

One of the leading approaches in model reduction of large-scale linear dynamical system is Krylov-based order reduction. This projection-based and numerically efficient method aims at matching some of the first coefficients of the Taylor series' expansion of the transfer functions (called moments) of the original and reduced models. Even though this method is considered to be very successful and widely spread, it can not generally preserve the stability of the original model or directly guarantee a good approximation of the time responses of the system. In addition, it is still early to speak about an automatic Krylov-based order reduction where the user just defines how accurate the reduced-order model should be and keep the rest for the algorithm. This is mainly due to the absence of a global error bound and to the fact that several parameters of this method have still to be heuristically determined by the user based on the results obtained. These parameters include the order of the reduced model and the number and location of the expansion points  $s_0$  about which the moments are to be matched.

This presentation focuses on the time-domain properties of a reduced system obtained by these methods, and on the choice of the single expansion point about which the moment matching has to be achieved for a good time-domain approximation. By proving the equivalence of moment matching and Laguerre-based order reduction both in time and frequency-domain [2], [3], a time-domain interpretation for moment matching is offered. In addition, the problem of the choice of the expansion point is reformulated as finding the best choice for the free parameter  $\alpha$  in the Laguerre basis. Accordingly, two methods for the choice of this parameter are presented based on minimizing two objective functions involving the Laguerre coefficients of the impulse response. These methods are then integrated in the Krylov-based approach resulting in computationally efficient order reduction algorithms [4].

## Literatur:

- [1] A. C. Antoulas, *Approximation of Large-Scale Dynamical Systems*. Philadelphia: SIAM, 2005.
- [2] R. Eid, B. Salimbahrami, and B. Lohmann. *Equivalence of Laguerre-based model order reduction and moment matching*. IEEE Trans. on Automatic Control, 52(6):1104–1108, 2007.
- [3] R. Eid and B. Lohmann. *Moment matching model order reduction in time domain via Laguerre series*. In IFAC world congress, Seoul, South Korea, 2008.
- [4] B. Salimbahrami, R. Eid, and B. Lohmann. *On the Choice of an optimal interpolation point in Krylov-based order reduction*, In IEEE Conf. on Dec. and Cont., Cancun, Mexico, 2008.



# Stabilität und Regelung von Systemen mit unsicherer zeitvarianter Abtast- und Totzeit

Daniel Görge, Michal Izák und Steven Liu \*

\* Lehrstuhl für Regelungssysteme  
 Technische Universität Kaiserslautern  
 Erwin-Schrödinger-Straße 12, 67663 Kaiserslautern  
 Tel.: +49 631 205 2091|2091|4535  
 Fax: +49 631 205 4205  
 Email: goerges|izak|sliu@eit.uni-kl.de

**Schlüsselwörter:** Eingebettete und netzwerkbasierte Regelungssysteme, hybride Systeme, zeitvariante Systeme, Systeme mit Totzeit, geschaltete parameterabhängige Lyapunowfunktionen, Lineare Matrixungleichungen

Regelungssysteme werden zunehmend auf eingebetteten Rechnersystemen bzw. über Kommunikationsnetzwerke realisiert. Charakteristisch für solche *eingebetteten und netzwerkbasieren Regelungssysteme* sind Beschränkungen der Rechenleistung und der Netzwerkbandbreite. Um diese limitierten Ressourcen effizient zu nutzen, werden verstärkt *Schedulingverfahren* eingesetzt. Bei Anwendung eines Schedulingverfahrens bzw. einer Medienzugriffskontrolle (Medium Access Control) kann simultan nur ein Regelalgorithmus ausgeführt bzw. nur ein Datenpaket übertragen werden, wie in Abbildung 1 dargestellt. Dies führt zu zeitvarianten Abtastzeiten und beträchtlichen zeitvarianten Rechen- und Übertragungszeiten bzw. Totzeiten aus regelungstechnischer Sicht. Die konventionelle Theorie der Abtastregelungen [1] mit der Annahme konstanter Abtastzeiten und vernachlässigbarer Rechen- und Übertragungszeiten ist aufgrund dieser schedulingbedingter Effekte nicht anwendbar. Stattdessen werden neue Methoden zur Analyse und Synthese eingebetteter und netzwerkbasierter Regelungssysteme benötigt, um Stabilität und Performance zu gewährleisten.

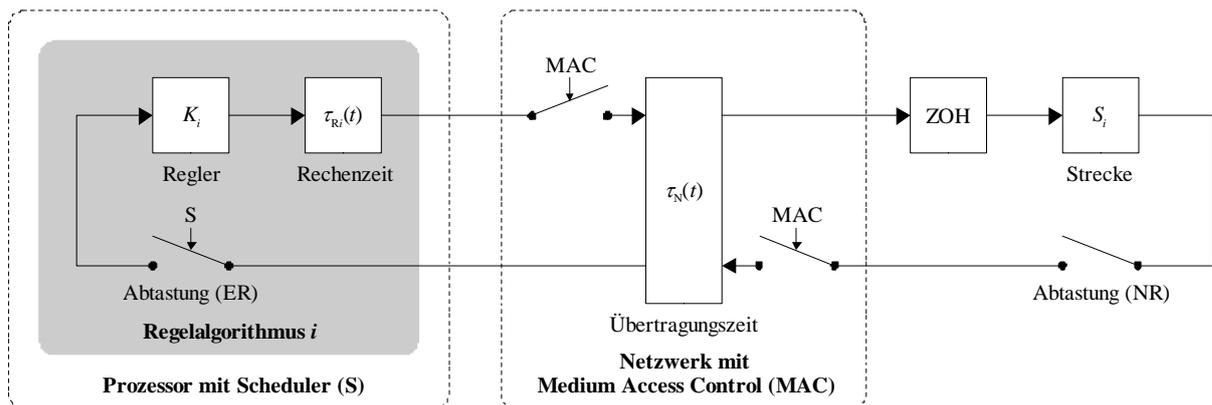


Abbildung 1: Allgemeine Architektur eines eingebetteten und netzwerkbasieren Regelungssystems (ER/NR) mit  $i = 1, \dots, N$  Regelkreisen

Eine Strategie hierfür bilden *implementierungsbewusste Regelungsverfahren*, die zeitvariante Abtast- und Totzeiten berücksichtigen. Hierbei sind Ansätze zu unterscheiden, die auf *Kompensation* [2, 3] oder *Robustheit* [4, 5] gegenüber irregulären Abtast- und Totzeiten beruhen.

In diesem Beitrag wird eine *robustheitsbasierte Methodik* zur Stabilitätsanalyse und Reglersynthese für *Systeme mit zeitvarianter Abtast- und Totzeit* vorgestellt. Die zeitvariante Abtast- und Totzeit wird als unsicher, jedoch auf geschalteten Intervallen beschränkt angenommen, siehe Abbildung 2. Dies bedeutet, dass die Abtast- und Totzeit beliebig zwischen Modi aus einer endlichen Menge umgeschaltet werden und in jedem Modus auf einem beschränkten Intervall variieren kann. Kenntnisse über das Zeitverhalten des eingebetteten und netzwerkbasieren Regelungssystems können unmittelbar auf diese Unsicherheitsbeschreibung abgebildet werden. Beispielsweise führen deterministische Schedulingalgorithmen und Medienzugriffsprotokolle wie in [6] dargelegt auf periodische Abtast- und Totzeitsequenzen. Die Abtast- und Totzeit variiert oftmals geringfügig innerhalb dieser periodischen Sequenzen. Die geschalteten Intervalle beschreiben dann die Elemente der periodischen Sequenzen. Das resultierende System mit geschalteter intervallbeschränkter Unsicherheit wird auf ein System mit geschalteter polytopischer and additiver normbeschränkter Unsicherheit transformiert. Es werden *Lineare Matrixungleichungen* (Linear Matrix Inequalities) [7] zur Stabilitätsanalyse und zum Entwurf eines stabilisierenden geschalteten Zustandsreglers basierend auf *geschalteten parameterabhängigen Ljapunowfunktionen* formuliert. Die Anzahl der LMIs, die für die Stabilitätsanalyse erforderlich ist, nimmt rapide mit der Knotenanzahl der Polytope zu. Teils ist die numerische Lösung der LMIs de facto nicht mehr möglich. Es werden daher zwei Algorithmen zur *Reduktion der Knotenanzahl* vorgeschlagen. Die Stabilitätsanalyse und die Reglersynthese werden schließlich anhand eines Beispiels veranschaulicht.

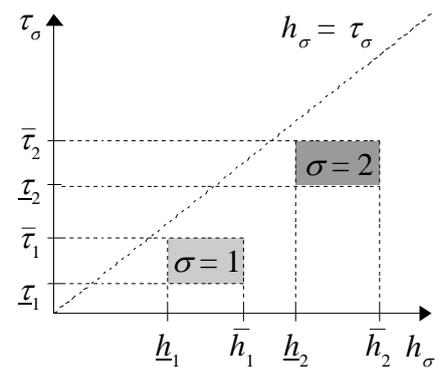


Abbildung 2: Geschaltete Intervallbeschränkte Unsicherheit (mit Abtastzeit  $h_\sigma$ , Totzeit  $\tau_\sigma < h_\sigma$  und Modus  $\sigma$ )

## Literatur:

- [1] ÅSTRÖM, K.-J. ; WITTENMARK, B.: *Computer-Controlled Systems : Theory and Design*. 2. Aufl. Englewood Cliffs, NJ : Prentice-Hall, 1990
- [2] SCHINKEL, M. ; CHEN, W.-H. ; RANTZER, A.: Optimal Control for Systems with Varying Sampling Rate. In: *Proceedings of the 2002 American Control Conference*, 2002, S. 2979 – 2984
- [3] IZÁK, M. ; GÖRGES, D. ; LIU, S.: On Stability and Control of Systems with Time-Varying Sampling Period and Time Delay. In: *Proceedings of the 7th IFAC Symposium on Nonlinear Control Systems*, 2007, S. 1056 – 1061
- [4] HETEL, L. ; DAAFOUZ, J. ; LUNG, C.: Stabilization of Arbitrary Switched Linear Systems With Unknown Time-Varying Delays. In: *IEEE Transactions on Automatic Control* 51 (2006), Nr. 10, S. 1668 – 1674
- [5] IZÁK, M. ; GÖRGES, D. ; LIU, S.: Stability and Control of Systems with Uncertain Time-Varying Sampling Period and Time Delay. In: *Proceedings of the 17th IFAC World Congress*, 2008, S. 11514 – 11519
- [6] GÖRGES, D. ; IZÁK, M. ; LIU, S.: Optimal Control of Systems with Resource Constraints. In: *Proceedings of the 46th IEEE Conference on Decision and Control*, 2007, S. 1070 – 1075
- [7] Boyd, S. ; El Ghaoui, L. ; Feron, E. ; Balakrishnan, V.: *Linear Matrix Inequalities in System and Control Theory*. Philadelphia, PA : SIAM, 1994

Entwicklung robuster PI-Beobachter für unbekannte Eingänge sowie nichtlineare Systeme

Yan Liu, M.Eng.

Lehrstuhl Steuerung, Regelung und Systemdynamik,  
Universität Duisburg-Essen,  
Yan.liu@uni-due.de

Proportional-Integral-Beobachter (PI-Beobachter) als High-Gain-Störgrößenbeobachter zur Anwendung für Regelungen und zur Fehlerdiagnose sind Gegenstand zahlreicher Veröffentlichungen. Im Kern geht die Robustheit der Methode zur Schätzung unbekannter Eingänge mit einer zusätzlichen Empfindlichkeit gegenüber Modellbildungsfehlern sowie gegenüber Messrauschen einher. Die Arbeiten der letzten Jahre im Lehrstuhl SRS konzentrierten sich daher auf die quantifizierbare Bestimmung eines entsprechenden einstellbaren Optimums bei der Bestimmung der Verstärkungskoeffizienten des High-Gain-Beobachters.

In diesem Beitrag wird weitergehend eine Strategie zur Online-Optimierung der Verstärkungsmatrix des PI-Beobachters sowie ein Anwendungsbeispiel gezeigt. Im Ergebnis wird dargestellt, dass entsprechend einer einstellbaren Empfindlichkeit eine entsprechende max. Schätzqualität sowohl von Zustand als auch von unbekanntem Eingang erzielt werden kann.

Als zweite Erweiterung der PI-Beobachertechnik wird geprüft, ob und unter welchen Bedingungen der PI-Beobachter auf exakt linearisierbare nichtlineare Systeme angewendet werden kann, um beispielsweise die Robustheit der Regelung einer Klasse nichtlinearer Systeme zu verbessern. Ein praktisches Beispiel wird die Anwendungsmöglichkeiten und die Realisierung der robusten nichtlinearen Regelung illustrieren.



# Zustandsmengenbeobachtung zur konsistenzbasierten Fehlerdiagnose nichtlinearer Systeme

Florian Wolff\*

Volker Krebs\*\*

\*Institut für Regelungs- und Steuerungssysteme  
Universität Karlsruhe (TH)  
Kaiserstr. 12  
Tel.: 0721 608-2467  
Fax: 0721 608-2707  
wolff@irs.uni-karlsruhe.de

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

**Schlüsselwörter:** Fehlerdiagnose, nichtlineare Systeme, Zustandsmengenbeobachtung, Intervallverfahren

Leistungsfähige Diagnoseverfahren liefern einen wertvollen Beitrag für den sicheren und zuverlässigen Betrieb komplexer technischer Systeme. Darüber hinaus können durch den Einsatz geeigneter Diagnoseverfahren unnötige Kosten durch erhöhten Wartungsaufwand oder verringerte Systemlebensdauer vermieden werden. Beim Entwurf von Diagnoseeinrichtungen stehen häufig die beiden gegensätzlichen Anforderungen *Robustheit* und *Empfindlichkeit* im Mittelpunkt der Überlegungen. Einerseits sollen keine Fehlalarme aufgrund von Messrauschen oder ungenauen Systemmodellen auftreten, andererseits müssen aufgetretene Fehler so früh wie möglich erkannt werden, um durch geeignete Gegenmaßnahmen eine weitergehende Schädigung des Systems zu vermeiden.

In diesem Vortrag wird ein konsistenzbasiertes Diagnoseverfahren auf der Basis der Zustandsmengenbeobachtung nichtlinearer Systeme vorgestellt. Ein ähnliches Verfahren wurde in [1] für lineare Systeme entwickelt. Die Grundidee des Verfahrens ist, Fehlerfälle, die nicht konsistent mit den gemessenen Größen sind, garantiert auszuschließen und so ein robustes Diagnoseergebnis zu erhalten. Die Empfindlichkeit des Verfahrens kann dabei durch die Annahmen über die Mess- und Modellunsicherheiten beeinflusst werden.

Im Gegensatz zu klassischen Beobachterkonzepten, bei denen der tatsächliche Systemzustand auf Basis eines Prozessmodells und der zur Verfügung stehenden Messinformationen bestmöglich rekonstruiert wird, hat die Zustandsmengenbeobachtung das Ziel, eine Menge möglicher Zustände zu bestimmen, die sich mit dem vorhandenen Wissen über das System und die Messwerte von Ein- und Ausgangsgrößen erklären lassen. Die berechnete Zustandsmenge soll dabei so klein wie möglich sein, andererseits aber den tatsächlichen Systemzustand unter Berücksichtigung der vorhandenen Mess- und Modellunsicherheiten garantiert enthalten.

Die Zustandsmengenbeobachtung basiert auf einem zeitkontinuierlichen nichtlinearen Prozessmodell, dessen Parameter beschränkte Unsicherheiten aufweisen, welche durch Intervalle dargestellt werden. In gleicher Weise sind die Messinformationen mit unbekanntem, aber beschränkten Unsicherheiten behaftet, die ebenfalls als Intervalle aufgefasst werden können. Dieses Problem der Zustandsmengenbeobachtung nichtlinearer Systeme kann mithilfe von *validierenden Lösungsverfahren für gewöhnliche Differentialgleichungssysteme* gelöst werden [2]. Diese Verfahren aus der numerischen Mathematik wurden ursprünglich zur Simulation von Differentialgleichungssystemen entwickelt, die im Gegensatz zu klassischen Simulationsverfahren keine Näherungslösung berechnen, sondern

die tatsächliche Lösung mittels einer unteren und einer oberen Schranke einschließen. In [3] wurde ein solches Verfahren für den Einsatz als Zustandsmengenbeobachter weiterentwickelt. Basierend auf einer Taylorreihenentwicklung der Systemfunktion in Intervallarithmetik [4] kann dabei durch eine Intervalleinschließung des Taylorreihenrestes eine Zustandsmenge präzisiert werden, die den tatsächlichen Systemzustand garantiert, d.h. unter Berücksichtigung von Mess- und Modellunsicherheiten sowie von Rechenungenauigkeiten, einschließt. Unter Verwendung der Messinformationen über die Systemausgangsgrößen kann die präzisierte Menge mithilfe eines impliziten Intervallverfahrens korrigiert werden.

Das Ergebnis der Zustandsmengenbeobachtung ist schließlich eine Menge möglicher Zustände, die konsistent mit dem Systemmodell, den Messwerten und den Annahmen über die Unsicherheiten ist. Ist die berechnete Zustandsmenge leer, so passen das modellierte und das tatsächliche Systemverhalten, das durch die Messinformationen gegeben ist, auch unter Berücksichtigung der Unsicherheiten garantiert nicht zusammen. Es existiert also kein Zustand, der sowohl durch das Systemmodell, als auch die Messungen erklärt werden kann. Umgekehrt bedeutet dies, dass das verwendete Systemmodell nicht die Realität beschreiben kann, sofern man voraussetzt, dass die Annahmen über die Unsicherheiten korrekt sind.

Diese Eigenschaft der Zustandsmengenbeobachtung lässt sich vorteilhaft für ein konsistenzbasiertes Diagnoseverfahren einsetzen. Unter Verwendung eines Systemmodells für das fehlerfreie Systemverhalten kann ein Fehler dann detektiert werden, wenn das zugehörige Systemmodell nicht konsistent mit der Realität ist, d.h. der Zustandsmengenbeobachter eine leere Schnittmenge liefert. Da in diesem Fall das tatsächliche Systemverhalten mit Sicherheit nicht dem modellierten Verhalten entspricht, ist garantiert ein Fehler aufgetreten. Für die Fehlerisolation werden mehrere Systemmodelle verwendet, von denen jedes ein charakteristisches fehlerbehaftetes Systemverhalten beschreibt. Werden alle diese Fehlerfälle als inkonsistent ausgeschlossen, so kann lediglich festgestellt werden, dass ein unbekannter bzw. nicht modellierter Fehler aufgetreten ist. Erweisen sich alle Fehlermodelle bis auf eines als inkonsistent, so kann der zugehörige Fehler als isoliert betrachtet werden. Das resultierende Diagnoseverfahren ist demnach robust, da es garantiert keine Fehlalarme liefert. Die Empfindlichkeit des Diagnoseverfahrens kann durch die verwendeten Mess- und Modellunsicherheiten beeinflusst werden.

Die Leistungsfähigkeit des entwickelten Diagnoseverfahrens wird anhand eines inversen Pendels sowie eines Beispiels aus der Automobiltechnik, einer Drosselklappe zur Beeinflussung der Abgasrückführrate in modernen Dieselmotoren, demonstriert.

- [1] P. Planchon: *Guaranteed Diagnosis of Uncertain Linear Systems Using State-Set Observation*, Dissertation, Logos Verlag, 2007
- [2] N. S. Nedialkov: *Computing Rigorous Bounds on the Solution of an Initial Value Problem for an Ordinary Differential Equation*, PhD thesis, University of Toronto, 1999
- [3] F. Wolff, P. Krutina, V. Krebs: *Robust Consistency-Based Diagnosis of Nonlinear Systems by Set Observation*, IFAC World Congress, Seoul, 2008
- [4] L. Jaulin, M. Kieffer, O. Didrit, E. Walter: *Applied Interval Analysis*, Springer Verlag, London, 2001

# Entwicklung und Erprobung eines Systems zur kreisellosen Nordrichtungbestimmung auf Grundlage von Beschleunigungsmessungen

Tom Pöthig

Lehrstuhl für Regelungssysteme und Leittechnik  
Brandenburgische Technische Universität Cottbus  
Konrad-Wachsmann-Allee 1, 03046 Cottbus  
Tel. 0355-694352  
Fax 0355-692453  
tom.poethig@tu-cottbus.de

**Schlüsselwörter:** kreiselloser Nordsucher, Coriolisbeschleunigung

Zur Bestimmung der Nordrichtung für z.B. Navigationszwecke werden üblicherweise Kreisel eingesetzt. Für low-cost Applikationen sind jedoch kostengünstigere kreisellose Verfahren wünschenswert und daher Gegenstand der Forschung. So wird in [1], [2], [3] ein Nordsuchverfahren beschrieben, das als sensibles Element Beschleunigungsaufnehmer beinhaltet, die orthogonal auf einem sich mit konstanter Geschwindigkeit rotierenden Drehtisch befestigt sind. Das Messprinzip beruht auf der Coriolisbeschleunigung, welche die Sensoren erfahren, die sich in dem drehenden Bezugssystem der Erde bewegen (Vgl. Abb.1). Der zeitliche Verlauf der gemessenen Coriolisbeschleunigung gibt Aufschluss über die gesuchte Nordrichtung. Dieses Messverfahren verspricht eine schnelle Einschwingzeit, eine relativ hohe Messgenauigkeit, eine geringe Empfindlichkeit gegenüber Offset- und Skalenfaktorfehlern der verwendeten Sensoren und ermöglicht daher den Einsatz kostengünstiger MEMS - Beschleunigungsaufnehmer. Eine erste experimentelle Erprobung des generellen Verfahrens wurde bisher lediglich in [1] präsentiert.

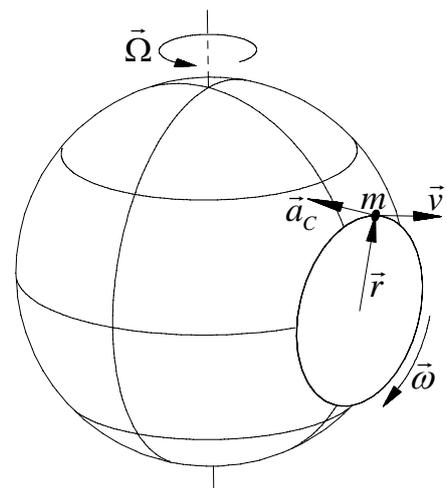


Abbildung 1: Ein Massenpunkt  $m$ , der sich mit der Relativgeschwindigkeit  $\vec{v} = \vec{\omega} \times \vec{r}$  kreisförmig in einem rotierenden Bezugssystem der Winkelgeschwindigkeit  $\vec{\Omega}$  bewegt, erfährt die Coriolisbeschleunigung  $\vec{a}_c = 2\vec{\Omega} \times (\vec{\omega} \times \vec{r})$ .

In diesem Beitrag wird ein umfassenderes Modell dieses Nordsuchers theoretisch und experimentell vorgestellt. Fehlerquellen, wie z.B. die anteilig eingekoppelte Erdschwere oder durch Fertigungsungenauigkeiten der Wälzlager hervorgerufene Vibrationen, welche die Messgenauigkeit beträchtlich herabsetzen können, werden darin berücksichtigt und deren Einfluss auf das Messergebnis wird analysiert. Es wird gezeigt, wie durch die gleichzeitige Messung mit mehreren Beschleunigungsaufnehmern das Coriolissignal mit hoher Genauigkeit ermittelt werden kann. Dabei werden die Sensorsignale so miteinander verrechnet, dass sich auftretende Störungen kompensieren. Dieser erweiterte Messaufbau gestattet neben der Bestimmung der Nordrichtung auch die Ermittlung der räumlichen Orientierung der Anordnung. Unbekannte Parameter, wie z.B. die Skalenfaktoren und die Anordnung der Sensoren auf dem Drehtisch, werden durch Kalibriermessungen bestimmt. Parameter, die durch Umwelteinflüsse einer zeitlichen Änderung unterliegen, können durch eine Selbstkalibrierungsprozedur bestimmt werden, deren Grundlage das unterschiedliche Verhalten der Coriolisbeschleunigung und der auftretenden Störungen bezüglich der Winkelgeschwindigkeit des Drehtisches ist. Schließlich werden ein Versuchsaufbau und die Resultate bereits durchgeführter Messungen vorgestellt, ergänzt durch Simulationsergebnisse. Sie bestätigen die Richtigkeit des hergeleiteten Modells und zeigen, dass trotz der angesprochenen Störeinflüsse das Coriolissignal, und somit auch die Nordrichtung, bei verschiedenen räumlichen Orientierungen der Messanordnung mit hoher Genauigkeit bestimmt werden können.

## Literatur:

- [1] Y. Bar-Itzhack u.a.: *New Inertial Azimuth Finder Apparatus*. Journal of Guidance Control and Dynamics, 24(2):206 – 213, 2001.
- [2] B. Li u.a.: *Study and Simulation on a Dynamic Gyroless North Finder*. In: *Position Location and Navigation Symposium, IEEE 2000.*, Seiten 502 – 505, 2000.
- [3] G. Sun u.a.: *Accelerometer Based North Finding System*. In: *Position Location and Navigation Symposium, IEEE 2000.*, Seiten 399 – 403, 2000.
- [4] T. Pöthig, G. Lappus: *Non-Gyroscopic North Finding System*. In: Trommer, G.F. (Herausgeber): *Symposium Gyro Technology 2008*, Karlsruhe, 2008.

# Prozessüberwachung bei der Produktion von Starterkulturen unter Zuhilfenahme Neuronaler Netze

Joachim Hörrmann

\* Lehrstuhl/Institut  
Christian-Albrechts-Universität zu Kiel  
Kaiserstraße 2, 24143 Kiel  
0431 880 6285  
0431 880 6278  
[jh@tf.uni-kiel.de](mailto:jh@tf.uni-kiel.de)

Helmut Röck

\*\* Lehrstuhl/Institut  
Christian-Albrechts-Universität zu Kiel  
Kaiserstraße 2, 24143 Kiel  
0431 880 6276  
0431 880 6278  
[hr@tf.uni-kiel.de](mailto:hr@tf.uni-kiel.de)

**Schlüsselwörter:** Softwaresensor, Neuronale Netze, biotechnologische Systeme

Aufgrund der gestiegenen Anforderungen an Qualität und Ausbeute biotechnologischer Prozesse gewinnt der Einsatz innovativer Prozessführungskonzepte auch in der Lebensmittelindustrie mehr und mehr an Bedeutung.

Aus diesem Grund ist es notwendig, Prozessführungskonzepte zu entwickeln, die den Ansprüchen dieses Industriezweiges genügen und eine gleichbleibend hohe Produktqualität und Produktausbeute gewährleisten zu können [1]. Die besten Regelungskonzepte können jedoch nicht zu einem zufriedenstellenden Ergebnis führen, solange keinerlei Information über die internen Prozessvorgänge in Echtzeit vorliegt. Die bisher verfügbaren Hardware Sensoren sind nicht in der Lage, die wichtigsten Prozessgrößen, beispielsweise die Keimzahl, online zu bestimmen. Ein vielversprechender Ansatz um diesen Unzulänglichkeiten zu begegnen, ist der Einsatz von Softwaresensoren.

Am Lehrstuhl für Automatisierungs- und Regelungstechnik der CAU Kiel wird die Fermentation des Bakteriums *Streptococcus thermophilus*, einem wichtigen Bestandteil bei der Produktion von Milchprodukten wie Joghurt und Käse detailliert untersucht um eine Verbesserung der Produktqualität zu erreichen.

Dieser Beitrag beschäftigt sich mit der Möglichkeit der Echtzeitbestimmung der wichtigsten Prozessgrößen dieses Fermentationsprozesses, der Keimzahl, sowie den Konzentrationen des Substrats Laktose und des Produkts Laktat, wobei die zur Verfügung stehenden Messgrößen lediglich den pH-Wert und die Leitfähigkeit des Mediums beinhalten.

Als effektivstes Werkzeug hat sich dabei die Kombination aus einem modellbasierten Full-Horizon-Observer [2] und Neuronalen Netzen (ANN) [3] herausgestellt. Die ANN sind in der Lage, die qualitative Entwicklung der gesuchten Zustandsgrößen sehr gut wiederzugeben. Das quantitative Schätzergebnis hängt jedoch maßgeblich von der Qualität der Anfangswerte der gesuchten Zustandsgrößen ab. Die Konzentration von Substrat und Produkt im Medium können zwar bereits vor Fermentationsbeginn mit Hilfe eines enzymatischen UV-Tests bestimmt werden, für die Ermittlung der Anfangskeimzahl steht jedoch keine solche Methode zur Verfügung. Aus diesem Grund wird zu Beginn des Prozesses dem ANN der modellbasierte Full-Horizon-Observer parallel geschaltet, vgl. Abbildung 1.

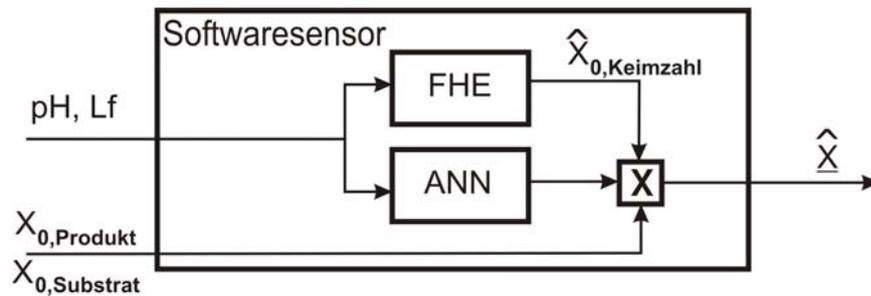


Abbildung 1: Strukturelle Darstellung des eingesetzten Softwaresensors

Der Beobachter minimiert zu Beginn des Fermentationsprozesses mit Hilfe eines mathematischen Prozessmodells ein Gütefunktional, um den Anfangswert der Keimzahl zu ermitteln. Als Messwerte steht dabei der pH-Wert zur Verfügung, der direkt mit der Konzentration des Produkts Laktat korreliert.

Durch diese Kombination beider Methoden können die gesuchten Zustandsgrößen über den kompletten Fermentationsverlauf hinweg auch in quantitativer Hinsicht sehr gut wiedergegeben werden.

### Literatur:

- [1] O. Gronau. Produktion von *Streptococcus thermophilus* im Diafiltrationsprozess. Master's thesis University of Applied Sciences, Hamburg, 2005
- [2] D. G. Robertson, J. H. Lee and J. B. Rawlings. A moving horizon-based approach for least-squares estimation. *AiChE Journal*, 42(8):2209-2224, 1996.
- [3] D. R. Baughman and Y. A. Liu. Neural Networks in Bioprocessing and Chemical Engineering. Academic Press Inc., San Diego, 1995.

# Methoden zur optimalen Betriebsführung elektrischer Energiesysteme mit dezentralen fluktuierenden Erzeugern

Peter Bretschneider\*

\* Arbeitsgruppe Energiesysteme

Fraunhofer-Anwendungszentrum Systemtechnik  
Am Vogelherd 50  
98693 Ilmenau  
Telefon: 03677 / 461-102  
Fax: 03677 / 461-100  
peter.bretschneider@ast.iitb.fraunhofer.de

Christoph Ament\*\*

\*\* Fachgebiet Systemanalyse / Institut für Automatisierungs- und Steuerungstechnik  
Technische Universität Ilmenau  
Gustav-Kirchhoff-Strasse 1  
98684 Ilmenau  
Telefon: 03677 / 69-2815  
Fax: 03677 / 69-1434  
christoph.ament@tu-ilmenau.de

**Schlüsselwörter:** Energievorhersage, Prognoseunsicherheit, Energieoptimierung

Seit knapp einem Jahrzehnt sind die elektrischen Energiesysteme von einem tiefgreifenden Wandel geprägt. Maßgebliche Treiber sind die Liberalisierung des Energie-, Zähl- und Messmarktes, der stetig wachsende Anteil dezentraler Einspeisungen sowie die erheblich gestiegenen Energie- und Brennstoffkosten. Infolgedessen müssen die elektrischen Energiesysteme den freien Energiehandel für alle Marktteilnehmer ermöglichen, fluktuierende dezentrale Einspeisungen aufnehmen und bei höchstmöglicher Belastung ein hohes Maß an Zuverlässigkeit aufweisen.

Mittel- bis langfristig ist neben der Erneuerung der Großkraftwerke mit dem weiteren Ausbau der dezentralen Einspeisungen insbesondere im Bereich der Wind- und Photovoltaikenergie aber auch mit dem Einsatz von dezentralen stationären und mobilen Energiespeichern zu rechnen [3].

Weitere Maßnahmen zielen auf die Einsparung und effiziente Nutzung der elektrischen Energie. Hierzu zählen im Haushaltsbereich z.B. die Einführung von Smart Metern und darauf aufbauende IT-Systeme zur Umsetzung von Demand-Response- und Demand-Side-Management-Lösungen.

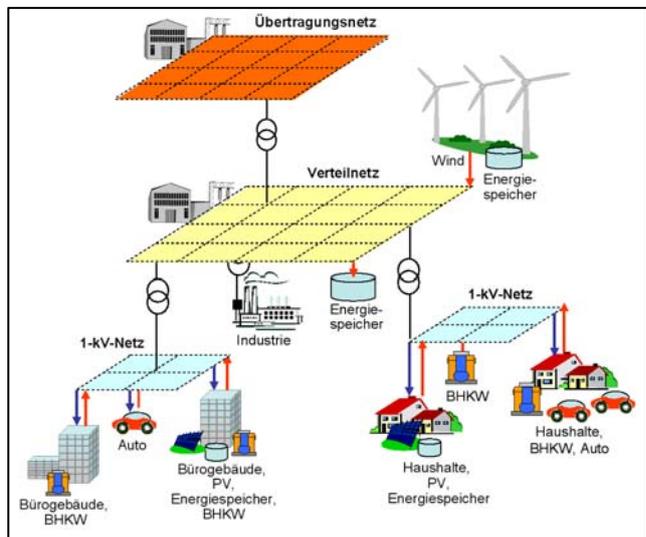


Abbildung 1: Entwicklungsszenario des elektrischen Energiesystems

Die skizzierten Beispiele zeigen nur ausschnittsweise die Entwicklungen im Bereich der elektrischen Energiesysteme und führen zu der in Abbildung 1 dargestellten Systemstruktur. Charakteristisch hierfür sind der hohe Anteil fluktuierender Einspeisungen und die zunehmend schlecht prognostizierbaren Abnehmer – hervorgerufen z.B. durch Demand-Response-Lösungen.

Im Rahmen der Betriebsführung müssen diese neuen Herausforderungen berücksichtigt werden und ergeben für das zugrundeliegende Energiemanagementsystem die in Abbildung 2 zu sehende Systemarchitektur [1].

In diesem Beitrag werden der konzeptionelle Ansatz sowie ausgewählte Methoden und Verfahren des entworfenen und mittlerweile softwaretechnisch umgesetzten Energiemanagementsystems vorgestellt. Die Ausführungen beinhalten Methoden zur Vorhersage der dezentralen Einspeisungen [2] und des Bedarfsverhaltens [4], [5], Algorithmen zur Bewertung von Prognoseunsicherheiten sowie Verfahren für die multikriterielle Optimierung energiewirtschaftlicher Problemstellungen [6], [7].

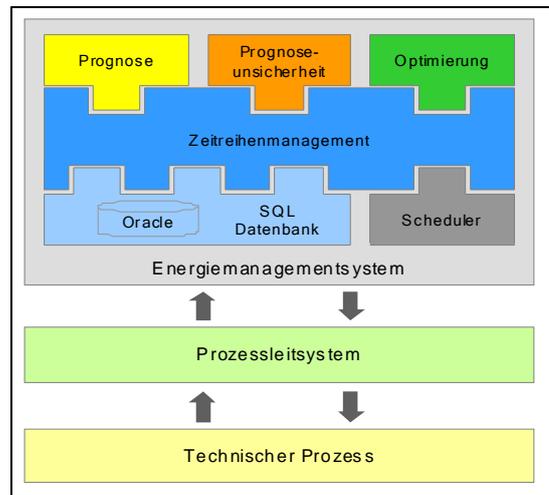


Abbildung 2: EMS-Systemarchitektur

Anhand simulativer Untersuchungen wird die Leistungsfähigkeit der vorgestellten Verfahren nachgewiesen und mit den Ergebnissen klassischer Ansätze verglichen. Den Abschluss bildet ein Ausblick auf die weiteren Arbeiten im Bereich des Energiemanagements.

## Literatur:

- [1] Bretschneider, P.: „Methoden und Lösungen für das Energiemanagement im liberalisierten Energiemarkt“, GMA-Fachausschuss, Bommernholz, 2006
- [2] Hasche, B.: Analysen von Prognosen der Windgeschwindigkeit und Windstromeinspeisung. Teilbericht im Projekt NetMod, IER Universität Stuttgart; 2007
- [3] Westermann, D.; Nicolai, S.; Bretschneider, P.: Energy Management for Distribution Networks with Storage Systems - A Hierarchical Approach. IEEE Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, S. 1-6; 2008
- [4] Bretschneider, P.: Ein Beitrag zur Vorhersage musterbasierter nichtlinearer stochastischer Signale. Dissertation, TU Ilmenau, 2002
- [5] Schlittgen, R.; Streitberg, B. H. J.: Zeitreihenanalyse. Oldenbourg Verlag, 9. Auflage, München, Wien; 2001
- [6] „Entwicklung eines Programmsystems zur Optimierung der Fahrweise von Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen“, Martin Hanselmann, Universität Stuttgart 1996
- [7] „Integrierte Ressourcenplanung in der Energiewirtschaft mit Ansätzen aus der Kraftwerkseinsatzplanung“, Jonas Albiger, Universität Stuttgart 1997

# Effiziente Aggregation von Markov-Modellen für Sicherheitsnachweise in der Mechatronik

Michael Blum\*

\* Lehrstuhl für Informationstechnik im  
Maschinenwesen  
Technische Universität München  
Boltzmanstraße 15  
85748 Garching bei München  
Telefon: 089/ 289 -16424  
Fax: 089/ 289 -16410  
E-Mail: blum@itm.tum.de

Frank Schiller\*\*

\*\* Lehrstuhl für Informationstechnik im  
Maschinenwesen  
Technische Universität München  
Boltzmanstraße 15  
85748 Garching bei München  
Telefon: 089/ 289 -16402  
Fax: 089/ 289 -16410  
E-Mail: schiller@itm.tum.de

**Schlüsselwörter:** Automatisierungstechnik, Markov-Modell, Modellgenerierung, Probability of dangerous Failure per Hour (PFH), Safety, Sicherheitsnachweis

Sicherheit muss, nach gültiger Normenlage, in der Automatisierungstechnik qualitativ wie auch quantitativ nachgewiesen werden. Der Herausforderung eines quantitativen Nachweises steht der Maschinen- und Anlagenbauer meist unvorbereitet gegenüber. Normen und Richtlinien bieten nur Anhaltspunkte für wenige, spezielle Sicherheitsarchitekturen [1]. Oft werden daher starke Vereinfachungen bei der Modellierung vorgenommen, um die realen Systeme auf diese Architekturen abzubilden. Da in der Sicherheitstechnik üblicherweise zur „sicheren Seite“ abgeschätzt wird, führen diese Vereinfachungen oftmals zu unnötig schlechten Sicherheitskennwerten und letztendlich zu kostenintensiveren Lösungen zur Erreichung der geforderten Kennwerte.

Innerhalb des BMBF-Projektes ZuverSicht wird daher ein Konzept entwickelt, das den Sicherheitsnachweis für den Maschinen- und Anlagenbauer deutlich einfacher gestaltet, aber dennoch eine gerechte Sicherheitsbewertung ermöglicht.

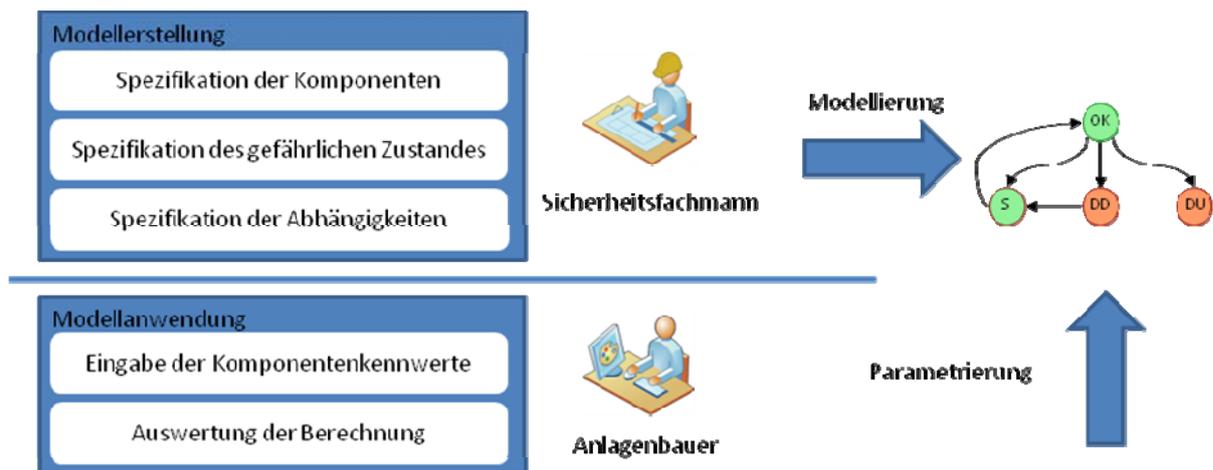


Abbildung 1: Zweistufiges Vorgehen

Der Vortrag stellt eine zweistufige Methode zur einfachen Berechnung komplexer Sicherheitssysteme vor (Abbildung 1). Die Aufteilung in zwei Stufen ergibt sich durch die unterschiedlichen Rollen bei der Umsetzung von Sicherheitsfunktionen. Ein Sicherheitsfachmann kann die Architektur von Sicherheitsfunktionen festlegen und besitzt die nötigen Informationen zur Erstellung eines Systemmodells. Der

Anlagenbauer wiederum kennt die individuellen Auslegungen der benötigten Komponenten. Er kann und muss die endgültige Auswahl der Komponenten innerhalb vorgegebener Rahmenbedingungen festlegen. Diese Entkopplung der Modellierung der Architektur von der Parametrierung mit Kennwerten ermöglicht eine breitere Anwendbarkeit der Systemmodelle. Oft ändern sich nur Parameter bei der Verwendung einer größer dimensionierten Komponente, der Aufbau der Funktion bleibt jedoch gleich.

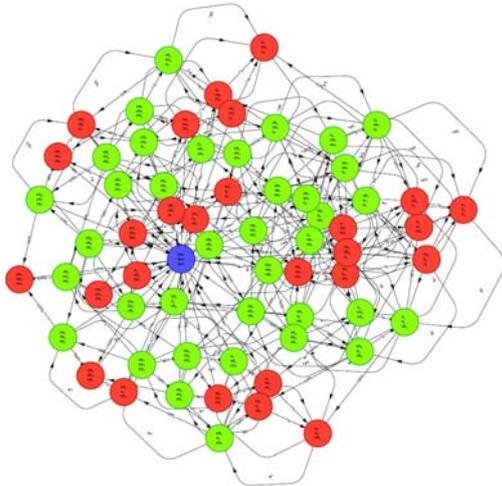


Abbildung 2: Markov-Modell 1oo2

Kern der ersten Stufe der Methode ist die Generierung umfassender Markov-Modelle auf Basis von leicht verständlichen Modellen. Abbildung 2 zeigt das generierte Markov-Systemmodell eines zweikanaligen Systems mit Diagnose (1 out of 2). Eine manuelle Erstellung dieses Modells erfordert viel Erfahrung mit Markov-Modellen und ist, bedingt durch den Umfang, sehr fehleranfällig. Die Reduzierung des benötigten Modellierungsaufwands und die Minimierung der Fehlermöglichkeiten sind Ziel des Konzeptes. Mit der vorgestellten Methode ist der Modellierer in der Lage, dieses komplexe Systemmodell zu erzeugen.

Die Beschreibung des Sicherheitsmodells gliedert sich in drei Schritte. Zunächst wird das Verhalten der beteiligten Komponenten durch Auswahl eines Komponentenmodells spezifiziert. Im nächsten Schritt wird der gefährliche Zustand mit einer an Zuverlässigkeitsblockdiagramme angelehnten Modellierung definiert. Dies erfolgt grafisch und weitgehend intuitiv. Abbildung 3 zeigt das Modell des sicheren Zustandes für ein System mit zwei redundanten Sensoren und einem Vergleicher. Bei der anschließenden Spezifikation der Abhängigkeiten werden beispielsweise ausfallbedingte Veränderungen von Testraten, Fehler gemeinsamer Ursache sowie Betriebs- und Reparaturstrategien berücksichtigt. Das gesamte Vorgehen wird durch ein Tool auf Basis von Matlab unterstützt und dokumentiert. Modellvereinfachungen [3] werden automatisiert durchgeführt.

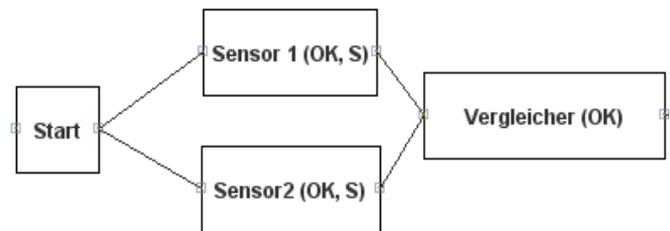


Abbildung 3: Beispielmodell

Der Anlagenbauer benötigt in der zweiten Stufe lediglich die Komponentenkenwerte wie Ausfall- und Testraten. Mit diesen Werten wird das Modell parametrierung und der gewünschte Sicherheitskennwert bestimmt.

## Literatur:

- [1] DIN EN ISO 13849-1, Norm , 2007-07, *Sicherheit von Maschinen - Sicherheitsbezogene Teile von Steuerungen - Teil 1: Allgemeine Gestaltungsleitsätze* (ISO 13849-1:2006); Deutsche Fassung EN ISO 13849-1, Beuth, Berlin 2006
- [2] T. Gabriel, L. Litz, B. Schrörs: Generische Erzeugung von Markov-Modellen zur Berechnung sicherheitstechnischer Kenngrößen in PLT-Schutzeinrichtungen, in: *atp*, 7/2008, S. 53-60, Oldenbourg, München.

[3] U. Höfle-Isphording: *Zuverlässigkeitsrechnung*, Springer 1978.