

17. – 19. Februar 2016

# Programm

Kurzfassungen zum Download unter:

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

## Mittwoch, 17. Februar 2016

nachmittags **Anreise**

18:00 **Abendessen** im Rheinhotel Bellevue

## Donnerstag, 18. Februar 2016

08:15 – 08:30 **Eröffnung und Begrüßung** (Stadthalle, Haupttagungsraum im EG)  
*Prof. Dr.-Ing. Dirk Abel*

| Haupttagungsraum im EG |   | Tagungsraum im 3. OG   |
|------------------------|---|--|
| 08:30 – 10:00          | <b>Modellierung, Regelung von Manipulatoren</b><br>Sitzungsleitung: Prof. Sawodny   | <b>Zustandsraummethoden</b><br>Sitzungsleitung: Prof. Adamy  |
| 08:30 – 09:00          | Modellierung und modellbasierte Regelung von Kontinuumsmanipulatoren<br><i>Valentin Falkenhahn (Institut für Systemdynamik, Universität Stuttgart, Prof. Sawodny, Gr. 27)</i>                             | Über die Äquivalenz zwischen strenger Passivität und streng positiver Reellheit linearer Systeme<br><i>Diego de S. Madeira (Regelungsmethoden und Robotik, TU Darmstadt, Prof. Adamy, Gr. 7)</i>                                 |
| 09:00 – 09:30          | Numerisch robuste Modellierung von Reib- und Kontaktprozessen in mechanischen Systemen<br><i>Michael Buchholz (Institut für Mess-, Regel- und Mikrotechnik, Universität Ulm, Prof. Dietmayer, Gr. 28)</i> | Modellbildung und Vergleich von linearen und nichtlinearen Regelungskonzepten für Drei-Wege-Autoabgaskatalysatoren<br><i>Radoy Stanchev (Fachgebiet Regelungstechnik und Mechatronik, TU Darmstadt, Prof. Konigorski, Gr. 7)</i> |
| 09:30 – 10:00          | Formale Reglersynthese mittels konvexer Kombinationen<br><i>Bastian Schürmann (Lehrstuhl für Robotik und Echtzeitsysteme, TU München, Prof. Althoff, Gr. 21)</i>  | Optimierte Zustandsraumdiskretisierung für den abstraktionsbasierten Reglerentwurf<br><i>Gunther Reissig (Institut für Steuer- und Regelungstechnik, Universität der Bundeswehr München, Prof. Svaricek, Gr. 22)</i>             |

10:00 – 10:30 **Kaffee-/Teepause** im Foyer der Stadthalle

| 10:30 – 12:30 | <b>Vernetzte Systeme, Sensorfusion</b><br>Sitzungsleitung: Prof. Hirche  | <b>Verteilt-parametrische Systeme</b><br>Sitzungsleitung: Prof. Meurer   |
|---------------|--|--|
| 10:30 – 11:00 | Regelung kooperativer Manipulatoren mit kinematischen Modellunsicherheiten<br><i>Sebastian Erhart (Institut für Informationstechnische Regelung, TU München, Prof. Hirche, Gr. 21)</i> | Trajektorienplanung für die dreidimensionale Stokes-Gleichung<br><i>Julian Andrej (Lehrstuhl für Regelungstechnik, Christian-Albrechts-Universität Kiel, Prof. Meurer, Gr. 24)</i> |

17. – 19. Februar 2016

|               |  |   |
|---------------|--|---|
| 11:00 – 11:30 | Marktähnliche Koordination in Cyber-physical Systems of Systems<br><i>Simon Wenzel (Lehrstuhl für Systemdynamik und Prozessführung, TU Dortmund, Prof. Engell, Gr. 8)</i>  | Algebraische Fehlerdetektion für verteiltparametrische Systeme mittels Modulationsfunktionen<br><i>Ferdinand Fischer (Lehrstuhl für Regelungstechnik, Universität Erlangen-Nürnberg, Prof. Roppenecker, Gr. 12)</i> |
| 11:30 – 12:00 | Über eine nicht probabilistische Beschreibung von Paketverlusten für digital vernetzte Systeme<br><i>Rainer Blind (Institut für Systemtheorie und Regelungstechnik, Universität Stuttgart, Prof. Allgöwer, Gr. 27)</i> | Control of particulate processes<br><i>Rostyslav Geyger (Institut für Automatisierungstechnik, Otto von Guericke Universität Magdeburg, Prof. Kienle, Gr. 20)</i>   |
| 12:00 – 12:30 | Fahrzeugführung von autonomen Unterwasserfahrzeugen zur Pipelineinspektion<br><i>Marco Jacobi (Institutsteil Angewandte Systemtechnik des Fraunhofer IOSB Ilmenau, Prof. Beyerer, Gr. 18)</i>                          | Beschleunigte H <sub>2</sub> -optimale Modellreduktion für Systeme sehr hoher Ordnung<br><i>Alessandro Castagnotto (Lehrstuhl für Regelungstechnik, TU München, Prof. Lohmann, Gr. 22)</i>                          |

**12:30 - 14:30 Mittagessen** im Rheinhotel Bellevue / Pause

**14:30 – 18:00 Feierliche Veranstaltung zum 50. Jubiläum** im Haupttagungsraum EG

- Boppard 50: Back to the Roots! (Abel)
- 50 Jahre Boppard: Poesie und Nonsense bei früheren Jubiläen (Mesch)
- rt/at: Blick zurück und nach vorn (Schmidt)
- at und Boppard: Wegbegleiter der regelungstechnischen deutschen Einheit (Bretthauer)
- Regelungstechnik – vom DFG-Schwerpunktprogramm zum Bopparder Kolloquium (Engelke)
- Boppard - ein Standard in der Regelungstechnik (Westerkamp)

**Kaffee-/Teepause**

- IFAC gratuliert Boppard: Glückwunsch einer 60-jährigen an einen 50-jährigen (Allgöwer)
- Millionen-Fragen aus Prozessführung und Production IT (Birk, Roth)
- Boppard organisieren: stetig und schlank (Beyerer, Heizmann)
- Bellevue – zwischen Gastronomie und Wissenschaft (Gawel)
- Das wahre Boppard – vom Bach zum Bacchus (Bach)
- Boppard 5.0: Regelungstechnik in digitaler Transformation? (Abel)

**18:30 Abendessen** im Rheinhotel Bellevue

17. – 19. Februar 2016

Freitag, 19. Februar 2016

| Haupttagungsraum im EG |  | Tagungsraum im 3. OG   |
|------------------------|--|--|
| <b>08:30 – 10:30</b>   | <b>Prädiktion, Prädiktive Regelung</b><br>Sitzungsleitung: Prof. Lemmer  | <b>Ereignisdiskrete Systeme, Prozessleittechnik</b><br>Sitzungsleitung: Prof. Lunze  |
| 08:30 – 09:00          | Stellstrombasierte Ausfallprognose bei Weichen – Beziehung zwischen statischen Eigenschaften und nicht normalverteilten Messwerten<br><i>Thomas Böhm (Institut für Verkehrssystemtechnik, DLR Braunschweig, Prof. Lemmer, Gr. 4)</i> | Fehlertolerante Steuerung ereignisdiskreter Systeme<br><i>Melanie Schuh (Lehrstuhl für Automatisierungstechnik und Prozessinformatik, Ruhr-Universität Bochum, Prof. Lunze, Gr. 3)</i>   |
| 09:00 – 09:30          | Stochastische modellprädiktive Regelung für assistiertes und automatisiertes Fahren<br><i>Xiaohai Lin (Juniorprofessur für Elektromobilität, TU Kaiserslautern, Prof. Görjes, Gr. 16)</i>  | Modellierung und Synthese von Überwachern für Steuerungssysteme<br><i>Florian Göbe (Informatik 11 – Embedded Software, RWTH Aachen, Prof. Kowalewski, Gr. 1)</i>   |
| 09:30 – 10:00          | Taktische Verhaltensplanung für Fahrstreifenwechsel beim automatisierten Fahren<br><i>Simon Ulbrich (Institut für Regelungstechnik, TU Braunschweig, Prof. Maurer, Gr. 4)</i>  | Prädiktion von Signalzuständen verkehrsadaptiver Lichtsignalanlagen zur Unterstützung automatisierter Fahrfunktionen<br><i>Mario Krumnow (Lehrstuhl für Verkehrsleitsystem und –prozessautomatisierung, TU Dresden, Prof. Krimmling, Gr. 10)</i> |
| 10:00 – 10:30          | Neuronale prädiktive Regelung von Prozessgrößen in Flachglasschmelzwannen<br><i>Martin Handreg (Regelungssysteme und Leittechnik, Brandenburgische TU Cottbus - Senftenberg, Prof. Lappus, Gr. 2)</i>                                | Linked Enterprise Data als Konzept zur semantischen Integration für Industrie 4.0<br><i>Markus Graube (Professur für Prozessleittechnik, TU Dresden, Prof. Urbas, Gr. 9)</i>   |

10:30 – 11:00 Kaffee-/Teepause im Foyer der Stadthalle

|                      |   |   |
|----------------------|---|---|
| <b>11:00 – 12:00</b> | <b>Iterative Identifikation/Regelung</b><br>Sitzungsleitung: Prof. Kroll  | <b>Nichtlineare Regelung</b><br>Sitzungsleitung: Prof. Schlacher  |
| 11:00 – 11:30        | Regelungsorientierte Identifikation affiner Takagi-Sugeno-Fuzzy-Modelle für Regler mit Driftkompensation<br><i>Alexander Schrodte (Institut für Analyse und Regelung technischer Systeme, Universität Kassel, Prof. Kroll, Gr. 19)</i>                | Zeitoptimale flachheitsbasierte Regelung eines Brückenkrans<br><i>Bernd Kolar (Institut für Regelungstechnik und Prozessautomatisierung, Johannes Kepler Universität Linz, Prof. Schlacher, Gr. 29)</i> |
| 11:30 – 12:00        | Iterativ Lernende Regelung des Anodendrucks während der Spülvorgänge eines PEM-Brennstoffzellensystems<br><i>Christian Hähnel (Professur für Regelungstechnik, Helmut-Schmidt-Universität/Universität der Bundeswehr Hamburg, Prof. Horn, Gr. 13)</i> | Ein Lyapunov-basierter Ansatz für adaptive Sliding-Mode Regelungen<br><i>Alexander Barth (Institut für Automatisierungs- und Systemtechnik, TU Ilmenau, Prof. Reger, Gr. 15)</i>                        |

- 12:00 – 13:00 Vergabe der at-Preise**  
Auszeichnung herausragender Beiträge der Zeitschrift at-Automatisierungstechnik durch den Herausgeber
- Hinweise zu wissenschaftlichen Veranstaltungen**
- Vorstellung der Neuberufenen**
- Preisverleihung** durch KUKA AG, Augsburg
- Aufruf für Boppard 2017**
- 13:00 - 14:00 Mittagessen** im Rheinhotel Bellevue
- 14:00 Ende des Kolloquiums**

# Modellierung und Synthese von Überwachern für Steuerungssysteme

Florian Göbe \*

\* Informatik 11 – Embedded Software  
RWTH Aachen  
Ahornstr. 55, 52064 Aachen  
0241 / 80-21171  
0241 / 80-22150  
goebe@embedded.rwth-aachen.de

Stefan Kowalewski \*\*

\*\* Informatik 11 – Embedded Software  
RWTH Aachen  
Ahornstr. 55, 52064 Aachen  
0241 / 80-21150  
0241 / 80-22150  
kowalewski@embedded.rwth-aachen.de

**Schlüsselwörter:** Supervisory Control, Ereignisdiskrete Systeme, Automatisierungstechnik, SPS, Modellierung, Funktionale Sicherheit

In den Anwendungsdomänen der Automatisierungstechnik finden sich neben vollautomatisierten Systemen mit sehr langen Laufzeiten regelmäßig auch solche mit sich häufig ändernden Abläufen. Dies kann aufgrund verschiedener Ursachen der Fall sein, beispielsweise bei geringen Losgrößen, experimentellen Anlagen im Testbetrieb oder manuell gefahrenen Anlagen. Alle diese Fälle haben gemeinsam, dass die zugehörigen Steuerungsprogramme verhältnismäßig oft an neue Produkte, Anforderungen, Prozesse, etc. angepasst werden müssen. Dabei erlauben softwarebasierte Steuerungssysteme wie SPSen eine flexible und schnelle Anpassung der Abläufe an die neuen Anforderungen. Dennoch bedeutet jede Manipulation des Steuerungsprogramms das potenzielle Einbringen neuer Implementierungsfehler, die die Anlage beschädigen und die Sicherheit gefährden können.

Die *Supervisory Control Theory* (SCT) ist ein Konzept, das in den 80er Jahren von P. J. Ramadge und W. M. Wonham entwickelt wurde und der Überwachung (ereignis-)diskreter Anlagenmodelle dient [1]. Sie ging aus der Regelungstechnik hervor und strebt an, die dort herrschenden Konzepte und Begriffe auf diskrete Systeme anzuwenden. Dabei müssen zunächst ein diskretes Modell der ungesteuerten ungesicherten Anlage sowie eine Spezifikation des erlaubten Verhaltens angegeben werden. Beide werden üblicherweise in Form endlicher Automaten dargestellt. Die Zustandsübergänge werden von sogenannten *Ereignissen* (*Events*) ausgelöst, die als atomar kurz aufgefasst werden. Ein Ereignis kann beispielsweise das Überschreiten eines Grenzwertes oder ein Befehl zum Anpassen eines Stellwertes sein. Das Ziel der SCT ist die automatische Berechnung eines Supervisors, der bestimmte, steuerbare Ereignisse unterbindet, bevor durch die Spezifikation unerwünschte, nichtsteuerbare Ereignisse eintreten, die sich nicht mehr verhindern lassen würden. Supervisor und Anlage werden in Analogie zur klassischen Regelschleife miteinander gekoppelt. Dabei ist zu beachten, dass in der ursprünglichen SCT sämtliche Ereignisse von der Anlage ausgelöst werden, die aus diesem Grunde auch als *Generator* bezeichnet wird. Nach jedem aufgetretenen Ereignis, liefert der Supervisor eine Teilmenge erlaubter Folgeereignisse an die Anlage zurück. Auf diese Weise stellt der Supervisor die Einhaltung der vorgegebenen Spezifikation sicher, versucht dabei jedoch das Anlagenverhalten so wenig wie möglich einzuschränken (maximale Permissivität). Ein weiteres Ziel ist die Vermeidung von Deadlocks (*non-blocking*).

Leider lässt sich die SCT in der allgemeinen Praxis nicht unmittelbar für die Steuerung von realen Anlagen anwenden. Dies hat mehrere Gründe. Zum einen muss eine

Steuerung aktiv auf eine physische Anlage einwirken, um einen gewünschten Ablauf zu realisieren. Das heißt, im Gegensatz zum Generator-Modell besitzt die Anlage üblicherweise keine eigene Intelligenz um selbst aktiv auf das Steuerungsziel hinzuwirken [2]. Zum anderen besteht ein fundamentaler Unterschied zwischen einer Steuerung, die einen bestimmten, möglicherweise optimierten Ablauf deterministisch verfolgt, und einem maximal permissiven Supervisor [3], der jedoch oft ignoriert wird.

Der hier vorgestellte Ansatz konzentriert sich auf die effiziente Modellierung der lokal besser eingrenzenden, und daher relativ effizient handhabbaren Sicherheitsanforderungen, mit dem Ziel die SCT für den Automatisierungsingenieur attraktiver zu machen. Aus diesem Grund wird zurzeit ein prototypisches Werkzeug entwickelt, das eine einfache und intuitive Modellierung des für die Anforderung relevanten Zustandsraumes der Anlage, sowie der Spezifikation erlauben soll. Das Werkzeug erzeugt schließlich automatisch ein Codegerüst, in das der Steuerungscode eingebettet wird. Anschließend wird beides zusammen wie üblich auf die SPS geladen. Der Steuerungscode kann die Eingaben eines manuellen Bedieners entgegennehmen und an die Anlage weiterreichen oder aber einen vorprogrammierten Ablauf realisieren. Das Framework prüft jede zuvor modellierte, sicherheitsrelevante Aktion gegen das im Hintergrund simulierte Zustandsraummodell und blockt solche Befehle ab, die zu nicht mehr steuerbarem Verhalten führen können. Ist ein Befehl unkritisch, wird er an die physischen Ausgänge der SPS und somit an die Anlage weitergeleitet.

Der Use-Case könnte so aussehen, dass Modell und Sicherheitsspezifikationen für einen bestimmten Anlagenaufbau unverändert bleiben, während der eigentliche Ablauf regelmäßig angepasst wird. Ein fehlerhafter Ablauf oder eine Fehlbedienung würden dann zwar das Ziel des Ablaufes verfehlen, jedoch nicht die Sicherheit gefährden. Eine Korrektur des Ablaufes wäre in diesem Fall ohnehin notwendig. Ein fehlerfreier, sicherer Ablauf würde das Framework hingegen ungehindert passieren.

Darüber hinaus kann das Modell Notaktionen in Form sogenannter *erzwungener Ereignisse* enthalten, die beim Erreichen bestimmter Modellzustände sofort ausgelöst werden. Diese ermöglichen Steuerungen, die auf Sensorereignisse reagieren, bevor ein kritischer Zustand erreicht wird. Solche Steuerungen sind in der Praxis zwar üblich und dank echtzeitfähiger Hardware auch problemlos umzusetzen; ein klassischer SCT-Supervisor würde in diesem Fall jedoch den gesamten Ablauf unterbinden, da nach dem nichtsteuerbaren Erreichen des Sensorwertes kein steuerbares Ereignis mehr notwendig ist, um den kritischen Zustand herbeizuführen. Erzwungene Ereignisse können daher eingesetzt werden, um nichtsteuerbare Ereigniskaskaden zu unterbrechen und einen permissiveren Supervisor zu erhalten.

## Literatur:

- [1] P. J. G. Ramadge and W. M. Wonham, „Supervisory control of a class of discrete event processes“, *SIAM Journal on Control and Optimization*, 1987.
- [2] S. Balemi, G. J. Hoffmann, P. Gyugyi, H. W. Toi, and G. F. Franklin, „Supervisory control of a rapid thermal multiprocessor“, *Automatic Control, IEEE Transactions on*, 1993.
- [3] R. Ehlers, S. Lafortune, S. Tripakis, and M. Vardi, „Reactive synthesis vs supervisory control: Bridging the gap“, *Electrical Engineering and Computer Sciences, University of California at Berkeley, Technical Report*, 2013.

# Neuronale prädiktive Regelung von Prozessgrößen in Flachglasschmelzwannen

Martin Handreg \*

\* Regelungssysteme und Leittechnik  
 Brandenburgische Technische Universität  
 Cottbus - Senftenberg  
 Siemens-Halske-Ring 14, 03046 Cottbus  
 Tel: 0355 - 69 4112  
 Fax: 0355 - 69 2453  
 martin.handreg@b-tu.de

**Schlüsselwörter:** Neuronale Prozessidentifikation, Multi Step Prediction, MPC

Die industrielle Herstellung von Flachglas ist ein sensibler und komplexer Prozess. Die Qualität des Endproduktes ist im hohen Maße von der Qualität der Glasschmelze abhängig. Eine homogene Glasschmelze hängt von dem Zusammenspiel der turbulenten Oberofenprozesse und den physikalisch-chemischen Transportvorgängen im Glasbad ab. Um eine gleichbleibende Produktqualität zu gewährleisten, ist die strenge Einhaltung vorgegebener Temperaturniveaus unabdingbar. Aus diesem Grund erlangten verbesserte Regelungs- und Automatisierungstechniken für die Qualitätssicherung zunehmende Bedeutung. Im Fokus wissenschaftlicher Forschungen stehen derzeit modellbasierte prädiktive Ansätze (z.B. [1]). Ein weiterer Schwerpunkt ist die Analyse anhand numerischer Strömungssimulationen (z.B. [2]).

Trotz moderner Regelstrategien greifen auch heute noch Wannenführer manuell in den Herstellungsprozess ein. Die Ursachen liegen im thermochemischen Prozess selbst und an verfahrenstechnischen Problemen. Das zu schmelzende Gemenge neigt zur Schaumbildung, was die messtechnische Erfassung der Temperaturen im Schmelzbereich erschwert und zu fehlerhaften Stelleingriffen führen kann. Zudem sind die wenigen Temperaturmessstellen nicht repräsentativ genug. PID-Regelungen kommen aufgrund der mehrstündigen Zeitverzögerungen an ihre Grenzen. CFD-Modelle erhöhen das Verständnis der inneren physikalischen und chemischen Vorgänge, jedoch erfordern diese Modelle konkrete Geometrien und Randbedingungen, so dass oftmals nur idealisierte und kundenspezifische Aussagen möglich sind. Der modellbasierte prädiktive Ansatz ist vielversprechend. Für die MPC-Strategien spielen die zumeist linearen Prozessmodelle ebenfalls eine besondere Rolle.

Für die Modellierung des vorliegenden nichtlinearen Prozesses mit Mehrgrößencharakter bieten sich künstlich neuronale Netze an [3]. Auf Basis eines realen Datensatzes einer Flachglasanlage wird gezeigt, welche Netztypen zur Prozessidentifikation geeignet sind. Schwerpunkt ist der Entwurf und die Optimierung der Netzstruktur (Abbildung 1).

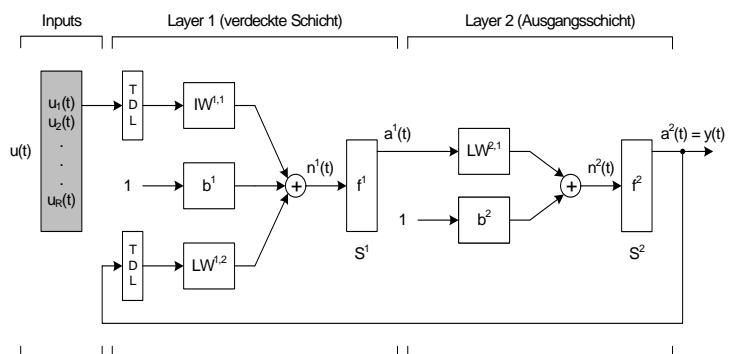
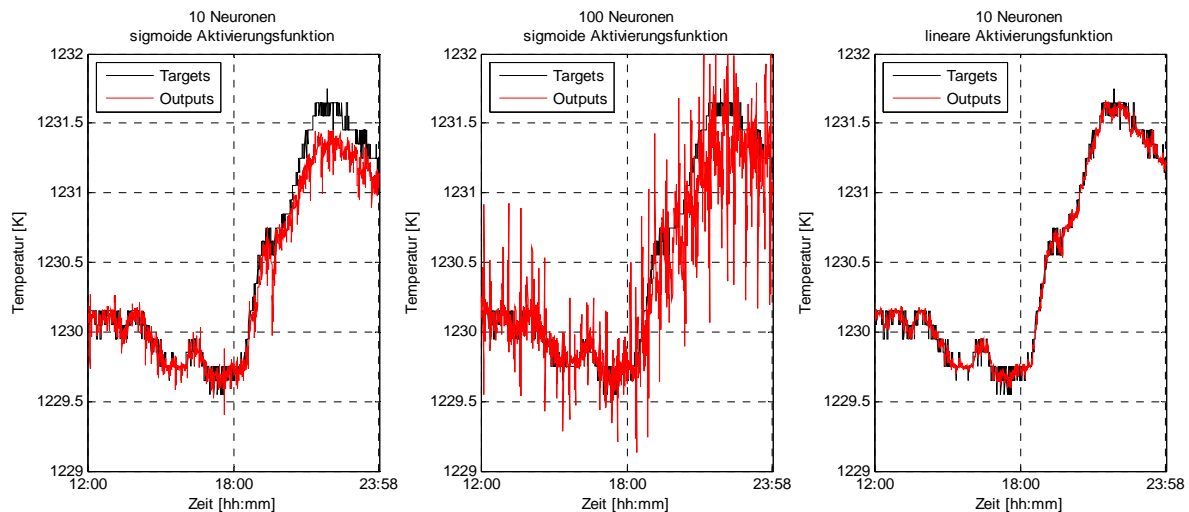


Abbildung 1: Prinzipielles Strukturbild eines zweischichtigen NARX-Netzes

Dazu gehören die Auswahl der Ein- und Ausgangsgrößen, die Anzahl der Neuronen, der verwendete Zeithorizont der Trainings- und Testdaten, die Trainingsmethode und die Aktivierungsfunktionen. Es wird gezeigt, wie sich diese Netzparameter auf die Genauigkeit des neuronalen Netzes zur Berechnung der qualitätsbestimmenden Ausgangsgrößen (Glasstand und Temperatur im hinteren Abstehbereich des Schmelzofens) auswirken (Beispiele siehe Abbildung 2).



*Abbildung 2: Zeitliche Verläufe der berechneten Temperaturen (One Step Prediction) für verschiedene Neuronenzahlen und Aktivierungsfunktionen (Trainingszeit jeweils 00:00-12:00Uhr, hier nicht dargestellt)*

Durch gezielte Änderung der Netzstruktur können Neuronale Netze zur One Step Prediction oder Multi Step Prediction genutzt werden, wodurch sie sich für verschiedene Regelstrategien eignen. Die Simulationen haben gezeigt, dass für den gegebenen Anwendungsfall neuronale Netze ausgewählte Prozessgrößen hinreichend genau berechnen können. Weiterhin wird ein geeignetes Netz als Prozessmodell in eine modellbasierte prädiktive Regelstrategie eingebettet, wodurch die Vorteile der neuronalen Streckenidentifikation mit den Vorteilen einer MPC-Strategie kombiniert werden.

## Literatur:

- [1] N.N.: ACSI's Model-Based Controller Maximizes Performance in Glass Forehearths; unter <http://www.acsileado.com/FH%20Model%20Based%20Control.pdf> (abgerufen am 10.04.2013)
- [2] Schobben, R. R. J. J.: Identification & CFD Model Based Control of a Glass Furnace; Diss. Master's thesis, Eindhoven University of Technology, 2009
- [3] Handreg, M: Entwurf neuronaler Netze zur Prädiktion von Prozessgrößen in einer Schmelzwanne für Floatglas; HVG-Mitteilung Nr. 2168, 2015



# Fehlertolerante Steuerung ereignisdiskreter Systeme

Melanie Schuh \*

\* Lehrstuhl für Automatisierungstechnik und  
Prozessinformatik (ATP)  
Ruhr-Universität Bochum  
Universitätsstraße 150, 44801 Bochum  
Tel. 0234 32 26632  
Fax 0234 32 14101  
melanieschuh@atp.rub.de

Jan Lunze \*\*

\*\* Lehrstuhl für Automatisierungstechnik und  
Prozessinformatik (ATP)  
Ruhr-Universität Bochum  
Universitätsstraße 150, 44801 Bochum  
Tel. 0234 32 24071  
Fax 0234 32 14101  
lunze@atp.rub.de

**Schlüsselwörter:** E/A-Automaten, Steuerungsentwurf, aktive Diagnose, Rekonfiguration

Die Verwendung von fehlertoleranten Regelungen oder Steuerungen ermöglicht es technischen Systemen, trotz eines aufgetretenen Fehlers ihre Aufgabe weiterhin zu erfüllen. Bei aktiver Fehlertoleranz wird ein gegebener nomineller Regler auf Basis des diagnostizierten Fehlers rekonfiguriert. Abbildung 1 zeigt den dazu in dieser Arbeit verwendeten ereignisdiskreten fehlertoleranten Regelkreis. Obwohl für die fehlertolerante Regelung kontinuierlicher Systeme eine sehr ähnliche Struktur verwendet wird, ergeben sich bei der Betrachtung ereignisdiskreter Systeme andere Problemstellungen und somit auch andere Lösungsansätze.

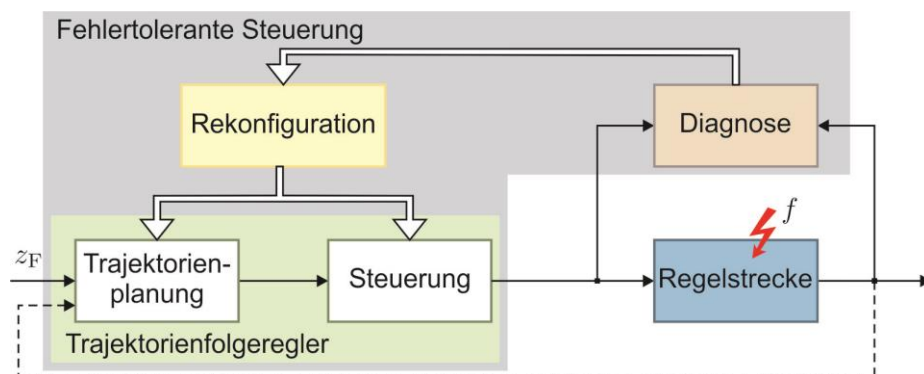


Abbildung 1: Ereignisdiskreter fehlertoleranter Regelkreis

Der hier vorgestellte Ansatz hat das Ziel, eine Regelstrecke, die als Eingangs-/Ausgangsautomat (E/A-Automat) modelliert ist, sowohl im fehlerfreien Fall als auch im fehlerbehafteten Fall in einen Zielzustand  $z_F$  zu überführen. Dazu wird eine Trajektorienfolgeregelung genutzt, bei der eine Steuerung in Form eines E/A-Automaten die Regelstrecke entlang einer auf Basis des Streckenmodells geplanten Trajektorie steuert [1]. Um dies auch im Fehlerfall zu ermöglichen, wird eine Methode vorgestellt, die auf systematische Art und Weise zunächst den vorliegenden Fehler identifiziert und mit den gewonnenen Informationen den Trajektorienfolgeregler rekonfiguriert.

Tritt ein Fehler  $f$  auf, wird dieser von der Diagnoseeinheit durch Auswertung der Eingangs- und Ausgangssignale der Regelstrecke detektiert. Anschließend wird eine aktive Fehlerdiagnose zur Identifizierung des Fehlers sowie des aktuellen Zustands der Regelstrecke durchgeführt. Das heißt, die Diagnoseeinheit erzeugt eine neue

Referenztrajektorie als Eingangssignal für die Steuerung, welche die Identifizierung des Fehlers und des Zustands ermöglicht [2].

Die erhaltenen Informationen werden zur Rekonfiguration des Trajektorienfolgereglers genutzt. Dabei wird mit dem Modell ausgehend vom aktuellen Zustand der fehlerbehafteten Regelstrecke eine neue Trajektorie zum Zielzustand geplant und die Steuerung an den Fehler angepasst [3]. Es wird gezeigt, dass der rekonfigurierte Trajektorienfolgeregler die fehlerbehaftete Regelstrecke in den gewünschten Zielzustand steuert, wenn die fehlerbehaftete Regelstrecke steuerbar ist.

Die Anwendung der Methode wird an einem Handhabungsprozess im Handling System HANS (Abb. 2) demonstriert (vgl. [4]).

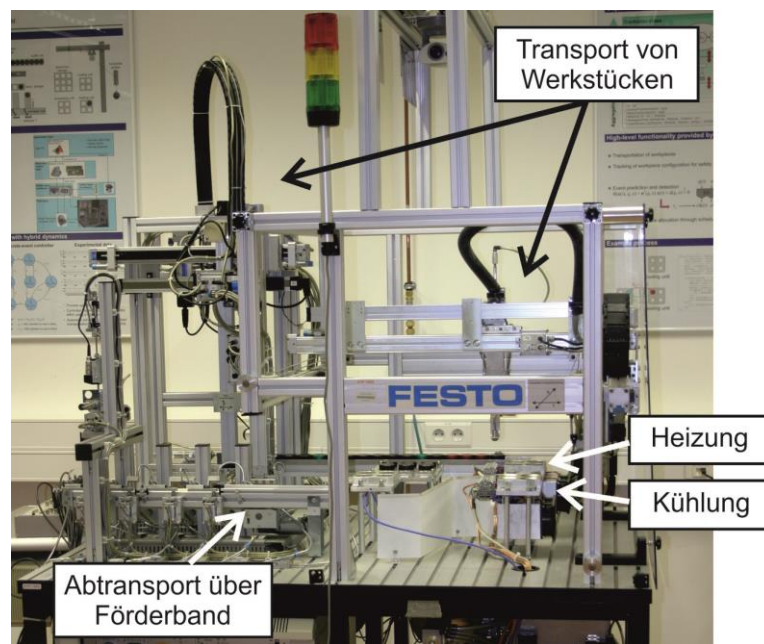


Abbildung 2: Handling System HANS

## Literatur:

- [1] M. Schuh, J. Lunze. Feedback control of nondeterministic Input/Output automata. In *Proc. 53<sup>rd</sup> IEEE Conf. on Decision and Control*, Los Angeles, USA, 2014.
- [2] M. Schmidt (jetzt M. Schuh), J. Lunze. Active fault diagnosis of deterministic I/O automata. In *Proc. 4<sup>th</sup> IFAC Workshop on Dependable control of discrete systems*, York, UK, 2013.
- [3] M. Schuh, J. Lunze. Fault-tolerant control for deterministic discrete event systems with measurable state. In *Proc. American Control Conference*, 2016, eingereicht.
- [4] M. Schuh, M. Zgorzelski und J. Lunze. Experimental evaluation of an active fault-tolerant control method. In *Control Engineering Practice*, vol. 43, S. 1-11, Oktober 2015.

# Taktische Verhaltensplanung für Fahrstreifenwechsel beim automatisierten Fahren

Simon Ulbrich \*

\* Institut für Regelungstechnik  
TU Braunschweig  
Hans-Sommer-Str. 66  
38106 Braunschweig  
Tel. 0531 391 3887  
Fax 0531 391 5194  
E-Mail [ulbrich@ifr.ing.tu-bs.de](mailto:ulbrich@ifr.ing.tu-bs.de)

Markus Maurer \*\*

\*\* Institut für Regelungstechnik  
TU Braunschweig  
Hans-Sommer-Str. 66  
38106 Braunschweig  
Tel. 0531 391 3838  
Fax 0531 391 5149  
E-Mail [maurer@ifr.ing.tu-bs.de](mailto:maurer@ifr.ing.tu-bs.de)

**Schlüsselwörter:** Automatisiertes Fahren, Fahrstreifenwechsel, Taktische Verhaltensplanung, POMDP, SNMPC

Automatisiertes Fahren birgt viele spannende Herausforderungen im Themenfeld der Regelungstechnik. Konzepte zur Regelung und Steuerung finden bereits vielfältige Verwendungen in der Trajektorienplanung und unterlagerten Regelung. Bisher liegt häufig der Fokus auf dem Fahren *innerhalb* eines Fahrstreifens. Umso spannender ist es jedoch den nächsten Schritt zu wagen: Taktische Verhaltensplanung für Fahrstreifenwechsel.



Abbildung 1: Versuchsträger „Jack“.  
Bildrechte: AUDI AG.

Anfang 2015 wurde erstmals der in Abbildung 1 gezeigte „Jack“, das *AUDI A7 piloted driving concept* Fahrzeug der Öffentlichkeit bei der Consumer Electronics Show 2015 in Las Vegas vorgestellt [1]. „Jack“ fuhr dabei 550 Meilen automatisiert vom Silicon Valley bis nach Las Vegas. „Jack“ plant nicht nur innerhalb eines Fahrstreifens, sondern kann auch automatisiert Fahrstreifenwechsel planen und ausführen.

Verhaltensplanung für Fahrstreifenwechsel umfasst sowohl wertkontinuierliche, wie auch wertdiskrete Aspekte: Eine Situation beinhaltet etwa Distanzen, Geschwindigkeiten und Fahrstreifenkrümmungen, genauso aber auch wertdiskrete, die Verhaltensplanung diametral ändernde Aspekte, etwa ob ein Blinker aktiviert wurde oder nicht. Darüber hinaus müssen Entscheidungen basierend auf unsicherheitsbehafteten Messdaten einer Umfeldwahrnehmung getroffen werden. Für die Wahl geeigneter Verhaltensoptionen ist eine Planung in die Zukunft von zentraler Bedeutung. Die Verhaltensplanung für Fahrstreifenwechsel kann somit als stochastisches nichtlineares modellprädiktives Regelungsproblem (SNMPC) oder als gemischtganzzahliger, partiell beobachtbarer Markov-Entscheidungsprozess (POMDP) verstanden werden.

Abbildung 2 illustriert den Kernprozess der Verhaltensplanung [2, 3]. Ein Messmodell setzt eine Szene als abstrakte Schnittstelle aus einer Kontextmodellierung in eine Zustandsraumdarstellung der entscheidungsrelevanten Dimensionen zur Verhaltens-

planung für Fahrstreifenwechsel um. Ein Planungskern ermittelt Handlungsoptionen und berechnet mit Hilfe eines Belohnungs- bzw. Kostenmodells den Nutzen einer Handlungsoption in einer bestimmten Situation. Für jede Handlungsoptions-Situationskombination wird mit Hilfe eines Prädiktionsmodells eine zukünftige Situation prädiziert. Für diese zukünftigen Situationen werden wieder rekursiv Handlungsoptionen geplant.

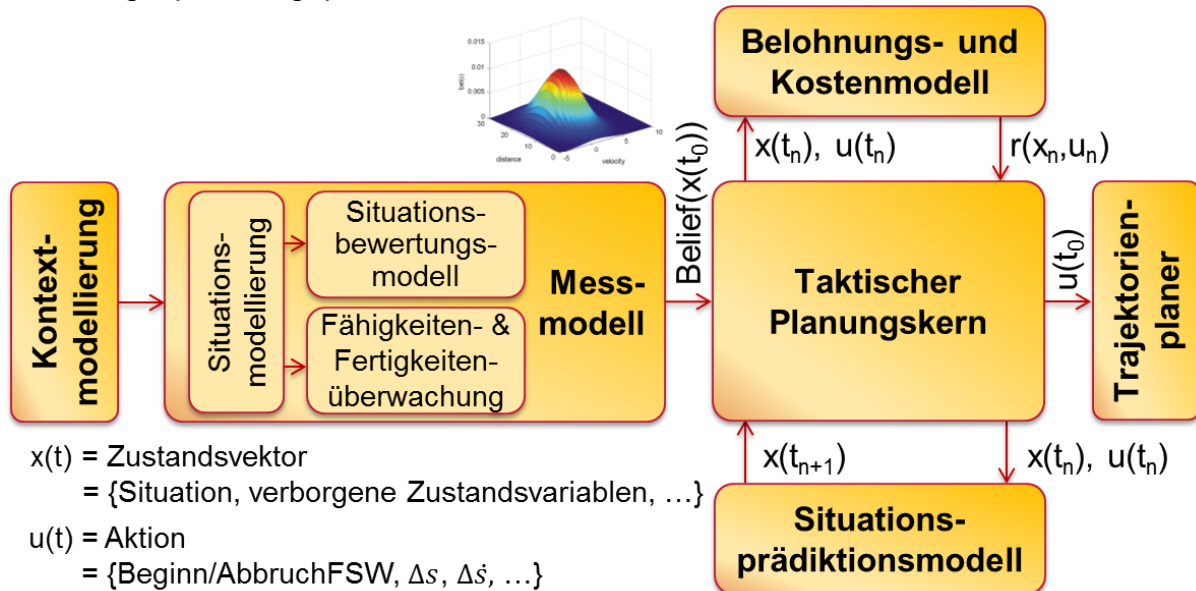


Abbildung 2: Schematische Darstellung der taktischen Verhaltensplanung für Fahrstreifenwechsel.

Aus Lösungsansätzen zur modellprädiktiven Regelung werden die Ideen des Planens über einen finiten Planungshorizont und des Planens mit variabler Auflösung übernommen. Von Lösungsmethoden für partiell beobachtbare Markov-Entscheidungsprozesse wird die Strukturierung des Problems in Mess-, Kosten- und Prädiktionsmodell sowie Lösungsmethoden anhand von *Policy*-Iteration innerhalb eines Baums aus möglichen Handlungssequenzen genutzt.

Der präsentierte Ansatz funktioniert nicht nur in der Simulation oder ausgewählten, einzelnen Szenarien, sondern wurde in den USA und in Europa auf Highways, Autobahnen und Landstraßen in mehr als 50.000 Testkilometern erprobt und verfeinert. Es wurden viele tausend Fahrstreifenwechsel in verschiedensten Domänen und unter unterschiedlichsten Bedingungen absolviert.

## Literatur:

- [1] Audi AG: Internetveröffentlichung, [http://www.audi.de/de/brand/de/vorsprung\\_durch\\_technik/content/2014/10/piloted-driving.html](http://www.audi.de/de/brand/de/vorsprung_durch_technik/content/2014/10/piloted-driving.html), abgerufen am 1.11.2015.
- [2] Ulbrich, S.; Maurer, M.: Towards Tactical Lane Change Behavior Planning for Automated Vehicles. In: Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC) 2015, S. 989–995.
- [3] Ulbrich, S.; Maurer, M.: Situation Assessment in Tactical Lane Change Behavior Planning for Automated Vehicles. In: Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC), 2015, S. 975–981.

# Stellstrombasierte Ausfallprognose bei Weichen – Beziehung zwischen statischen Eigenschaften und nicht normalverteilten Messwerten

Dipl.-Ing.-Inf. Thomas Böhm \*

Prof. Dr.-Ing. Karsten Lemmer \*\*

\* Institut für Verkehrssystemtechnik  
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.  
Rutherfordstraße 2, 12489 Berlin  
Tel.: 0531 295 3504  
Fax: 030 67055 291  
[thomas.boehm@dlr.de](mailto:thomas.boehm@dlr.de)

\*\* Institut für Verkehrssystemtechnik  
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.  
Lilienthalplatz 7, 38108 Braunschweig  
Tel.: 0531 295 3401  
Fax: 0531 295 3402  
[Karsten.lemmer@dlr.de](mailto:Karsten.lemmer@dlr.de)

**Schlüsselwörter:** Ausfallprognose, Datengetriebene Prädiktion, Clustering

Im Jahr 2014 verzeichnete die Deutsche Bahn AG (DB) rund 12,5 Millionen netzbedingte Verspätungsminuten [1]. Ausfälle von Eisenbahnweichen sind eine der Hauptursachen für diese Verspätungen. Weltweit erforschen Wissenschaftler, Weichenhersteller und Infrastrukturbetreiber die Ausfallprädiktion, um solche Verspätungen und ihre negativen monetären Folgen zu verhindern. Während für die diagnostische Ist-Bewertung Lösungen existieren [2], mangelt es an einer verlässlichen Ausfallprognose. Dies ist auch dem Umstand geschuldet, dass bei der Prognosemodellentwicklung einige Randbedingungen zu beachten sind. Zum einen lassen die sicherheitstechnischen und die wirtschaftlichen Rahmenbedingungen nur eine begrenzte sensorische Überwachung der Weichen zu. Denn diese muss sowohl auf den Sicherungsbetrieb rückwirkungsfrei als auch für die circa 70000 Weichen und Kreuzungen im DB Netz nachrüstbar sein. Derzeit ist dies nur mit der induktiven Stellstromüberwachung möglich. Zum anderen muss die Prognose für sehr verschiedene Weichentypen Gültigkeit besitzen, damit nicht für jede Weiche ein individuelles Prognosemodell entwickelt werden muss. Der Vortrag stellt ein heuristisches Verfahren vor, mit dem die Beziehung zwischen statischen Eigenschaften und nicht normalverteilten Messwerten mit unterschiedlichen Varianzen aufgedeckt wird [3]. Dadurch wird es möglich unbekannte Weichen einem Ausfallmuster zuzuordnen, ohne dieses vorher aufzuzeichnen. Das Verfahren ist nicht auf Weichen beschränkt, sondern eignet sich grundsätzlich dafür, den Zusammenhang zwischen statischen Eigenschaften und multidimensionalen Messwerten zu identifizieren. Letztlich kann somit auch eine Regelung von Systemen gemäß ihrer statischen Eigenschaften entwickelt werden.

Wird der Motorstrom bzw. die Wirkleistung des Weichenantriebs während der Weichenstellung aufgezeichnet, ergibt sich eine typische Umlaufkurve, die für die jeweilige Phase der Umstellung (Leerlauf, Verschlussöffnung, Zungenbewegung, Verschluss, Abschaltung) signifikant ist [4]. Bestimmte Abweichungen von dieser Referenz gelten als Störungsindikator, weshalb sie auch für die Prognose verwendet werden. Doch was bei einem Weichentyp ein abnormales Stellstrommuster ist, kann bei einem anderen Typ völlig normal sein. Dies auf Eigenschaften der Weiche zurückzuführen, ist mit herkömmlichen Verfahren, wie etwa Hotellings T<sup>2</sup>-Test, Wilcoxon-Mann-Whitney-Test, Varianzanalyse (ANOVA) oder Diskriminanzanalyse



nicht möglich. Die notwendigen Voraussetzungen sind nicht erfüllt, da die multidimensionalen Messwerte nicht normalverteilt sind und keine gleichen Varianzen aufweisen. Hier kommt die entwickelte Heuristik zur Anwendung.

In einem ersten Schritt werden alle Weichen gemäß der ordinal- und normalskalierten Bauartigenschaften gruppiert. Hierbei wird ein hierarchisches Clustering verwendet, mit dem stufenweise immer kleinere Gruppen gebildet werden. So entstehen verschiedene Bauartcluster. Im zweiten Schritt wird für jeden Cluster die Clusterzugehörigkeitsfunktion anhand der Messdaten von Weichen innerhalb dieses Clusters gebildet. Eine vorher separierte Testmenge wird mittels der Funktion in einen dieser Bauartcluster klassifiziert. Je höher der Klassifikationserfolg ist, desto stärker sind die Bauartigenschaften für die Messwerte verantwortlich. Da entlang der Hierarchieebenen alle Bauartigenschaften kombiniert werden, offenbart das beste Klassifikationsergebnis jene Eigenschaftskombination, die für das unterschiedliche Ausfallverhalten in den Messwerten beschreibend ist. Anhand der so identifizierten Eigenschaften kann für neue Weichen das gleiche Ausfallprognosemodell genutzt werden, wie für bekannte Weichen im selben Cluster - ohne zusätzlichen Entwicklungsaufwand.

## Literatur:

- [1] DB Netz AG (2015): Infrastrukturzustands- und -entwicklungsbericht 2014. Internetversion. DB AG. Frankfurt am Main. Online verfügbar unter <http://www.eba.bund.de/>, zuletzt geprüft am 10.06.2015.
- [2] Asada, Tomotsugu; Roberts, Clive; Koseki, Takafumi (2013): An algorithm for improved performance of railway condition monitoring equipment: Alternating-current point machine case study. In: *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 30 (0), S. 81–92.
- [3] Böhm, Thomas (2016): Präzise Störungsprognose bei Eisenbahnweichen. In: Karsten Lemmer (Hrsg.): Präzise Störungsprognose bei Eisenbahnweichen. Braunschweig: DLR-Institut für Verkehrssystemtechnik (Berichte aus dem DLR-Institut für Verkehrssystemtechnik). In Vorbereitung.
- [4] García Márquez, Fausto Pedro; Roberts, Clive; Tobias, Andrew M. (2010): Railway Point Mechanisms: Condition Monitoring and Fault Detection. In: *Proceedings of The Institution of Mechanical Engineers Part F: Journal of Rail and Rapid Transit* 224 (1), S. 35-44.

# Über die Äquivalenz zwischen strenger Passivität und streng positiver Reellheit linearer Systeme

Diego de S. Madeira \*

\* Regelungsmethoden und Robotik  
Technische Universität Darmstadt  
S3|10 404, Landgraf-Georg Straße 4,  
64283 Darmstadt  
Tel.: +49 6151 16-25033  
Fax: +49 6151 16-25058  
E-Mail: dmadeira@rmr.tu-darmstadt.de

Jürgen Adamy \*\*

\*\* Regelungsmethoden und Robotik  
Technische Universität Darmstadt  
S3|10 418, Landgraf-Georg Straße 4,  
64283 Darmstadt  
Tel.: +49 6151 16-25050  
Fax: +49 6151 16-25058  
E-Mail: adamy@rmr.tu-darmstadt.de

**Schlüsselwörter:** Lineare Systeme, strenge Passivität, streng positive Reellheit.

In diesem Beitrag wird bewiesen, dass die strenge Passivität linearer zeitinvarianter (LZI) Systeme äquivalent zur streng positiven Reellheit ihrer Übertragungsmatrizen ist. Obwohl beide Begriffe die asymptotische Stabilität eines steuerbar und beobachtbar linearen Systems gewährleisten, wird der eine im Zeitbereich definiert und der andere im Frequenzbereich.

Passivität ist ein Begriff, der aus der energiebasierten Systemanalyse stammt. Ein passives System besitzt keine innere Energiequelle, d.h. die im System gespeicherte Energie ist immer kleiner oder gleich der zugeführten [4]. Mathematisch betrachtet erfordert Passivität die Definition von zwei wichtigen Funktionen: eine Zuführungsrate  $w = \mathbf{u}^T \mathbf{y}$  und eine positiv semidefinite Speicherfunktion  $V(\mathbf{x})$ , die die im System gespeicherte Energie darstellt [3]. Die Variable  $\mathbf{x}$  ist der Zustand,  $\mathbf{u}$  ist der Eingang und  $\mathbf{y}$  ist der Ausgang des Systems. Die Beziehung zwischen  $w$  und  $V$  wird von der sogenannten Passivitätsungleichung bestimmt [6]. Passivität ist sowohl bei linearen als auch bei nichtlinearen Systemen anwendbar. In dieser Arbeit beschäftigen wir uns ausschließlich mit linearen Dynamiken.

Gegeben ist eine Zustandsraumdarstellung  $(\mathbf{A}, \mathbf{B}, \mathbf{C}, \mathbf{D})$  eines linearen Systems [2]:

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{x}} &= \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{u}, \\ \mathbf{y} &= \mathbf{C}\mathbf{x} + \mathbf{D}\mathbf{u},\end{aligned}\tag{1}$$

wobei  $\mathbf{x} \in \mathfrak{R}^n$ ,  $\mathbf{u} \in \mathfrak{R}^m$  und  $\mathbf{y} \in \mathfrak{R}^m$  gilt. Dieses System ist passiv (P), wenn die folgende Ungleichung erfüllt ist [1]:

$$\dot{V} \leq \mathbf{u}^T \mathbf{y}, \forall t \geq 0.\tag{2}$$

Ist  $V(\mathbf{x}) > 0$ , dann ist das System stabil im Sinne von Lyapunov. Wenn zusätzlich gilt

$$\dot{V} + S(\mathbf{x}) \leq \mathbf{u}^T \mathbf{y}, \forall t \geq 0,\tag{3}$$

für eine Funktion  $S(\mathbf{x}) > 0$ , dann ist das System streng passiv (SP) und asymptotisch stabil [6].

Im Frequenzbereich lautet die entsprechende Übertragungsmatrix von System (1)

$$\mathbf{H}(s) = \mathbf{C}(s\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1} \mathbf{B} + \mathbf{D},\tag{4}$$

wobei  $\mathbf{H}(s) \in \mathbb{R}^{m \times m}$ ,  $s \in \mathbb{C}$ , gilt [4]. Ein LZI passives System ist minimalphasig und besitzt den relativen Grad eins oder null. Das bedeutet, dass der Realteil seiner Übertragungsmatrix die folgende Bedingung erfüllt [6]

$$\operatorname{Re}[\mathbf{H}(s)] \succeq \mathbf{0}, \forall s \text{ so dass } \operatorname{Re}[s] > 0. \quad (5)$$

Hieraus folgt, dass die Passivität von (1) äquivalent zur positiven Reellheit (PR) von (4) ist. Jeder Bestandteil von  $\mathbf{H}(s)$  ist analytisch im Bereich  $\operatorname{Re}[s] > 0$ , außerdem gilt  $\mathbf{H}(s) + \mathbf{H}^*(s) \succeq \mathbf{0}, \forall s \text{ so dass } \operatorname{Re}[s] > 0$  [3]. In einem Nyquist-Diagramm liegen die Pole von  $\mathbf{H}(s)$  in der geschlossenen linken Halbebene (stabil). Wenn zusätzlich  $\mathbf{H}(s-\beta)$  (PR) ist (mit  $\beta > 0$ ), dann ist das System streng positiv reell (SPR). Die Pole von  $\mathbf{H}(s)$  liegen in der offenen linken Halbebene und das System ist asymptotisch stabil [4].

Weil die Zusammenschaltung von (streng) passiven bzw. (streng) positiv reellen Systemen wieder (streng) passiv bzw. (streng) positiv reell ist, sind solche Eigenschaften eines Systems und deren Beziehungen ein relevantes Forschungsthema im Bereich der Regelungstechnik [1], [3]. Zahlreiche Ergebnisse über Äquivalenzen zwischen solchen Begriffen und deren Subklassen wurden in den letzten Jahrzehnten veröffentlicht [1], [5]. Laut dem Kalman-Yakubovich-Popov (KYP) Lemma ist ein lineares System genau dann (P), wenn es (PR) ist. Es ist bekannt, dass (SPR) hinreichend für (SP) ist. Außerdem ist ein System ohne Durchgriff ( $\mathbf{D}=\mathbf{0}$ ) genau dann (SP), wenn es (SPR) ist [3]. Dennoch wurde bisher nicht bewiesen, dass die strenge Passivität eines LZI Systems der streng positiven Reellheit der jeweiligen Übertragungsmatrix für einen beliebigen Durchgriff entspricht [4]. Wir beweisen, dass solche Äquivalenz gilt, also dass (SPR) auch notwendig für (SP) ist.

Um unser Hauptergebnis herzuleiten, vereinen wir das KYP Lemma mit notwendigen und hinreichenden Bedingungen für die positive Definitheit symmetrischer Matrizen. Abschließend wird ein numerisches Beispiel präsentiert.

## Literatur:

[1] N. Kottenstette, M. J. McCourt, M. Xia and V. Gupta, "On relationships among passivity, positive realness, and dissipativity in linear systems", *Automatica*, vol. 50, pp. 1003-1016, 2014.

[2] J. C. Willems, "Dissipative dynamical systems - part II: linear systems with quadratic supply rates", *Arch. for Rational Mech. Anal.*, vol. 45, no. 5, pp. 352-393, 1972.

[3] B. Brogliato, R. Lozano, B. Maschke, O. Egeland, *Dissipative Systems Analysis and Control - Theory and Applications*, Springer, 2007.

[4] J. Adamy, *Nichtlineare Systeme und Regelungen*, Springer, 2014.

[5] L. Knockaert, "A note on strict passivity", *Systems and Control Letters*, vol. 54, pp. 865-869, 2005.

[6] H. K. Khalil, *Nonlinear Systems*, Prentice Hall, 2002.



# Modellbildung und Vergleich von linearen und nichtlinearen Regelungskonzepten für Drei-Wege-Autoabgaskatalysatoren

Dipl.-Ing. Radoy Stanchev \*

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

\* Fachgebiet Regelungstechnik und Mechatronik  
Technische Universität Darmstadt  
Landgraf-Georg-Str. 4, 64283 Darmstadt  
Telefon: +49 6151 16-25196  
Fax: +49 6151 16-25172  
rstanchev@iat.tu-darmstadt.de

\*\* Fachgebiet Regelungstechnik und Mechatronik  
Technische Universität Darmstadt  
Landgraf-Georg-Str. 4, 64283 Darmstadt  
Telefon: +49 6151 16-25200  
Fax: +49 6151 16-25172  
ukonigorski@iat.tu-darmstadt.de

**Schlüsselwörter:** Zustandsraummodell, Strukturmaße, modellbasierter Reglerentwurf

Zur effizienten Abgasnachbehandlung bei Ottomotoren hat sich der Drei-Wege-Katalysator seit mehr als drei Jahrzehnten bewährt. Seinen Namen verdankt er der Eigenschaft, die drei Hauptschadstoffe im Abgas von Ottomotoren, nämlich Kohlenwasserstoffe (HC), Kohlenstoffmonoxid (CO) und Stickoxide (NO<sub>x</sub>), gleichzeitig in ungiftiges Wasser (H<sub>2</sub>O), Kohlenstoffdioxid (CO<sub>2</sub>) und Stickstoff (N<sub>2</sub>) umzuwandeln. Nach dem aktuellen Stand der Technik bleibt das dynamische Verhalten des Katalysators beim Reglerentwurf weitgehend unberücksichtigt [1]. Der Wunsch nach steigender Effizienz beim Betrieb und bei der Herstellung des Katalysators erfordert allerdings den Einsatz von modellbasierten Verfahren zur Systemanalyse und zum Reglerentwurf.

In der Literatur sind grundsätzlich drei Typen von Katalysatormodellen anzutreffen: detaillierte physikochemische Modelle, vereinfachte physikochemische Modelle und phänomenologische Modelle [1]. Physikochemische Modelle haben gegenüber phänomenologischen Modellen den Vorteil, dass die Modellparameter eine physikalische Bedeutung besitzen. Modelle, die für den modellbasierten Reglerentwurf verwendet werden, zielen vor allem auf die Modellierung der Sauerstoffspeicherdynamik, da diese das dynamische Verhalten des Katalysators maßgeblich beeinflusst. Gemeinsam haben die meisten Modelle aus der Literatur, dass sie im Allgemeinen nicht als Zustandsraummodelle vorliegen. Dagegen beruhen viele Verfahren zur Systemanalyse und zum Reglerentwurf von nichtlinearen Systemen auf Zustandsraummodellen. Dieser Umstand beschränkt den modellbasierten Reglerentwurf auf sehr einfache Katalysatormodelle und oft auf lineare Regelungskonzepte. So werden z.B. in [1], [2] und [3] LQ-Regler für den Sauerstofffüllstand  $\theta$  des Katalysators entworfen. In [1] wird ein phänomenologisches Modell für die Sauerstoffspeicherung eingesetzt, während in [2] und [3] vereinfachte physikochemische Modelle zum Einsatz kommen. Das vereinfachte physikochemische Modell in [2] berücksichtigt als Gasspezies nur O<sub>2</sub> und CO, während das Modell in [3] zusätzlich noch H<sub>2</sub> berücksichtigt, da H<sub>2</sub> eine wichtige Rolle bei der Deaktivierung der Lambdasonde hinter dem Katalysator spielt. Dagegen berücksichtigt das komplette Modell zur Sauerstoffspeicherung in [2] die fünf Gasspezies CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, O<sub>2</sub>, CO, H<sub>2</sub> und ist damit komplexer als die bisher verwendeten Modelle zum modellbasierten Reglerentwurf.

In diesem Beitrag wird ausgehend von dem in [2] vorgestellten Modell zur Sauerstoffspeicherung das Konzept der Gewichtsfunktionen eingeführt und auf andere Reaktionsschemata erweitert. Die Gewichtsfunktionen erlauben eine sehr kompakte und intuitive Darstellung des Modells und ermöglichen das Erstellen von eingangsaффinen Zustandsraummodellen unabhängig von der Anzahl der diskreten Elemente des Modells. In Abbildung 1 sind die fünf Gewichtsfunktionen  $f_i$  beispielhaft dargestellt. Dabei bedeuten positive Werte, dass die betrachtete Spezies den Sauerstoffspeicher befüllt und negative Werte, dass sie ihn entleert.

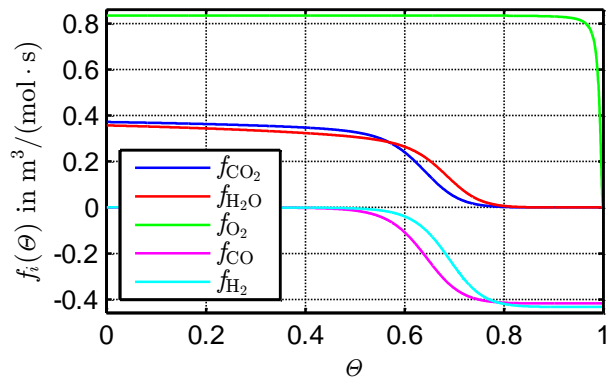


Abbildung 1: Verlauf der Gewichtsfunktionen in Abhängigkeit des Sauerstofffüllstandes  $\theta$

Dabei bedeuten positive Werte, dass die betrachtete Spezies den Sauerstoffspeicher befüllt und negative Werte, dass sie ihn entleert.

Basierend auf dem nichtlinearen Zustandsraummodell kann eine Stabilitätsanalyse mit der Direkten Methode von Ljapunov durchgeführt werden und so die asymptotische Stabilität der Ruhelagen nachgewiesen werden. Nach der Linearisierung des Modells können Strukturmaße, wie z.B. das Beobachtbarkeitsmaß nach Lückel und Müller, berechnet werden und dadurch eine Grundlage für den quantitativen Vergleich von verschiedenen Katalysatoren geschaffen werden. Die analytische Berechnung der Konvertierungsraten der Schadstoffe ermöglicht weiterhin die modellbasierte Wahl der Gewichtungsmatrix der Systemzustände beim Entwurf eines LQ-Reglers und somit kann der Reglerentwurf automatisiert und intuitiver gestaltet werden. Das stark nichtlineare Verhalten des Katalysators motiviert den Einsatz von nichtlinearen Reglerentwurfsverfahren und dies führt zur Erweiterung des LQ-Reglers zu einer nichtlinearen modellprädiktiven Regelung. Des Weiteren werden mittels exakter Ein-/Ausganglinearisierung ein Regler für den Sauerstofffüllstand im hinteren Teil des Katalysators und ein Regler für die Konvertierungsrate von  $O_2$  entworfen. Anhand von Simulationsstudien werden die linearen und nichtlinearen Regler miteinander verglichen und deren Vor- und Nachteile diskutiert.

## Literatur:

- [1] Tomforde, M.; Schultalbers, M.: Air-Fuel Ratio Control with Respect to Oxygen Storage Dynamics. Proceedings of the 16<sup>th</sup> International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics, Polen 2011, S. 242-247
- [2] Möller, R. J.: Modeling and Control of Three-Way Catalysts. ETH Zürich Diss. 2009
- [3] Auckenthaler, T. S.: Modelling and Control of Three-Way Catalytic. ETH Zürich Diss. 2005

# Marktähnliche Koordination in Cyber-physical Systems of Systems

Simon Wenzel\*

\*Lehrstuhl für Systemdynamik und Prozessführung  
Fakultät Bio- und Chemieingenieurwesen  
Technische Universität Dortmund  
Emil-Figge-Str. 70, 44227 Dortmund  
Tel.: 0231 / 755-5124  
Fax: 0231 / 755-5129  
E-Mail: Simon.Wenzel@bci.tu-dortmund.de

Sebastian Engell\*\*

\*\*Lehrstuhl für Systemdynamik und Prozessführung  
Fakultät Bio- und Chemieingenieurwesen  
Technische Universität Dortmund  
Emil-Figge-Str. 70, 44227 Dortmund  
Tel.: 0231 / 755-5126  
Fax: 0231 / 755-5129  
E-Mail: Sebastian.Engell@bci.tu-dortmund.de

**Schlüsselwörter:** Cyber-physical Systems of Systems, marktähnliche Koordination, optimale Ressourcen Allokation, dezentrale Optimierung, vernetzte Produktionsstandorte

Der Begriff Cyber-physical Systems of Systems (CPSoS) bezeichnet große physikalisch und informationstechnisch verkoppelte Systeme, in denen die einzelnen (Sub-)systeme partielle Autonomie besitzen. Produktionskomplexe in der Prozessindustrie sind Beispiele für solche CPSoS, da die Anlagen durch Ressourcennetzwerke eng miteinander verkoppelt sind, ihre Fahrweise aber weitgehend autonom festgelegt wird. Hinzu kommt hier, dass oft die einzelnen Anlagen von verschiedenen Business Units nach individuellen wirtschaftlichen Kriterien betrieben werden. Typische Ressourcen, die standortweit über Netze geteilt werden, sind Heißdampf auf verschiedenen Druck- und Temperaturstufen, Brenngas, Wasserstoff oder Zwischenprodukte wie Ethylen und Propylen. Dampf und Elektrizität werden in der Regel von einem standorteigenen Kraftwerk bereitgestellt, durch das beispielsweise das Brenngasnetz und das Dampfnetz gekoppelt sind [1]. Ziel des Unternehmens ist die optimale Steuerung der Anlagen, zur Senkung der Gesamtbetriebskosten und zum Erreichen umweltspezifischer Kennzahlen wie z. B. des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes. Dabei ist das Standortoptimum nicht identisch mit den lokalen Optima der Anlagen oder der Business Units.

Wir präsentieren eine Methode bei der basierend auf marktähnlicher Koordination iterativ das Standortoptimum gefunden wird, ohne dass ein zentrales Optimierungsproblem gelöst wird. Diese Strategie spiegelt den Ablauf bei einer Auktion wieder und ist bekannt als Tâtonnement Prozess [2]. Dabei passt ein zentraler Koordinator Transferpreise für gemeinsam genutzte Ressourcen an, bis sich Angebot und Nachfrage in den Verteilungsnetzen ausgleichen. Voraussetzung ist, dass die einzelnen Units lokale Optimierungsprobleme lösen, in welche diese Transferpreise eingehen. Für diese Koordination ist detailliertes Wissen über das Anlagenverhalten und die Kostenstruktur der einzelnen Business Units nicht erforderlich. Lediglich die für die übermittelten Transferpreise resultierenden Verbräuche und Produktionsraten der Ressourcen müssen dem Koordinator rückgemeldet werden. Der Ansatz gewährleistet somit ein hohes Maß an Vertraulichkeit.

Die vorgestellte Methode wird anhand eines Fallbeispiels aus der petrochemischen Industrie demonstriert.

## Literatur:

- [1] G. Stojanovski, L. Maxeiner, S. Krämer, und S. Engell, „Real-time Shared Resource Allocation by Price Coordination in an Integrated Petrochemical Site“, in *Proceedings of ECC15*, 2015, S. 1492–1497.
  
- [2] D. A. Walker, „Walras' Theories of Tatonnement“, *J. Polit. Econ.*, Bd. 95, Nr. 4, S. 758–774, 1987.

# Linked Enterprise Data als Konzept zur semantischen Integration für Industrie 4.0

Markus Graube \*

\* Professur für Prozessleittechnik  
Technische Universität Dresden  
01069 Dresden  
0351/463-33387

markus.graube@tu-dresden.de

Leon Urbas \*

\* Professur für Prozessleittechnik  
Technische Universität Dresden  
01069 Dresden  
0351/463-33387

leon.urbas@tu-dresden.de

**Schlüsselwörter:** Informationsintegration, Semantic Web, Linked Data

Mit der zunehmenden Modularisierung und dynamischen Kollaborationen in virtuellen Fabriken geht eine Dezentralisierung der Datensätze einher, die eine Integration von Information aus verschiedenen Gewerken und Lebensphasen erfordert, um die Planung und den Betrieb einer Anlage möglichst gut zu unterstützen und somit die Vision von Industrie 4.0 weiterzutragen [1]. Die Automatisierungs- und Prozessleittechnik ist jedoch gekennzeichnet durch eine große Heterogenität und Inkompatibilität von Werkzeugen und Datenbeständen. Bisherige Ansätze wie Weltmodelle (ISO 15926, ISO 10303) oder domänenspezifische Ontologien (CAEX) konnten dieses Problem nur in wenigen Bereichen zufriedenstellend lösen. Hauptargument gegen diese Lösungen sind stets die fehlende Erweiterbarkeit und die fehlende Interoperabilität mit bereits bestehenden Werkzeugen bei zu hohen Anfangsinvestitionen mit zu geringem unmittelbarem Nutzen.

Eine Alternative zu der Herstellung der Interoperabilität auf Werkzeugebene besteht in der Informationsintegration auf Datenebene (siehe Abb. 1). Dabei müssen die für ihren Anwendungsfall spezialisierten Werkzeuge eine Schnittstelle zu einer gemeinsamen Datenbasis bereitstellen. In dem gemeinsamen Informationsraum können dann direkt Verknüpfungen zwischen den einzelnen Datensätzen erstellt werden und somit auf Aktualisierung aus anderen Systemen reagiert werden. Auf Grund der Vielzahl der Tools mit unterschiedlicher Historie und Philosophie wird es dabei aber nicht möglich sein, die Datenschnittstelle komplett zu standardisieren. Vielmehr ist hier die Notwendigkeit nach einem flexiblen und sich selbst beschreibenden Datenmodell gegeben.

Als sinnvollen technischen Lösungsansatz wird hierfür Linked Enterprise Data verwendet, welches eine Erweiterung der Konzepte des Semantic Web um die Belange und Anforderungen der industriellen Datenverarbeitung



Abbildung 1: Linked Enterprise Data als Konzept zur semantischen Integration

darstellt [2]. So unterstützt es z.B. auch Versionierung und Zugriff auf dynamische Prozessdaten unterstützt wird. Dieses nutzt das Konzept von Linked Data und ermöglicht so die Integration von Informationsentitäten aus verschiedenen Quellen direkt auf der Datenebene. Die explizite Semantik des verwendeten Datenmodells RDF (Resource Description Framework) erlaubt es Mehrdeutigkeiten aufzulösen und mit der Verwendung von URIs Informationsentitäten organisationsübergreifend eindeutig zu referenzieren. Verschiedene Domänen können ihre spezifischen Informationsräume mit Hilfe von Ontologien, z.B. in OWL, modellieren und mit Informationsteilen aus anderen Domänen direkt wieder verknüpfen. Damit entsteht eine unbegrenzte, domänenübergreifende Erweiterbarkeit des Informationsraumes. Somit können Teile der Datenbestände nach Bedarf bereitgestellt werden, wodurch sich ein sofortiger Mehrwert bei sehr geringem Anfangsaufwand einstellt. Zudem werden die Datenbestände durch die inhärente explizite Semantik vollständig durch Maschinen interpretierbar, wodurch sich bisher kaum realisierbare Möglichkeiten zur Datenaggregation und Inferenz ergeben. Als Zugangstechnologie werden etablierte Internetprotokolle genutzt, die eine sichere, hochverfügbare und kostengünstige Kommunikation ermöglichen. Damit können heterogene Datenbestände mit einheitlichen, frei verfügbaren Werkzeugen abgefragt und bearbeitet werden. Als Abfragesprache kommt SPARQL zum Einsatz, das graphenbasierte Abfragen mit komplexen Filterfunktionen erlaubt.

Basierend auf dem Anwendungsfall der mobilen industriellen Instandhaltung zeigen wir, wie Linked Data genutzt werden kann, um komplexe Informations- und Zugriffsstrukturen für Anwendungsentwickler und Endnutzer beherrschbar zu machen. Wir stellen dar, wie die explizite Semantik der Daten auf Anwendungsebene genutzt werden kann [3]. Dabei ist die Ressourcenorientierung von Linked Data eine gute Möglichkeit um einerseits Applikationen zu entkoppeln und andererseits definierte Schnittstellen zu schaffen.

## **Literatur:**

- [1] Graube, M., Schneider, F., Obst, M., & Urbas, L. (2015). Integrierter Informations- und Interaktionsraum: Modularisierung und Digitale Anlage von der Leitwarte bis ins Feld. Presented at the Automation 2015, Baden-Baden.
- [2] Graube, M., Pfeffer, J., Ziegler, J., & Urbas, L. (2011). Linked Data as Integrating Technology for Industrial Data. In Proceedings of the 14th International Conference on Network-Based Information Systems (pp. 162–167). IEEE. <http://doi.org/10.1109/NBiS.2011.33>
- [3] Graube, M., Ziegler, J., Hladik, J., & Urbas, L. (2013). Linked Data as Enabler for Mobile Applications for Complex Tasks in Industrial Settings. In Proceedings of IEEE 18th Conference on Emerging Technologies & Factory Automation (ETFA 2013) (pp. 1–8). IEEE.

# Prädiktion von Signalzuständen verkehrsadaptiver Lichtsignalanlagen zur Unterstützung automatisierter Fahrfunktionen

Mario Krumnow \*

\* Lehrstuhl für Verkehrsleitsystem und –  
prozessautomatisierung  
TU Dresden  
Hettnerstr. 1-3  
0351 / 463 36780  
0351 / 463 36785

Mario.Krumnow@tu-dresden.de

Prof. Jürgen Krimmling \*\*

\*\* Lehrstuhl für Verkehrsleitsystem und –  
prozessautomatisierung  
TU Dresden  
Hettnerstr. 1-3  
0351 / 463 36784  
0351 / 463 36785

Juergen.Krimmling@tu-dresden.de

**Schlüsselwörter:** verkehrsadaptiv, Lichtsignalanlage, Schaltzeitprognose, V2X, Fahrerassistenz, automatisiert

Die Nutzung aktueller Verkehrsinformationen im Fahrzeug zur Unterstützung des Fahrers bzw. des Fahrzeuges ist aktueller Gegenstand vieler aktueller Forschungsprojekte.

Die benötigten Informationen innerhalb der Vehicle-to-Infrastructure Kommunikation (V2X) sind dabei vielfältig ausgeprägt. So sollen, zur Unterstützung hochautomatisierter Fahr-funktionen, Information über den aktuellen sowie den zukünftigen Zustand von Verkehrsinfrastrukturelementen übertragen werden, welche bei einer automatisierten Fahrweise berücksichtigt werden können.

Diese Arbeit betrachtet hier die Übertragung von Schaltinformationen von Lichtsignal-anlagen (LSA). Diese sind im Allgemeinen verkehrsabhängig gesteuert und passen sich an die realen Verkehrsverhältnisse an [1][2]. Im Rahmen mehrere Forschungsprojekte wurde dabei ein zentraler Ansatz verfolgt, bei dem innerhalb einer Verkehrsleitzentrale Schaltzeitprognosen generiert und via Mobilfunk (UMTS) an die Fahrzeuge publiziert werden. [3]

Für eine flächenhafte Nutzung einer solchen „Ampelphasenassistenz“ wurde daher ein allgemeiner Ansatz entwickelt, welcher unterschiedliche verkehrsabhängige LSA-Steuerverfahren berücksichtigt. Dabei wurde bewusst die vorhandene LSA Infrastruktur verwendet, ohne zusätzliche Umrüstungen oder besondere Installationen vorzunehmen (Verzicht auf roadside units) um die Kosten für ein solches Verfahren möglichst zu minimieren. Der entwickelte Algorithmus arbeitet sowohl hersteller- als auch schnittstellen-unabhängig und lässt dabei eine Schaltzeitprognose für eine Vielzahl von verkehrsabhängigen LSA Steuerverfahren zu.

Der Vortrag stellt dabei die Verfahrensweise einer allgemeinen Schaltzeitprognose an verkehrsabhängigen Lichtsignalanlagen in Dresden vor und präsentiert die Ergebnisse des Forschungsprojektes EFA 2014/2. Weiterhin wird ein Ausblick gegeben über anstehende Forschungsaktivitäten im Bereich des hochautomat-

isierten Fahrens bei der die Integration dieser V2X Kommunikation fester Bestandteil sein wird. [4]

### **Literatur:**

[1] Forschungsgesellschaft für Straßen und Verkehrswesen (2009): Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen: HBS. FGSV-Verl., 2009

[2] Forschungsgesellschaft für Strassen-und Verkehrswesen, (2010): Richtlinien für Lichtsignalanlagen: RiLSA. FGSV-Verl., 2010.

[3] KRUMNOW, M. (2012): Schaltzeitprognose verkehrsadaptiver Lichtsignalanlagen im Rahmen des Projektes EFA 2014/ 2, 8. VIMOS-Tagung, Dresden

[4] KRUMNOW, M (2015): REMAS – Ressourcenmanagementsystem für hoch-automatisierte urbane Verkehre, 22. Verkehrstechnisches Seminar, Königstein



# Algebraische Fehlerdetektion für verteilt-parametrische Systeme mittels Modulationsfunktionen

Ferdinand Fischer \*

\* Lehrstuhl für Regelungstechnik  
Universität Erlangen-Nürnberg  
Cauerstraße 7, D-91058 Erlangen, Germany  
+49 (0)9131 85-27144  
+49 (0)9131 85-28715  
ferdinand.fischer@fau.de

Joachim Deutscher\*\*

\*\* Lehrstuhl für Regelungstechnik  
Universität Erlangen-Nürnberg  
Cauerstraße 7, D-91058 Erlangen, Germany  
+49 (0)9131 / 85-27128  
+49 (0)9131 / 85-28715  
joachim.deutscher@fau.de

**Schlüsselwörter:** verteilt-parametrische Systeme, Fehlerdetektion, Modulationsfunktionen, Trajektorienplanung

Aufgrund der zunehmenden Komplexität von technischen Systemen gewinnt deren Überwachung hinsichtlich fehlerhaften Verhaltens immer mehr an Bedeutung. Mit einer *Fehlerdetektion* wird die frühzeitige Erkennung von Fehlern ermöglicht. Hierdurch können Fehler behandelt werden, bevor sie weitere Schäden am System verursachen. Dies führt zu einer Verbesserung der Sicherheit, Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit. Während für konzentriert-parametrische Systeme (SKP) bereits viele Methoden vorgestellt wurden (siehe z. B. [6], [4]), beschränken sich die Vorgehensweisen für verteilt-parametrische Systeme (SVP) auf beobachter-basierte Ansätze. Die in [1], [2], [5] und [3] vorgestellten Verfahren zur Fehlerdetektion bei SVP basieren entweder auf einer Approximation der unendlich-dimensionalen Strecke oder der eines unendlich-dimensionalen Beobachters. Wenn dabei alle dynamischen Einflüsse berücksichtigt werden sollen, dann kann die Ordnung der Approximation unter Umständen sehr hoch ausfallen. Darüber hinaus erfordert das Fehlerdetektionsergebnis aufgrund der vorgenommenen Approximation eine weiterführende Analyse, um gesichert Fehler detektieren zu können.

In diesem Beitrag wird die *Methode der Modulationfunktionen*, welche in [8] signalmodellbasiert für SKP eingeführt wurde, auf SVP übertragen. Dies ermöglicht eine Algebraisierung der Systemgleichungen des SVP. Durch eine geeignete Wahl der Modulationsfunktion kann direkt nach den Fehlern in Abhängigkeit bekannter Mess- und Eingangsgrößen aufgelöst werden. Damit kommt diese Methode ohne eine Approximation aus, ist einfach implementierbar und liefert sofort gesicherte Detektionsergebnisse. Entsprechend zur Vorgehensweise in [8] wird für die orts- und zeitabhängige Modulationsfunktion ein Signalmodell hergeleitet. Zum Eliminieren der unbekannt Signale müssen dann Anforderungen an dieses Signalmodell gestellt werden, was auf die Realisierung eines Arbeitspunktwechsels für ein SVP führt. Hierdurch wird das Fehlerdetektionsproblem auf ein Trajektorienplanungsproblem zurückgeführt, für das in der Literatur bereits Lösungen bekannt sind (siehe [7], [9]). In einigen Fällen sind weitere Freiheitsgrade verfügbar. Diese ermöglichen die Berücksichtigung von Störungen oder die Isolation verschiedener Fehler. Nach Elimination aller unbekannt Signale durch die Modulationsfunktion kann eine algebraische Detektionsgleichung aufgestellt werden, in die nur bekannte Messwerte und Eingangsgrößen sowie der gesuchte Fehler eingehen. Durch das Auflösen nach

dem Fehler erhält man dann einen einfachen algebraischen Ausdruck für die Fehlerdetektion.

Die Herleitung der Detektionsgleichung wird am Beispiel eines Wärmeleiters mit Aktorfehler gezeigt. Abschließend wird die Praxistauglichkeit der vorgeschlagenen Fehlerdetektion anhand von Messwerten eines Versuchsaufbaus demonstriert.

## Literatur:

- [1] *Baruh, H.*: Actuator failure detection in the control of distributed systems. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics* 9 (1986), S. 181-189.
- [2] *Demetriou, M. A.*: A model-based fault detection and diagnosis scheme for distributed parameter systems: A learning systems approach. *ESAIM: Control, Optimisation and Calculus of Variations* 7 (2002), S. 43-67.
- [3] *Deutscher, J.*: Fault detection for linear distributed-parameter systems using finite-dimensional functional observers. *Erscheint im International Journal of Control* (2015).
- [4] *Ding, S. X.*: Model-based fault diagnosis techniques: design schemes, algorithms, and tools. Springer-Verlag, Berlin, 2008.
- [5] *Ghantasala, S. und El-Farra, N. H.*: Robust actuator fault isolation and management in constrained uncertain parabolic PDE systems. *Automatica* 45 (2009), S. 2368-2373.
- [6] *Isermann, R.*: Fault-diagnosis systems: an introduction from fault detection to fault tolerance. Springer-Verlag, Berlin, 2006.
- [7] *Rudolph, J. und Woittennek, F.*: Motion planning and open loop control design for linear distributed parameter systems with lumped controls. *International Journal of Control* 81 (2008), S. 457-474.
- [8] *Schmid, C. und Roppenecker, G.*: Parameteridentifikation für LTI Systeme mit Hilfe signalmodellgenerierter Modulationsfunktionen. *at-Automatisierungstechnik* 59 (2011), S. 521-528.
- [9] *Woittennek, F.*: Beiträge zum Steuerungsentwurf für lineare, örtlich verteilte Systeme mit konzentrierten Stelleingriffen. Shaker Verlag, Aachen, 2007.

# Iterativ Lernende Regelung des Anodendrucks während der Spülvorgänge eines PEM-Brennstoffzellensystems

Christian Hähnel\*

\* Professur für Regelungstechnik  
Helmut-Schmidt-Universität/  
Universität der Bundeswehr Hamburg  
Holstenhofweg 85, 22043 Hamburg  
040 6541 2617  
040 6541 3766  
Christian.Haehnel@hsu-hh.de

Joachim Horn\*\*

\*\* Professur für Regelungstechnik  
Helmut-Schmidt-Universität/  
Universität der Bundeswehr Hamburg  
Holstenhofweg 85, 22043 Hamburg  
040 6541 3593  
040 6541 3766  
Joachim.Horn@hsu-hh.de

**Schlüsselwörter:** PEM-Brennstoffzellen, Iterativ Lernende Regelung

Polymer-Elektrolyt-Membran-Brennstoffzellen (PEMBZ) sind in der Lage, die chemische Energie von Wasserstoff direkt in elektrische Energie unter Nutzung des Luftsauerstoffs zu wandeln. Für den Betrieb von PEMBZ-Systemen existieren verschiedene Möglichkeiten der Zufuhr und Nutzung des eingesetzten Wasserstoffs. Eine Möglichkeit ist der Rezirkulationsbetrieb. Hierbei wird der nicht verbrauchte Wasserstoff wieder an den Brennstoffzellenstackeingang gefördert und kann somit erneut verwendet werden. Gleichzeitig kann die Strömungsgeschwindigkeit des Wasserstoffs innerhalb des anodischen Gassystems erhöht werden, was sich positiv auf die chemische Reaktion auswirkt. Während dieses Rezirkulationsbetriebs ist das anodische Gassystem bis auf die Zuführung des Wasserstoffs für die Druckregelung und der Nachführung des verbrauchten Wasserstoffs geschlossen.

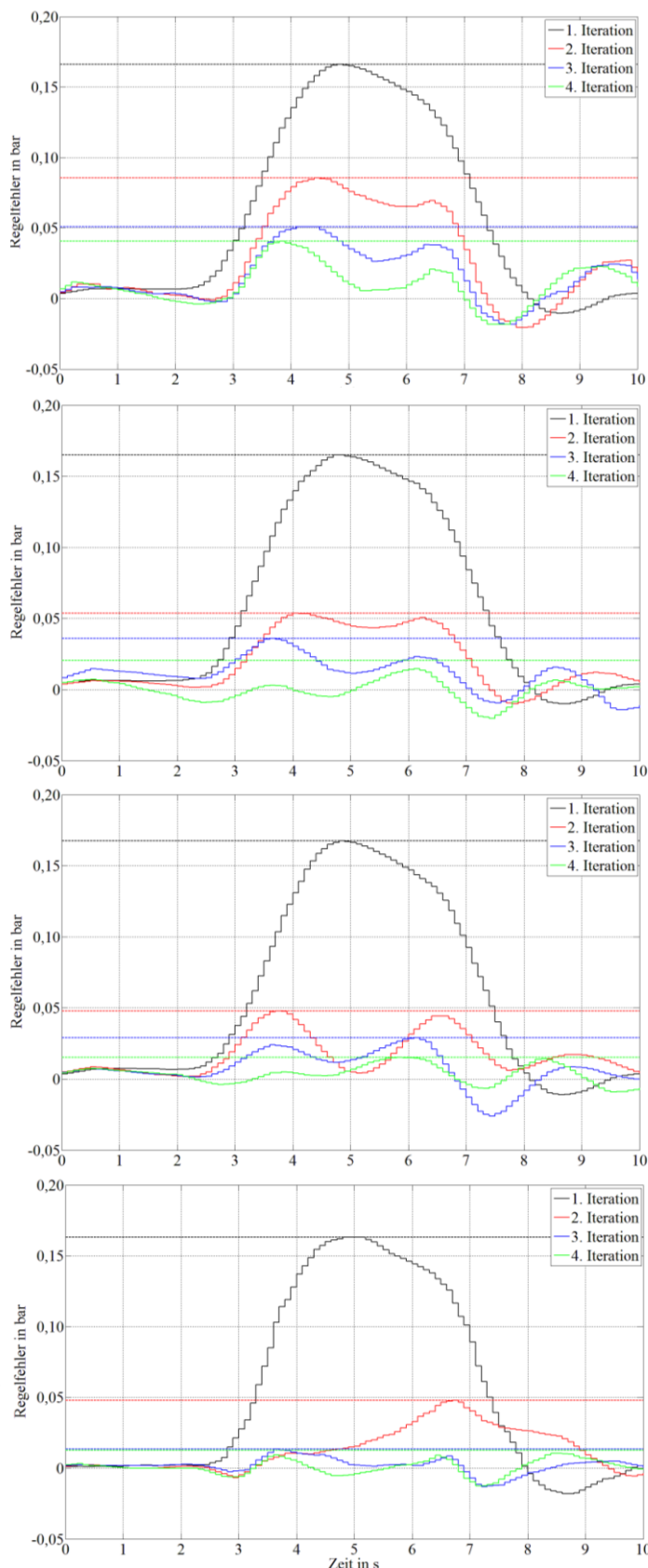
Durch die chemische Reaktion und die Diffusion kommt es zu Ansammlungen von Wasserkondensat und Stickstoff in diesem geschlossenen Bereich des Brennstoffzellensystems. Beide Stoffe beeinflussen die chemische Reaktion und senken die Effizienz des Systems. Durch regelmäßiges, kurzes Spülen kann das anodische Gassystem vom angesammelten Stickstoff und dem Wasser auf den Reaktionsflächen befreit werden. Dieser Vorgang wird durch das Öffnen des Abgasventils (Purgeventils) in Abhängigkeit von dem Druck und dem gewünschten Spülvolumen realisiert. Der Zeitpunkt des Spülens wird von der integralen Menge des produzierten Wassers bestimmt.

Für diesen sehr regelmäßigen Vorgang des Spülens, der bei einer Dauerlast von ca. 100A alle 30s durchgeführt werden soll [1], wurde ein Ansatz zur Druckregelung mittels Iterativ Lernender Regelung (ILR) angewendet. Da es sich bei dem Spülen um einen wiederholenden Vorgang mit jeweils gleichen Anfangsbedingungen und bekanntem Referenzverlauf handelt, sind die grundsätzlichen Bedingungen zur Anwendung einer ILR gegeben. Zunächst steht die Regelung des Anodendrucks während des Spülvorganges im Vordergrund. Ein zu hoher Druckunterschied zwischen anoden- und kathodenseitigem Gassystem kann zur Schädigung des Brennstoffzellenstacks führen. Durch die Zuführung von zusätzlichem Wasserstoff während des Spülvorganges soll der Anodendruck konstant gehalten werden. Der Eingriff über die Zufuhr des zusätzlichen Wasserstoffs findet mit Hilfe einer parallelen

ILR-Struktur statt [2]. Das für die ILR benötigte Lernfilter wird auf verschiedenen Arten mit und ohne Hilfe des vorhandenen Modells des Brennstoffzellensystems erstellt. Vergleichend werden ein nicht modellbasierter Ansatz und drei modellbasierte Ansätze dargestellt. Bei den modellbasierten Ansätzen werden ein lineares, zeitinvariantes Modell des geschlossenen, anodischen Gassystems, ein lineares, zeitvariantes Modell mit Kenntnis der Ventilöffnung und -Charakteristik sowie ein optimierender Ansatz (OILR) genutzt. Die Konvergenzeigenschaften und die bleibende Regelabweichung werden als Kriterien für den Vergleich herangezogen. Dargestellt sind die Fehlerverläufe der ersten, zweiten, dritten und vierten Iteration unter Nutzung der vier Ansätze.

Die Versuche zur Anwendung der ILR werden an einem Brennstoffzellenprüfstand der Fa. FUELCON und dem Stack PM 200 der Fa. PROTON MOTOR mit einer elektrischen Spitzenleistung von 4,4kW durchgeführt.

Abbildung 1: Fehlerverläufe  
a) nichtmodellbasierten Verfahren,  
b) lineares, zeitinvariantes Modell,  
c) lineares, zeitvariantes Modell,  
d) OILR



### Literatur:

[1] PROTON MOTOR Proton Power Systems plc Group, „Betriebsanweisung PM 200“, 2011  
[2] D. A. Bristow, M. Tharayil und A. G. Alleyne, “A Survey of Iterative Learning Control”, *IEEE Control Systems Magazine*, 26(3), S. 96-114, 2006

# Ein Lyapunov-basierter Ansatz für adaptive Sliding-Mode Regelungen

Alexander Barth, Johann Reger, Kai Wulff  
Technische Universität Ilmenau  
Inst. für Automatisierungs- und Systemtechnik  
Helmholzplatz 3, 98693 Ilmenau

Martin Horn, Markus Reichartinger  
Technische Universität Graz  
Inst. für Regelungs- und Automatisierungstechnik  
Kopernikusgasse 24/II, 8020 Graz

**Schlüsselwörter:** Sliding-Mode Regelung, Lyapunov-Theorie, Adaptive Regelung

Im Zentrum unseres Beitrags stehen nichtlineare Systeme, die Modellunsicherheiten und unbekanntem Eingangsstörungen unterworfen sind. Dabei nehmen wir an, dass sämtliche Unsicherheiten im Eingangskanal auf das System wirken. Wie bei Sliding-Mode Regelungen üblich, prägt man dem System ein Wunschverhalten auf, indem eine entsprechende Gleitmannigfaltigkeit mit gewünschter Dynamik definiert wird, die dann ein schaltender Regler einregelt. Trotz Modellunsicherheiten und Eingangsstörungen gelingt das unter gewissen Bedingungen auch in endlicher Zeit.

Eine mögliche Lösung für das Entwurfsproblem wird von Shtessel et al. vorgestellt [5, 2, 6]. Dabei wird aber vorausgesetzt, dass die Modellunsicherheiten und Störungen nicht schneller als mit der Potenz  $1/2$  zum Abstand der Mannigfaltigkeit wachsen. Diese Annahme ist für viele praktische Probleme zu restriktiv.

Im Vortrag wird ein Algorithmus vorgestellt, der diese Beschränkung aufheben kann. Kern unseres Ansatzes ist die Separation der Unsicherheiten in zwei Aneile: eine sogenannte *strukturierte Unsicherheit*, welche sich durch eine bekannte Ansatzfunktion und einem unbekanntem Parametervektor beschreiben lässt und eine *unstrukturierte Unsicherheit*, die dann der Beschränkung wie im Ansatz von Shtessel et al. [5] unterliegt. Die Einbeziehung von strukturierten Unsicherheiten ermöglicht nun aber den Entwurf von adaptiven Sliding-Mode Regelungen; siehe [1] für erste Resultate.

Greift man bei der adaptiven Sliding-Mode Regelung auf quadratische Lyapunov-Funktionen wie in [3] zurück, so führt der Ansatz in [1] jedoch zu Adaptionsgesetzen, deren rechte Seite nahe der gewünschten Mannigfaltigkeit unbeschränkt ist. Die kürzlich von Moreno et al. in [4] vorgestellte differenzierbare Lyapunov-Funktion gestattet die Lösung dieses Problems. In Erweiterung zu [1] präsentieren die Autoren nun einen Ansatz für eine adaptive Sliding-Mode Regelung, welche ein nunmehr stetiges Adaptionsgesetz zulässt.

Im Vergleich zu existierenden Lösungen können die Verstärkungen des diskontinuierlichen Anteils im Regler unter vergleichsweise milden Voraussetzungen deutlich reduziert werden.

## Literatur

- [1] BARTH, A., REICHARTINGER, M., REGER, J., HORN, M., and WULFF, K.: *Lyapunov-Design for a Super-Twisting Sliding-Mode Controller using the Certainty-Equivalence Principle*. In 1st MICNON, St. Petersburg, Russia, 2015.
- [2] KOCHALUMMOOTTIL, J., SHTESEL, Y., MORENO, J., and FRIDMAN, L.: *Adaptive twist sliding mode control: A lyapunov design*. In 50th IEEE CDC, 7623–7628, 2011.

- [3] MORENO, J.A.: *Lyapunov analysis of non homogeneous Super-Twisting algorithms*. In 11th IEEE VSS, 534-539, 2010.
- [4] MORENO, J. and SÁNCHEZ, T.: *A constructive lyapunov function design method for a class of homogeneous systems*. In 53rd IEEE CDC, 5500–5505, 2014.
- [5] SHTESEL, Y., MORENO, J., PLESTAN, F., FRIDMAN, L. and POZNYAK, A.: *Super-twisting adaptive sliding mode control: A lyapunov design*. In 49th IEEE CDC, 5109–5113, 2010.
- [6] SHTESEL, Y., TALEB, M. and PLESTAN, F.: *A novel adaptive-gain supertwisting sliding mode controller: Methodology and application*. Automatica, 48(5), 759–769, 2012.

# Stochastische modellprädiktive Regelung für assistiertes und automatisiertes Fahren

Xiaohai Lin \*

Daniel Görjes \*\*

\* Juniorprofessur für Elektromobilität  
Technische Universität Kaiserslautern  
Erwin-Schrödinger-Str. 12, 67663 Kaiserslautern  
Telefon +49 631 205-3861  
Fax +49 631 205-4205  
E-Mail lin@eit.uni-kl.de

\*\* Juniorprofessur für Elektromobilität  
Technische Universität Kaiserslautern  
Erwin-Schrödinger-Str. 12, 67663 Kaiserslautern  
Telefon +49 631 205-2091  
Fax +49 631 205-4205  
E-Mail goerges@eit.uni-kl.de

**Schlüsselwörter:** Stochastische modellprädiktive Regelung, assistiertes Fahren, automatisiertes Fahren, Umgebungsmodellierung

Stochastische modellprädiktive Regelungsmethoden sind ein wichtiges Bindeglied zwischen konventionellen und robusten modellprädiktiven Regelungsmethoden. Konventionelle modellprädiktive Regelungsverfahren haben oft eine hohe Regelgüte, jedoch teils eine geringe Robustheit. Robuste modellprädiktive Regelungsverfahren haben demgegenüber teils eine geringe Regelgüte, jedoch eine hohe Robustheit. Stochastische modellprädiktive Regelungsverfahren bieten eine hohe Robustheit und gleichzeitig eine hohe Regelgüte, jeweils im stochastischen Sinne. Ein wesentlicher Baustein ist dabei die Nutzung von stochastischen Informationen über die Unsicherheit und die Störung. In den letzten Jahren haben stochastische modellprädiktive Regelungsmethoden aufgrund dieser günstigen Eigenschaften ein erhebliches Interesse in der Wissenschaftsgemeinde erfahren [1-4].

Stochastische modellprädiktive Regelungsmethoden haben vielfältige Anwendungen im assistierten und automatisierten Fahren. Eine wesentliche Problemstellung beim assistierten und automatisierten Fahren ist die Prädiktion von und die Reaktion auf Trajektorien des eigenen Fahrzeugs und der umgebenden Fahrzeuge. Zur Prädiktion der Trajektorien können stochastische Modelle verwendet werden, beispielsweise Gaussian Mixture und Hidden Markov Models sowie Dynamic Bayesian Networks [5]. Zur Reaktion auf die Trajektorien können stochastische modellprädiktive Regelungsmethoden auf Basis der stochastischen Modelle entwickelt werden. Die resultierende Architektur ist in Abbildung 1 dargestellt. Anwendungen reichen von der Spurwechsel- und Kreuzungsassistenz über die adaptive Geschwindigkeitsregelung bis zur Längs- und Querführungsautomatisierung. Erste Ansätze zum assistierten und automatisierten Fahren basierend auf stochastischen modellprädiktiven Regelungsmethoden wurden in jüngster Zeit vorgestellt [6, 7]. Viele theoretische und praktische Fragen sind allerdings noch offen. Insbesondere müssen Modellierungsansätze (zeit-/ortsbasiert), Stabilitätskriterien (für nicht unabhängig identisch verteilte Störungen) und Realisierungsaspekte (Echtzeitfähigkeit) untersucht werden. Hierzu besteht ein signifikanter Forschungsbedarf.

In diesem Beitrag wird eine Übersicht zu stochastischen modellprädiktiven Regelungsmethoden für das assistierte und automatisierte Fahren gegeben und eine energieoptimale adaptive Geschwindigkeitsregelung als Beispiel vorgestellt.

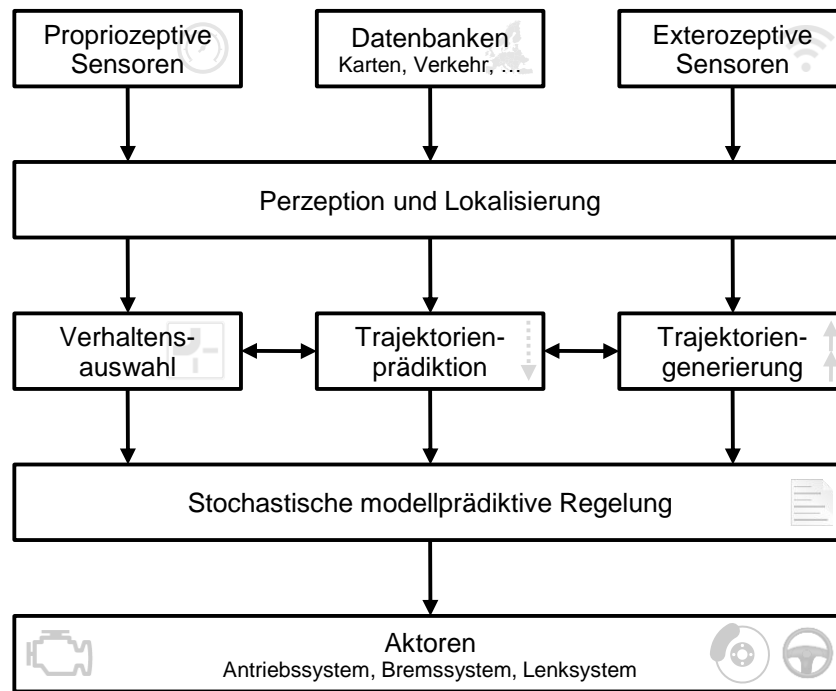


Abbildung 1: Architektur für assistiertes und automatisiertes Fahren

## Literatur:

- [1] B. Kouvaritakis, M. Cannon, S. V. Raković und Q. Cheng. Explicit use of probabilistic distributions in linear predictive control. *Automatica*, 46(10):1719–1724, 2010.
- [2] G. Schildbach, L. Fagiano, C. Frey und Morari. The scenario approach for stochastic model predictive control with bounds on closed-loop constraint violations. *Automatica*, 50(12):3009–3018, 2014.
- [3] D. Bernardini und A. Bemporad. Stabilizing model predictive control of stochastic constrained linear systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 57(6): 1468–1480, 2012.
- [4] X. Lin, D. Görges, S. Caba und S. Liu. Stochastic MPC of systems with additive disturbance using scenario optimization. In *Proceedings of the 5th IFAC Conference on Nonlinear Model Predictive Control*, S. 236–241, Sevilla, Spanien, 2015.
- [5] S. Lefèvre, D. Vasquez und C. Laugier. A survey on motion prediction and risk assessment for intelligent vehicles. *ROBOMECH Journal*, 1(1):1–14, 2014.
- [6] A. Carvalho, S. Lefèvre, G. Schildbach, J. Kong und F. Borrelli. Automated driving: The role of forecasts and uncertainty—A control perspective. *European Journal of Control*, 24:14-32, 2015.
- [7] D. Moser, H. Waschl, H. Kirchsteiger, R. Schmied und L. del Re. Cooperative adaptive cruise control applying stochastic linear model predictive control strategies. In *Proceedings of the 2015 Euroean Control Conference*, S. 3388–3393, Linz, Österreich, 2015.



# Fahrzeugführung von autonomen Unterwasserfahrzeugen zur Pipelineinspektion

Marco Jacobi \*

Thomas Rauschenbach \*\*

\* Institutsteil Angewandte Systemtechnik (AST)  
des Fraunhofer IOSB  
Am Vogelherd 50, 98693 Ilmenau  
Tel. +49 3677 461 176  
Fax. +49 3677 461 100  
marco.jacobi@iosb-ast.fraunhofer.de

\*\* Institutsteil Angewandte Systemtechnik (AST)  
des Fraunhofer IOSB  
Am Vogelherd 50, 98693 Ilmenau  
Tel. +49 3677 461 124  
Fax. +49 3677 461 100  
thomas.rauschenbach@iosb-ast.fraunhofer.de

**Schlüsselwörter:** Unterwasserinspektion; Fahrzeugführung; Sensordatenfusion

Unterwasserpipelines dienen der Anbindung von Offshore-Förderanlagen sowie als Transitstrecken für flüssige oder gasförmige Waren. Die Umgebungsbedingungen für Offshore-Installationen sind extrem rau: Seewasser ist hochkorrosiv und Strömungen, vor allem in Tidengewässern, können Sediment auf- bzw. abtragen. Die Pipeline kann überspült oder durch Unterkolkungen hängt die Pipeline frei im Wasser. Regelmäßige Inspektionen sind zur Aufrechterhaltung eines störungsfreien Betriebes notwendig und werden auch vom Gesetzgeber bzw. Zertifizierer gefordert [1]. Pipelines können von innen durch Molche (bzw. PIGs) oder von außen inspiziert werden. Molche können Anomalien auf der Innenseite der Pipeline entdecken sowie auch Schichtdickenmessungen durchführen; jedoch kann die äußere Umgebung nicht erfasst werden. Die Außeninspektion erfolgt aktuell meist durch ferngesteuerte Unterwasserfahrzeuge (ROVs).

Eine Inspektion per ROV wird durch ROV-Piloten von einem Mutterschiff aus gesteuert; dies wird im Mehrschichtbetrieb auch bis zu mehreren Wochen Dauer durchgeführt und ist extrem ermüdend. Durch die hohe Belastung können Fehler bei der Fahrzeugsteuerung erfolgen oder Anomalien übersehen werden. Autonom agierende Fahrzeuge (AUVs) können viele Aufgaben der ROVs und der Piloten übernehmen und eine gleichbleibende Qualität der Inspektion sicherstellen.

Grundlegende Aufgaben der Fahrzeugführung für die Pipelineinspektion sind das Auffinden der zu inspizierenden Pipeline und die anschließende Verfolgung der Verlegetrasse. Dabei wird der Zustand der Pipeline mittels der Inspektionssensorik erfasst. Im vorliegenden Beispiel werden ein Magnetometer, ein Seitensichtsonar, ein Fächerecholot, Kameras und ein Sub-Bottom-Profiler eingesetzt.

Die im Vortrag vorgestellten Verfahren zur Fahrzeugführung nutzen die gesamte Payload-Sensorik zur Erfassung der Pipeline und für die Regelung des Fahrzeuges.

Dabei werden die Daten der einzelnen Sensoren zu einem Umgebungsmodell fusioniert, wobei die Detektionsgüte der einzelnen Sensoren beachtet werden. Je nach Situation kann die Pipeline frei auf dem Gewässergrund liegen oder eingegraben sein, wo sie von Kameras oder einem Echolot nicht erfasst wird. Des Weiteren ist zu beachten, dass jeder einzelne Sensor, je nach Verbauort am Fahrzeug, die Pipeline in einem unterschiedlichen Bereich erfasst. Die Abbildung 1 illustriert dies.

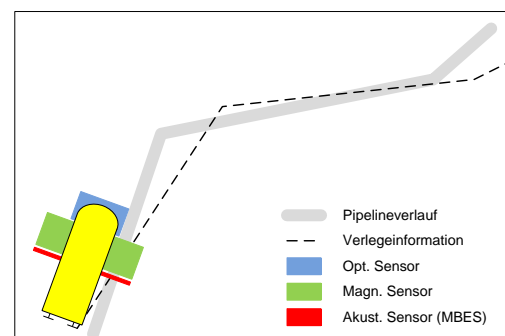


Abbildung 1: Sensorkonfiguration

Die Solltrajektorie für die Fahrzeugregelung, insbesondere für die Aufgaben „Folgen“ und „Suchen“ der Pipeline, wird aus dem Umgebungsmodell generiert. Dabei werden verschiedene Methoden zum Generieren der Solltrajektorien und zum Regeln (line of sight und/oder cross track error) verwendet: Für das Suchen und Auffinden der Pipeline werden Karten, Occupancy-Grids [3], erstellt. In diesen Karten werden die Wahrscheinlichkeiten, dass an einer Gitter-Position eine Pipeline vorhanden ist, gespeichert. Wenn hinreichend viele Kontakte zur Pipeline gesammelt wurden, kann mittels der Karten die Pipeline identifiziert und das Folgen der Verlegetrasse begonnen werden. Der Regler für das Folgen basiert auf einer Abstandsregelung und die Ermittlung der Solltrajektorie erfolgt über einen Kalman-Filter, der die seitliche Ablage des Fahrzeuges zur Pipeline aus den Sensordaten und deren Detektionsgüte schätzt. Die Aufgaben des Fahrzeuges werden im Missionsplan beschrieben. Dieser hat für eine Inspektionsmission folgenden Aufbau: 1. Aussetzen des Fahrzeuges, 2. Transit ins Inspektionsgebiet zur Pipeline bzw. zum Startpunkt der Inspektion, 3. Suche der zu inspizierenden Pipeline, 4. Ausrichten des Fahrzeug zur Pipeline für optimale Sensorabdeckung, 5. Folgen der Verlegetrasse der Pipeline, 6. Beenden der Inspektion, wenn der zu inspizierende Abschnitt abgefahren wurde und 7. Rückkehr zur Wasseroberfläche, um das Fahrzeug zu bergen und die Daten auszuwerten.

Die einzelnen Aufgaben der AUV-Mission können als Zustandsautomat betrachtet werden: so gibt es Zustandsdefinitionen für den Transit in das Inspektionsgebiet und zur Bergeposition bzw. allgemein zu einem Wegpunkt, für die Suche nach der Pipeline und dem Folgen der Verlegetrasse. Die Implementation dieses Automaten erfolgt auf Basis der verhaltensbasierten Regelung [2], wobei die einzelnen Verhaltensweisen die Missionselemente abbilden. Das implementierte Konzept bietet die Möglichkeit für nebenläufige Aufgaben unterschiedlicher Priorisierung. Die Abbildung 2 gibt einen Überblick über die gesamte Reglerstruktur, die kaskadiert aufgebaut ist. Den inneren Regelkreis bilden die grundlegenden Fahrzeugfunktionen mit Autopilot und Navigation. Darauf aufbauend erzeugen die Daten-Fusion und das Aufgabenmanagement die Sollwerte für den Autopiloten. Die Missionssteuerung aktiviert und deaktiviert einzelne Aufgaben entsprechend des Missionsplanes.

Die vorgestellten Verfahren und Algorithmen wurden mittels eines Versuchsaufbaus sowie in weiten Teilen bei mehreren Seeversuchen mit einem AUV erprobt.

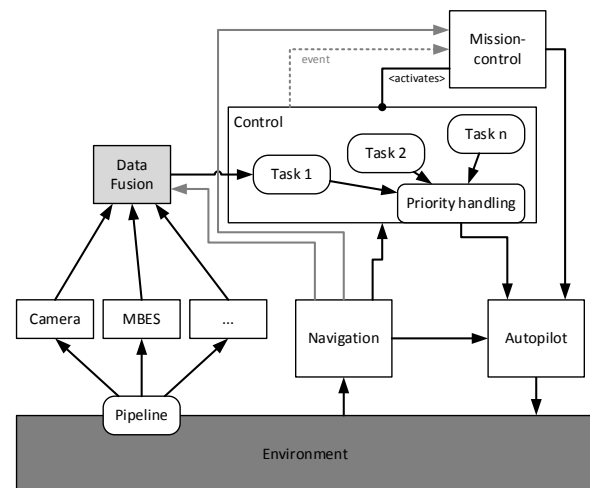


Abbildung 2: Struktur Fahrzeugführung

## Literatur:

- [1] Det Norske Veritas (2009): DNV-RP-F116: Integrity Management of Submarine Pipeline Systems.
- [2] Brooks, Rodney Allen (1986): A robust layered control system for a mobile robot. In: Robotics and Automation, IEEE Journal of 2 (1), S. 14–23.
- [3] Thrun, Sebastian; Burgard, Wolfram; Fox, Dieter (2005): Probabilistic robotics. Cambridge, Mass.: MIT Press (Intelligent robotics and autonomous agents).

# Regelungsorientierte Identifikation affiner Takagi-Sugeno-Fuzzy-Modelle für Regler mit Driftkompensation

Alexander Schrodtt \*

\* Fachgebiet Mess- und Regelungstechnik  
Institute for System Analytics and Control  
Fachbereich Maschinenbau  
Universität Kassel  
Mönchebergstr. 7, 34125 Kassel  
Tel: +49 561 804 2849  
Fax: +49 561 804 2847  
[alexander.schrodtt@mrt.uni-kassel.de](mailto:alexander.schrodtt@mrt.uni-kassel.de)

Andreas Kroll \*\*

\*\* Fachgebiet Mess- und Regelungstechnik  
Institute for System Analytics and Control  
Fachbereich Maschinenbau  
Universität Kassel  
Mönchebergstr. 7, 34125 Kassel  
Tel: +49 561 804 3248  
Fax: +49 561 804 2847  
[andreas.kroll@mrt.uni-kassel.de](mailto:andreas.kroll@mrt.uni-kassel.de)

**Schlüsselwörter:** Takagi-Sugeno-Systeme, Identification for Control, nichtlineare Systemidentifikation

Prädiktions- und Simulationsgüte sind nicht zwangsläufig die relevanten Bewertungskriterien für Modelle, die zur Reglersynthese verwendet werden sollen. Eine regelungsorientierte Modellerstellung aus Messdaten wird mit dem Begriff „Identification for Control“ bezeichnet, wobei die bekannten Methoden für lineare Modelle und Regler entwickelt wurden. Eine nichtlineare Erweiterung ist dabei nicht ohne weiteres möglich. Für die Klasse der lokal affinen Multi-Modelle, wie sie bei Takagi-Sugeno-(TS)-Systemen auftreten, lassen sich jedoch Teile der linearen Theorie approximativ auf nichtlineare Systeme übertragen.

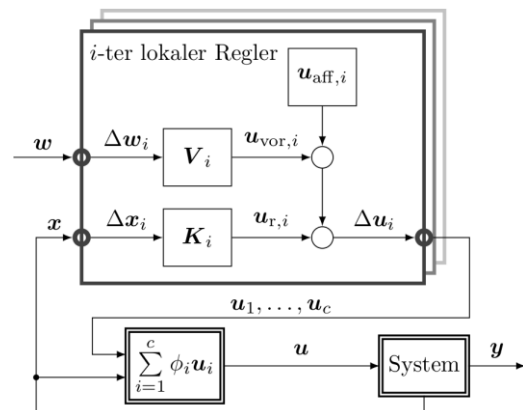


Abbildung 1: Reglerstruktur

In diesem Vortrag wird ein TS-Reglerentwurfverfahren vorgestellt, das die lokalen Driffterme der Teilmodelle, die bei Linearisierungen außerhalb von Ruhelagen entstehen, näherungsweise kompensiert, um einen an der linearen Theorie orientierten lokalen Entwurf mittels PDC (Parallel Distributed Compensator) zu ermöglichen. Des Weiteren wird eine Entwurfsmethodik vorgestellt, welche auf Basis eines in der offenen Wirkungskette erzeugten Initialreglers im geschlossenen Regelkreis iterativ TS-Modelle identifiziert, die jeweils zum Reglerentwurf herangezogen werden. Die Methoden werden in Simulationsfallstudien demonstriert.

## Literatur:

- [1] Albertos, P., Esparza, A. und Sala, A. „Iterative Identification and Control Design: Methodology and Applications“. In: *Identification and Control*. London: Springer London, 2007.
- [2] Johansen, T. A., Hunt, K. J., Gawthrop, P. J. und Fritz, H. „Off-Equilibrium Linearisation and Design of Gain Scheduled Control with Application to Vehicle Speed Control“. In: *Control Engineering Practice* 6 (1998).

# Control of particulate processes

Rostyslav Geyyer \*, Stefan Palis \* und Achim Kienle \*

\* Institut für Automatisierungstechnik  
Otto von Guericke Universität Magdeburg  
Universitätsplatz 2  
39106 Magdeburg  
0391 67 11506  
0391 67 11186  
{stefan.palis, achim.kienle}@ovgu.de

**Schlüsselwörter:** Eigenschaftsverteilte Systeme, Regelung verteiltparametrischer Systeme

Particulate processes, e.g. crystallization or granulation, are of great importance in chemical industry where more than 50% of all products are manufactured as particles. The particle formation is typically modelled using a multiscale approach, e.g. surface formation on a single particle on the micro level, single particle growth on the meso level and the growth of the particle size distribution on the macro level. Due to the fact that control inputs and measurements are mostly operating at the macro scale, from a control point of view the macro scale is the most important. Here, mathematical modelling typically leads to population balance models describing, for example the dynamics of the particle size or moisture distribution. Depending on the specific process these population balance models may be systems of nonlinear partial integro-differential equations. Thus, control design for these types of processes is challenging. In this contribution new results applying modern control approaches [1,2] to selected examples of particulate processes are presented.

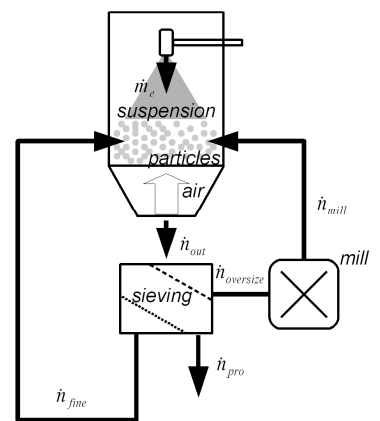


Fig. 1: Granulation

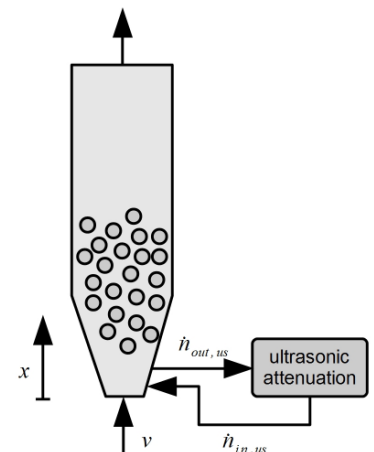


Fig. 2: Crystallization

## Literatur:

- [1] S. Palis & A. Kienle, Discrepancy based control of particulate processes, Journal of Process Control 24, 2014, pp. 33-46
- [2] S. Palis & A. Kienle, Diskrepanzbasierte Regelung der kontinuierlichen Flüssigkristallisation, at - Automatisierungstechnik 60, 2012, pp. 145-154.

# Formale Reglersynthese mittels konvexer Kombinationen

Bastian Schürmann \*

Matthias Althoff \*\*

\* Lehrstuhl für Robotik und Echtzeitsysteme

\*\* Lehrstuhl für Robotik und Echtzeitsysteme

Technische Universität München

Technische Universität München

Boltzmannstr. 3, 85748 Garching

Boltzmannstr. 3, 85748 Garching

089 / 289 18140

089 / 289 18134

089 / 289 18107

089 / 289 18107

[bastian.schuermann@tum.de](mailto:bastian.schuermann@tum.de)

[althoff@in.tum.de](mailto:althoff@in.tum.de)

**Schlüsselwörter:** Nichtlineare Regelung, Robuste Regelung, Interpolationsregelung, Konvexe Kombinationen, Erreichbarkeitsprobleme, Manöverautomaten, Formale Verifikation / Garantien

Neuartige autonome Systeme in menschlichen Umgebungen erfordern formal korrekte Sicherheitsnachweise. Es ist bis heute ungeklärt wie ein derartiger Nachweis bei autonomen Fahrzeugen oder größeren Industrierobotern durchgeführt werden kann. In beiden Fällen kann die Sicherheit nur garantiert werden, wenn man in der Lage ist, alle möglichen Verhaltensweisen der geregelten Systeme vorherzusagen. Nur dann kann man sicher stellen, dass es in keinem Fall zu einer Kollision oder anderweitigen Verletzungen der Spezifikation kommen kann. Erschwert wird diese Aufgabe durch etwaige Störungen, Modellunsicherheiten und der Fortbewegung in unbekanntem Umgebungen. Formale Methoden [1,2] erlauben es, alle möglichen Verhaltensweisen eines Systems vorherzusagen. Da sich die Umgebungsbedingungen für die oben beschriebenen Systeme ständig ändern, ist es jedoch nicht möglich ein geregeltes System für alle möglichen Situationen im Vorherein zu verifizieren.

Eine vielversprechende Möglichkeit zur Lösung dieses Dilemmas stellen Manöverautomaten [3,4] dar. Diese beschreiben, wie man kurze Teiltrajektorien, sogenannte Bewegungsprimitive, zusammen setzen kann, so dass gewisse offline berechneten Eigenschaften auf die Gesamttrajektorie übertragbar sind. Während der online durchgeführten Bahnplanung müssen diese Teilstücke nur noch zusammengesetzt werden. Zur formalen Verifikation können zwei Bewegungsprimitive aneinander gesetzt werden, wenn die erreichbare Menge des ersten Bewegungsprimitives komplett in der Anfangsmenge des zweiten enthalten ist. Um gute, sprich möglichst vollständig verbundene, Manöverautomaten zu erhalten, benötigt man daher Regler, die alle Punkte aus einer gegebenen Anfangsmenge in eine möglichst kleine Endmenge um einen gegebenen Endpunkt steuern. Dies muss nicht nur in einer gegebenen Zeit passieren, sondern es müssen auch Beschränkungen der Eingänge und Zustände eingehalten werden. Dies stellt viele bisherige Ansätze vor Probleme.

Für einzelne Punkte kann dieses Erreichbarkeits-Problem mit herkömmlichen Methoden aus dem Bereich der Optimalsteuerung gelöst werden. In diesem Vortrag stellen wir eine neuartige Methode [5] vor, die die Ergebnisse mittels konvexer Kom-

binationen von endlich vielen, optimalen Eingangstrajektorien auf alle Punkte einer kontinuierlichen Menge erweitert. Durch ein iteratives Anwenden von kurzen Steuerungssignalen, schließen wir den Regelkreis und erzielen somit Robustheit. Eine Kombination mit Methoden der formalen Verifikation erlaubt es uns, diese Ergebnisse auch auf nichtlineare Systeme mit Störungen zu erweitern. Der resultierende Algorithmus ist nicht nur in der Lage, formale Garantien zur Einhaltung der Beschränkungen zu liefern, er ist auch leicht zu verstehen und anzuwenden, weshalb er ein großes Potential in der Praxis besitzt. Durch das offline Lösen aller Optimierungsprobleme, ist der online Rechenaufwand des Reglers sehr gering.

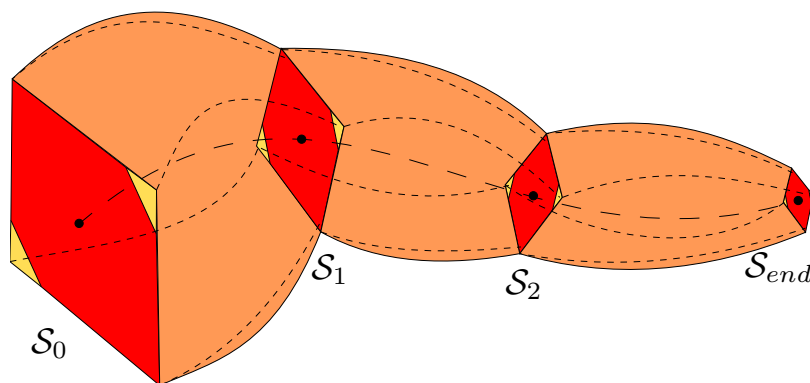


Abbildung 1: Veranschaulichung des neuartigen Algorithmus, der alle Punkte aus einer Anfangsmenge  $S_0$  mittels konvexer Kombinationen der Eingangstrajektorien der Eckpunkte der Mengen  $S_i$  in eine Endmenge  $S_{end}$  überführt.

Der vorgestellte Ansatz erlaubt uns nicht nur gute Lösungen für Bewegungsprimitive zu erhalten, sondern auch Probleme zu lösen, bei denen eine Endmenge von einer Anfangsmenge ausgehend zu einer festen Zeit unter Einhaltung von Beschränkungen erreicht werden muss.

## Literatur:

- [1] M. Althoff und B. H. Krogh. Reachability analysis of nonlinear differential-algebraic systems. In Transactions on Automatic Control, 59(2):371–383, 2014.
- [2] E. Asarin, T. Dang, G. Frehse, A. Girard, C. Le Guernic, und O. Maler. Recent progress in continuous and hybrid reachability analysis. In Proc. of the IEEE Conference on Computer Aided Control Systems Design, Seiten 1582–1587, 2006.
- [3] A. Majumdar und R. Tedrake. Robust online motion planning with regions of finite time invariance. In Algorithmic Foundations of Robotics X, Seiten 543–558. Springer, 2013.
- [4] D. Heß, M. Althoff, und T. Sattel. Formal verification of maneuver automata for parameterized motion primitives. In Proc. of the International Conference on Intelligent Robots and Systems, Seiten 1474–1481, 2014.
- [5] B. Schürmann und M. Althoff. Convex Interpolation Control with Formal Guarantees. *Eingereicht*



# Regelung kooperativer Manipulatoren mit kinematischen Modellunsicherheiten

Sebastian Erhart

Institut für Informationstechnische Regelung  
Technische Universität München  
Barer Straße 21  
Telefon +49 89 289 25735  
Fax +49 89 289 25724  
E-Mail erhart@tum.de

Sandra Hirche

Institut für Informationstechnische Regelung  
Technische Universität München  
Barer Straße 21  
Telefon +49 89 289 25723  
Fax +49 89 289 25724  
E-Mail hirche@tum.de

**Schlüsselwörter:** Kooperative Manipulatoren, Kraft- und Trajektorienregelung, Modellunsicherheiten

Autonome robotische Systeme stellen bereits heute in vielen Branchen wie der Logistik, der industriellen Fertigung, der Agrarwirtschaft, der Medizintechnik oder auch im Baugewerbe eine Schlüsselkomponente für eine effiziente Prozessgestaltung dar. Die Koordination eines heterogenen Teams von Robotern bringt durch die Redundanz und die intrinsische, örtliche Verteilung von Sensorik und Aktuatorik eine gesteigerte Effizienz in der Aufgabenausführung sowie eine höhere Toleranz gegenüber dem Ausfall einzelner Komponenten. Zu den klassischen Anwendungsgebieten von Multi-Roboter-Systemen zählt beispielsweise der gemeinsame Transport von Objekten - auch als kooperative Manipulation bezeichnet. Ein Beispielszenario ist in der folgenden Abbildung dargestellt.



Abbildung 1: Zwei autonome Roboter kooperieren um

Kooperative Manipulationsaufgaben stellen eine besondere Herausforderung dar, da durch das mit den Manipulatoren verbundene Objekt eine kinematische Kopplung der stark nichtlinearen Roboterdynamiken erfolgt. Für die erfolgreiche Durchführung einer Manipulationsaufgabe werden zeitgleich zwei Regelziele verfolgt: zum einen soll das Objekt einer gewünschten Trajektorie folgen, die das Objekt von der Ausgangspose in die Zielpose überführt. Zum anderen sollen die kooperierenden Roboter nur die gewünschten Endeffektorkräfte aufbringen die benötigt werden, um das Objekt entlang der gewünschten Trajektorie zu bewegen. Die Verwendung lokaler Sensorik der einzelnen Roboter führt aufgrund der nur partiell verfügbaren Information und Messunsicherheiten zu Unsicherheiten in der Relativkinematik.

Hierdurch kommt es zu unerwünscht starken Interaktionskräften und Regelfehlern, die zu einer Beschädigung des Objektes und im schlimmsten Fall zu einer Gefährdung des Umfeldes führen können. Die kinematische Koordination eines Multi-Roboter-Teams in Abwesenheit eines globalen Referenzkoordinatensystems ist damit eine der größten Herausforderungen für die effiziente Implementierung von Manipulationsaufgaben außerhalb dedizierter Laborumgebungen.

Der Vortrag gibt zunächst einen Einblick in die systemdynamischen Grundlagen und die Modellierung kooperativer Manipulationsaufgaben und verdeutlicht die zentrale Rolle des kinematischen Modells im Hinblick auf die gewünschte Trajektorien-Regelung und eine Begrenzung der entstehenden Interaktionskräfte. Darauf aufbauend werden analytische Bedingungen abgeleitet, unter denen mit Hilfe der verteilten Sensorik eine Identifikation der relevanten kinematischen Parameter möglich ist. Schließlich wird ein adaptives Regelungskonzept präsentiert, das unter den gegebenen Unsicherheiten des kinematischen Modells das Regelziel der kombinierten Trajektorien- und Kraftregelung erreicht.



# Optimierte Zustandsraumdiskretisierung für den abstraktionsbasierten Reglerentwurf

Gunther Reissig\*

\* Institut für Steuer- und Regelungstechnik  
Universität der Bundeswehr München  
Werner-Heisenberg-Weg 39  
85577 Neubiberg  
Fax: 089-6004-4565  
<http://www.reiszig.de/gunther/>

**Schlüsselwörter:** Abstraktion, Automatisierte Synthese, Djokovic-London Funktional

Beim abstraktionsbasierten Reglerentwurf handelt es sich um einen relativ jungen Ansatz, bei dem die Synthese eines Reglers für eine kontinuierliche Strecke auf die Lösung eines Hilfsproblems für eine rein diskrete Näherung (*Abstraktion*) der Strecke zurückgeführt wird. Das Verfahren bietet einige Vorteile gegenüber klassischen Entwurfsmethoden. So können im Prinzip Regelungsprobleme für eine große Klasse nichtlinearer kontinuierlicher Strecken und für komplexe Regelungsziele vollautomatisch gelöst werden, und die entworfenen Regler garantieren die Einhaltung der jeweiligen Spezifikation, ohne daß es eines nachgelagerten Tuning-, Simulations- oder Verifikationsschrittes bedürfte [1,2]. Der routinemäßigen Anwendung des Verfahrens stehen aber noch ungelöste Probleme entgegen, wie etwa der enorme Aufwand zur Berechnung von Abstraktionen. Im Vortrag werden in [3,4] erzielte Resultate zur Senkung dieses Aufwands vorgestellt. Diese beziehen sich auf die in [2] vorgeschlagene Methode zur Berechnung von Abstraktionen, deren Zustandsräume Überdeckungen der Zustandsräume kontinuierlicher Strecken durch Hyperintervalle sind. Für solche Abstraktionen wird ein Funktional zur Vorhersage der Anzahl der Transitionen in Abhängigkeit der Seitenverhältnisse der Hyperintervalle vorgeschlagen, welches dann unter geeigneten Nebenbedingungen minimiert wird, um zu möglichst einfachen Abstraktionen zu gelangen. Wir charakterisieren die eindeutige Lösbarkeit der entsprechenden Minimierungsaufgabe und zeigen, daß diese sich unter bestimmten Voraussetzungen in ein äquivalentes konvexes Problem mit strikt konvexem Zielfunktional überführen läßt, das mit Hilfe von Standardverfahren numerisch gelöst werden kann. Der Erfolg der Methode wird anhand von Beispielen demonstriert.

## Literatur:

- [1] P. Tabuada: Verification and control of hybrid systems, Springer 2009.
- [2] G. Reissig, A. Weber und M. Rungger: Feedback Refinement Relations for the Synthesis of Symbolic Controllers, IEEE Trans. Autom. Control, Conditionally accepted as Paper, 2015, <http://arxiv.org/abs/1503.03715>
- [3] M. Rungger, A. Weber und G. Reissig: State Space Grids for Low Complexity Abstractions, 54th IEEE Conf. Decision and Control (CDC), Osaka, Japan, 15.-18. Dec 2015, to appear, <https://www.researchgate.net/publication/281686135>
- [4] A. Weber, M. Rungger und G. Reissig: Optimized State Space Grids for Abstractions, 2015, Technical Report.

# Beschleunigte $H_2$ -optimale Modellreduktion für Systeme sehr hoher Ordnung

Alessandro Castagnotto\*

\* Lehrstuhl für Regelungstechnik  
Technische Universität München  
Boltzmannstraße 15, Garching  
Telefon: 089 289 15654  
Fax: 089 289 15653  
E-Mail: [a.castagnotto@tum.de](mailto:a.castagnotto@tum.de)

Boris Lohmann\*\*

\*\* Lehrstuhl für Regelungstechnik  
Technische Universität München  
Boltzmannstraße 15, Garching  
Telefon: 089 289 15662  
Fax: 089 289 15653  
E-Mail: [lohmann@tum.de](mailto:lohmann@tum.de)

**Schlüsselwörter:** Modellordnungsreduktion, Krylow-Unterraummethoden,  $H_2$ -Norm

Die computerbasierte Modellierung dynamischer Systeme führt oft auf eine sehr große Anzahl an systembeschreibenden Zustandsgrößen, zum Beispiel durch die feine örtliche Diskretisierung partieller Differentialgleichungen. Durch die hohe Systemordnung sind Simulationen, Optimierungen und Reglerentwürfe in der Regel numerisch sehr aufwändig, wenn überhaupt möglich. Daher werden reduzierte Modelle benötigt, welche die relevante Dynamik gut approximieren.

Für *lineare zeitinvariante Systeme* gibt es seit den 60er Jahren eine Reihe von etablierten Verfahren wie *modale Reduktion* oder *balanciertes Abschneiden*, welche aufgrund des quadratischen Speicheraufwands nicht direkt auf Systeme höherer Ordnung angewandt werden können, selbst wenn die Systemmatrizen dünnbesetzt sind. Hingegen zeichnen sich *Krylow-Unterraummethoden* durch einen geringen Rechen- und Speicheraufwand insbesondere für sehr hohe Ordnungen ( $>10^5$ ) aus [1]. Allerdings hängt die Reduktionsgüte solcher Verfahren maßgeblich von der Wahl der Reduktionsparameter ab.

Aus diesem Grund wurden in den letzten Jahren Verfahren entwickelt, die *lokal optimale Parameter* im Sinne der  $H_2$ -Norm des Fehlersystems ermitteln [2, 3]. Dabei muss in jedem Schritt das hochdimensionale System reduziert werden, was in Summe zu einem erheblichen Rechenaufwand führen kann. Jüngste Ergebnisse zeigen [4], dass die *lokale Natur* der Krylow-Unterraumverfahren ausgenutzt werden kann, um den Rechenaufwand für die Suche optimaler Parameter deutlich zu reduzieren.

## Literatur:

- [1] Antoulas, A. C.: *Approximation of large-scale dynamical systems*, SIAM, 2005.
- [2] Gugercin, S.; Antoulas, A. C.; Beattie, C. A.:  *$H_2$  model reduction for large-scale linear dynamical systems*, SIAM Journal on Matrix Analysis and Applications, 2008.
- [3] Panzer, H. K. F.: *Model Order Reduction by Krylov Subspace Methods with Global Error Bounds and Automatic Choice of Parameters*, Dissertation, Technische Universität München, 2014.
- [4] Castagnotto, A.; Panzer, H. K. F.; Lohmann, B.: *Modellfunktionen in der  $H_2$ -optimalen Modellreduktion von LZI Systemen im Zustandsraum*, Vortrag beim GMA-Fachausschuss 1.30, September 2015.

# Trajektorienplanung für die dreidimensionale Stokes-Gleichung

Julian Andrej

Thomas Meurer

Lehrstuhl für Regelungstechnik  
Christian-Albrechts-Universität Kiel  
Kaiserstrasse 2, 24143 Kiel  
+49(0)431/880-6275  
+49(0)431/880-6278  
{juan,tm}@tf.uni-kiel.de

**Schlüsselwörter:** Trajektorienplanung, Flachheit, Verteilt-parametrische Systeme, Stokes-Gleichung.

Die Analyse und Optimierung fluiddynamischer Systeme hat aufgrund der Verfügbarkeit effizienter numerischer Werkzeuge und Algorithmen zunehmend an Bedeutung gewonnen. Hierzu wurden verschiedene methodische Konzepte zur aktiven Strömungsbeeinflussung unter Einbezug linearer, nichtlinearer sowie optimaler Regelungsverfahren entwickelt, um den gezielten Übergang von laminarer in turbulente Strömung zu erzielen, das Mischungsverhalten von Fluiden zu verbessern, aktiv den Strömungswiderstand oder die Akustik zu beeinflussen oder den Strömungsabriss zu kontrollieren (siehe, z. B. [1-4] und dortige Referenzen). Der verteilt-parametrische Charakter fluiddynamischer Systeme, der sich der mathematischen Modellierung in der Form partieller Differentialgleichungen widerspiegelt, stellt dabei besondere Herausforderungen an die Systemanalyse und den Regelungsentwurf.

In diesem Beitrag wird die Trajektorienplanungsaufgabe und damit verbunden der Steuerungsentwurf zur Erzielung eines gewünschten nominellen Folgeverhaltens für fluiddynamische Systeme untersucht. Hierzu wird ein Ansatz auf der Basis des „Late-Lumping“ verfolgt, in dem die Entwicklung des Entwurfsverfahrens direkt die verteilt-parametrische Systembeschreibung nutzt und geeignete Approximationsverfahren nur zu eigentlichen Auswertung herangezogen werden.

Ausgangspunkt der methodischen Entwicklungen ist die inkompressible Stokes-Gleichung mit dreidimensionalen, quaderförmigen Definitionsgebiet (für den zweidimensionalen Fall wird auf [5] verwiesen). Die spektralen Eigenschaften des Systemoperators ermöglichen eine konstruktive flachheitsbasierte Lösung der Trajektorienplanungsaufgabe durch die systematische Konstruktion eines flachen Ausgangs zur (differenziellen) Parametrierung des orts-zeitvarianten Systemzustandes und der Eingangsgrößen [6]. Die Konvergenzanalyse der Zustands- und

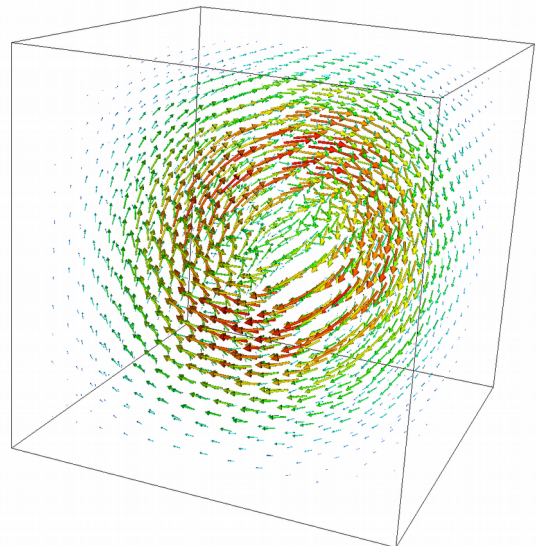


Abbildung 1: Torusförmiges Sollgeschwindigkeitsprofil.

Eingangsparmetrierung kann auf ein Problem der Trajektorienplanung für den flachen Ausgang unter Einbezug glatter Funktionen aus Gevrey-Klassen zurückgeführt werden. Zur Realisierung von Übergängen zwischen stationären Geschwindigkeitsprofilen der Strömung (siehe Abb. 1) in vorgegebenen Zeitintervallen führt dies, abhängig von der Konfiguration der Eingangsgrößen, im Allgemeinen auf divergente Parametrierungen, so dass so genannte Resummationsmethoden in den Ansatz integriert werden müssen. Diese ermöglichen es, auch divergente Reihen auf einen sinnvollen, endlichen Grenzwert zu summieren. Die eigentliche Auswertung der flachheitsbasierten Parametrierungen erfolgt in effizienter Weise unter Einbezug geeigneter numerischer Approximationsverfahren, wobei hierzu das quelloffene Finite Elemente Werkzeug DOLFIN/FeniCS [7] verwendet wurde.

Simulationsergebnisse bestätigen die mit dem vorgeschlagenen Entwurfsansatz erzielbare Regelgüte und illustrieren des Weiteren Möglichkeiten zur approximativen Realisierung allgemeinerer Sollgeschwindigkeitsprofile.

## **Literatur:**

- [1] S. Sritharan, Optimal control of viscous flow, SIAM (Philadelphia), 1998.
- [2] T. Bewley, Flow control: New Challenges for a new Renaissance, Prog. Aerosp. Sci., 37, 21-58, 2000.
- [3] O. Aamo, M. Krstic, Flow Control by Feedback, Springer-Verlag (London), 2003.
- [4] G. Mathew, I. Mezić, S. Grivopoulos, U. Vaidya, L. Petzold, Optimal control of mixing in stokes fluid flows, J. Fluid Mech., 580, 261-281, 2007.
- [5] T. Meurer, M. Saidani, Motion planning for the 2D Stokes equations, Proc. IEEE Conference on Decision and Control Maui, HI (USA), Dec. 10-13, 1572-1577, 2012.
- [6] T. Meurer, Control of Higher-Dimensional PDEs – Flatness and Backstepping Designs, Springer (Berlin), 2013.
- [7] A. Logg, K.-A. Mardal, G. N. Wells et al., Automated Solution of Differential Equations by the Finite Element Method, Springer, 2012.

# Modellierung und modellbasierte Regelung von Kontinuummanipulatoren

Valentin Falkenhahn \*

\* Institut für Systemdynamik  
Universität Stuttgart  
Waldburgstr. 17/19, 70563 Stuttgart  
Tel.: 0711 685 66958  
Fax: 0711 685 66371  
falkenhahn@isys.uni-stuttgart.de

Oliver Sawodny \*\*

\*\* Institut für Systemdynamik  
Universität Stuttgart  
Waldburgstr. 17/19, 70563 Stuttgart  
Tel.: 0711 685 66302  
Fax: 0711 685 66371  
sawodny@isys.uni-stuttgart.de

**Schlüsselwörter:** Robotik, redundante Manipulatoren, Ersatzmodell, Modellinvertierung, Vorsteuerung, Trajektorienplanung

Kontinuummanipulatoren zeichnen sich dadurch aus, dass sie nicht mittels diskreter Gelenke, sondern über eine kontinuierliche Längung und Biegung der Aktuatorstruktur bewegt werden, und somit neuartige Bewegungsprofile erreicht werden können. Ein Beispiel für einen solchen Manipulator ist der Bionische Handling-Assistent<sup>[1]</sup> von Festo, der 2010 mit dem deutschen Zukunftspreis ausgezeichnet wurde (Abb. 1). Dieser ist aufgrund des pneumatischen Aktuierungskonzepts inhärent sicher und daher besonders geeignet für mögliche Mensch-Maschine-Interaktionen. Aufgrund der veränderten kinematischen und dynamischen Eigenschaften können bisher entwickelte Antriebskonzepte aus dem Gebiet der klassischen Robotik allerdings nicht ohne weiteres übertragen werden. Daher sollen neue Methoden entwickelt werden, die klassische Anforderungen wie eine Trajektorien-Folgeregelung oder aktive Schwingungsdämpfung für pneumatisch aktuierte Kontinuummanipulatoren ermöglichen.

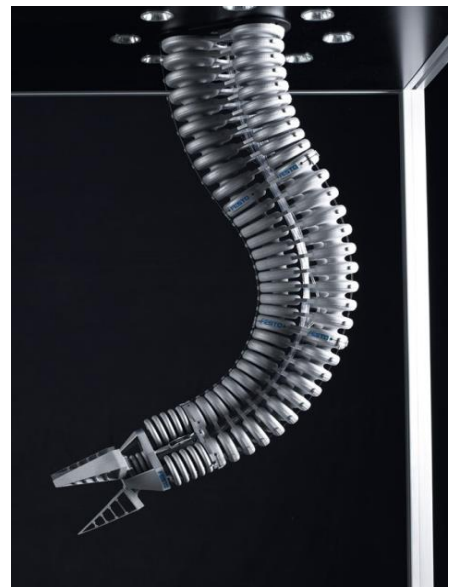


Abb. 1: Der Bionische Handling-Assistent von Festo als Beispiel für kontinuierliche Manipulatoren.

Der Bionische Handling-Assistent besteht aus neun druckgeregelten Bälgen, die parallel zu Sektionen zusammengefasst sind, welche wiederum seriell miteinander verbunden sind. Über Seilzugensoren können die Balglängen gemessen werden. Für einen modellbasierten Reglerentwurf soll ein Ersatzmodell hergeleitet werden, welches insbesondere die mechanischen Verkopplungen sowohl statisch als auch dynamisch hinreichend gut approximieren kann und welches sich über eine Modellinvertierung für einen verkoppelten Vorsteuerungsentwurf eignet.

Kinematiken kontinuierlicher Manipulatoren werden meist unter der Annahme konstanter Krümmungen<sup>[2]</sup> beschrieben, sodass sich die kartesischen Werkzeugkoordinaten sowie die Koordinaten für die Sektionsverbindungen in Abhängigkeit der Aktuatorlängen bestimmen lassen. Während sich die Längsdynamik eines Einzelbalgs gut über einen Aktuator beschreiben lässt, der gegen ein Feder-Masse-Dämpfer-Modell arbeitet, müssen bei der Erweiterung auf ein Sektions- oder Manipulatormodell (Abb. 2) auch die Ableitungen der Kinematik berücksichtigt werden. So

kann eine verkoppelte Bewegungsgleichung<sup>[3,4]</sup> für die neun Balgaktuatoren hergeleitet werden, die eine zeitvariante aber stets reguläre Massenmatrix enthält.

Auf Basis dieses Ersatzmodells konnte erstmals eine dynamische Trajektorien-Folgeregelung für einen kontinuierlichen Manipulator mittels Modellinvertierung entwickelt werden, so dass nun auch dynamische Wechselwirkungen zwischen den Aktuatoren berücksichtigt werden können. Das gute Folgeverhalten wird dabei durch einen hohen Vorsteueranteil<sup>[5]</sup> bei gleichzeitiger geringer Kreisverstärkung erreicht, wodurch nun auch eine deutlich verbesserte Schwingungsdämpfung nach plötzlichem Kontaktverlust durch z.B. Menschen erzielt werden kann.

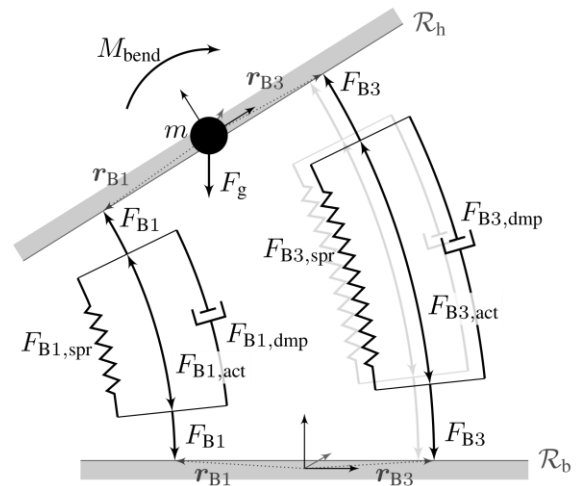


Abb. 2: Mechanisches Ersatzmodell für drei parallele Bälge einer Sektion, bestehend aus Feder-Masse-Aktuatorelementen, die gegen eine konzentrierte Sektionsmasse wirken.

Während redundante Kinematiken die Trajektorienplanung oft erschweren, kann die Redundanz bei begrenzter Aktuatordynamik gezielt dazu genutzt werden, um für z.B. zeitoptimale Aufgaben des Werkzeugpunktes die Lasten der einzelnen Aktuatoren gleichmäßiger zu verteilen und somit kürzere Transitionszeiten zu erreichen<sup>[6]</sup>.

## Literatur:

- [1] A. Grzesiak, R. Becker, und A. Verl: The Bionic Handling Assistant: a success story of additive manufacturing. *Assembly Automation*, 31(4): 329–333, 2011.
- [2] R. Webster und B. Jones: Design and kinematic modeling of constant curvature continuum robots: A review. *The International Journal of Robotics Research*: 29(13), 1661–1683, 2010.
- [3] V. Falkenhahn, T. Mahl, A. Hildebrandt, R. Neumann, und O. Sawodny: Dynamic modeling of constant curvature continuum robots using the Euler-Lagrange formalism. *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*: 2428–2433, 2014.
- [4] V. Falkenhahn, T. Mahl, A. Hildebrandt, R. Neumann und O. Sawodny: Dynamic modeling of bellows-actuated continuum robots using the Euler-Lagrange formalism. *IEEE Transactions on Robotics*: zur Veröffentlichung angenommen, DOI 10.1109/TRO.2015.2496826.
- [5] V. Falkenhahn, A. Hildebrandt, R. Neumann, und O. Sawodny: Model-based feed-forward position control of constant curvature continuum robots using feedback linearization. *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*: 762–767, 2015.
- [6] V. Falkenhahn, A. Hildebrandt, und O. Sawodny: Trajectory optimization of pneumatically actuated, redundant continuum manipulators. *American Control Conference (ACC)*: 4008–4013, 2014.

# Über eine nicht probabilistische Beschreibung von Paketverlusten für digital vernetzte Systeme

Dr.-Ing. Rainer Blind \*

Prof. Dr.-Ing. Frank Allgöwer \*\*

\* Institut für Systemtheorie und Regelungstechnik  
Universität Stuttgart  
Pfaffenwaldring 9, 70550 Stuttgart  
Tel.: 0711 685 677 51  
rainer.blind@ist.uni-stuttgart.de

\*\* Institut für Systemtheorie und Regelungstechnik  
Universität Stuttgart  
Pfaffenwaldring 9, 70550 Stuttgart  
Tel.: 0711 685 677 33  
frank.allgower@ist.uni-stuttgart.de

**Schlüsselwörter:** Digital Vernetzte Regelung,

In diesem Vortrag wird das Problem der Regelung einer instabilen Strecke, bei der aufgrund von Fehlern, wie z.B. Paketverlusten oder Scheduling Konflikten, der Regelkreis nicht zuverlässig geschlossen werden kann, neu betrachtet. Basierend auf einem stochastischen Modell des Fehlerprozesses wurde dieses Problem in letzter Zeit sehr ausführlich untersucht. Dieser Ansatz erlaubt jedoch nur stochastische Aussagen bezüglich Stabilität wie z.B. die Konvergenz des zweiten Moments oder fast sichere Stabilität. Eine Aussage im klassischen Sinne von Lyapunov ist hierbei leider nicht möglich.

Im Gegensatz zu diesen Arbeiten schlagen wir eine nicht stochastische Modellierung des Fehlerprozesses vor, die auf der Definition von 'weakly hard real-time' basiert. Dadurch wird es möglich, Stabilitätsbedingungen herzuleiten, mit denen die Stabilität des geschlossenen Kreises im klassischen Sinne von Lyapunov gezeigt werden kann.

## Literatur:

[1] R. Blind and F. Allgöwer. Towards Networked Control Systems with Guaranteed Stability: Using Weakly Hard Real-Time Constraints to Model the Loss Process. In *Proceedings of the Conference on Decision and Control (CDC)*, 2015



# Numerisch robuste Modellierung von Reib- und Kontaktprozessen in mechanischen Systemen

Thomas Specker

Michael Buchholz

Klaus Dietmayer

Robert Bosch GmbH  
Control Theory (CR/AEH3)  
Renningen, 70465 Stuttgart  
Telefon +49 (711) 811-35244

thomas.specker@de.bosch.com

Institut für Mess-, Regel- und Mikrotechnik  
Universität Ulm

Albert-Einstein-Allee 41, 89081 Ulm

Telefon +49 (731) 50-26334  
Fax +49 (731) 50-12-26334

michael.buchholz@uni-ulm.de

Telefon +49 (731) 50-26300  
Fax +49 (731) 50-26301

klaus.dietmayer@uni-ulm.de

**Schlüsselwörter:** Reibung, Kontaktszenarien, Simulation, Lagrange-Formalismus

Reibung kann unter Vernachlässigung stochastischer Effekte nach [1] in drei statische und zwei dynamische Eigenschaften aufgeteilt werden. Die statischen Teilmodelle beschreiben dabei Coulomb-, Stribeck- und viskose Reibung, die dynamischen Teilmodelle bilden Hysterese und das sogenannte Reibkraftgedächtnis nach. Klassische Modelle, die diese fünf Effekte beinhalten, wie beispielsweise Erweiterungen des ursprünglichen Dahl-Modells aus [2] und dessen Erweiterungen oder das LuGre-Modell [3,4], sind jedoch auf komplexere Systeme mit mehreren Reibungspunkten aufgrund ihrer relativ aufwändigen Handhabung nur schwer anzuwenden. Außerdem beinhalten sie mit der Signumfunktion zumindest eine nicht differenzierbare Funktion, die den Einsatz des Modells bei Simulationen oder im Rahmen von Beobachtern mit numerischer Integration erheblich erschwert oder gar unmöglich macht.

Auch mechanische Kontaktprozesse (siehe z.B. [5,6]) stellen eine Schwierigkeit in der klassischen Modellbildung dar, da durch jede zusätzliche Beschränkung auch ein Freiheitsgrad entfällt. Bisher werden (unilaterale) Kontakte größtenteils auf Basis der Impulserhaltung (nach Newton oder Poisson) beschrieben, oder, bei anhaltenden Kontakten, mittels einer Hertzschen Feder repräsentiert. Für beide Gruppen existieren dabei Erweiterungen, die eine Berücksichtigung der Energiedissipation während des Kontakts ermöglichen. Die Ansätze auf Basis der Impulserhaltung schließen jedoch die Beschreibung statischer Kontakte aus und können außerdem bei der Modellierung von Mehrkörpersystemen aufgrund der Unstetigkeit schnell zu numerischen Problemen führen. Bei Ansätzen mit kontinuierlichem Kraftverlauf muss hingegen für jeden Kontakt eine Strukturumschaltung modelliert werden, was bei komplexeren Systemen aufgrund der kombinatorischen Explosion zu Schwierigkeiten oder hohen Aufwänden führt.

In diesem Vortrag wird für jede der beiden vorgenannten Problemstellungen ein neuer, approximativer Modellierungsansatz für das dynamische Kontaktverhalten vorgestellt. Beide Ansätze basieren dabei auf stetig differenzierbaren Funktionen (vgl. [7,8]), die jeweils durch nur wenige, physikalisch interpretierbare Parameter auf die im System vorherrschenden Bedingungen angepasst werden können. Die Parametrierung der Funktionen wird dabei in Abhängigkeit der Anforderungen an die Modelleigenschaften vorgenommen. Für sehr kleine Abtastzeiten bilden die Funktionen die realen Vorgänge nahezu exakt nach, bei größeren Abtastzeiten wird hingegen zugunsten der numerischen Robustheit die Modellierungsgenauigkeit reduziert, was dann beispielsweise den Einsatz in Beobachtern erlaubt.

Die Beschreibung von Kontakt und Reibung erfolgt dabei in beiden Fällen in Form von Leistungsfunktionen, die auch in Abhängigkeit von verallgemeinerten



Koordinaten geschrieben werden können. Diese neuen Ansätze sind daher, analog zur bekannten Dissipationsfunktion, direkt im Lagrange-Formalismus einsetzbar und erlauben so eine einfache Handhabung auch bei komplexen Systemen. Dadurch wird auch der Anstieg der zusätzlich benötigten Differenzialgleichungen auf die Anzahl der Freiheitsgrade des Systems beschränkt. Neben den einzelnen Anwendungen erlaubt die Kombination dieser Ansätze die numerisch robuste Beschreibung von reibungsbehafteten Kontaktprozessen in komplexen Systemen [9], was als eine der größten Herausforderungen bei der mechanischen Modellbildung gilt.

Beide Modellansätze wurden erfolgreich für den Gangrehabilitationstrainer MoreGait II umgesetzt [10,11], bei dem dominante Reibeffekte sowie mechanischen Beschränkungen zum Schutz des Patienten vorhanden sind. Dabei konnte eine deutliche Verbesserung bei der Zustandsschätzung erzielt und die modellbasierte Schätzung relevanter patientenspezifischer Parameter überhaupt erst ermöglicht werden.

## Literatur:

- [1] Wojewoda, J.; Stefanski, A.; Wiercigroch, M. und Kapitaniak, T.: *Hysteretic effects of dry friction: modelling and experimental studies*. In: *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, Band 366, Seiten 747–765, 2008..
- [2] Dahl, P.: *A solid friction model*. Techn. Ber. TOR-0158(3107-18). The Aerospace Corporation, El Segundo, CA, 1968.
- [3] Canudas de Wit, C.; Olsson, H.; Åström, K. J. und Lischinsky, P.: *A New Model for Control of Systems with Friction*. In: *IEEE Transactions on Automatic Control*, Band 40, Seiten 419–425, 1995.
- [4] Olsson, H.: *Control Systems with Friction*. Dissertation, Department of Automatic Control, Lund Institute of Technology, Lund, Sweden, 1996.
- [5] Stronge, W. J.: *Impact Mechanics*. Cambridge University Press, Cambridge, 2004.
- [6] Goldsmith, W.: *Impact - The Theory and Physical Behaviour of Colliding Solids*. Dover Publications, Inc., Mineola, 2001.
- [7] Specker, T.; Buchholz, M. und Dietmayer, K.: *A New Approach of Dynamic Friction Modelling for Simulation and Observation*. In: *Proceedings of the 19th IFAC World Congress*, Seiten 4523–4528, 2014.
- [8] Specker, T.; Buchholz, M. und Dietmayer, K.: *Modelling of unilateral constraints using power-based restriction functions within Lagrangian mechanics*. In: *Mathematical and Computer Modelling of Dynamical Systems*, Band 21, Nr.6, Seiten 509–534, 2015.
- [9] Specker, T.; Buchholz, M. und Dietmayer, K.: *Dynamical Modeling of Constraints with Friction in Mechanical Systems*. In: *Proceedings of the 8th Vienna International Conference on Mathematical Modelling*, Seiten 514–519, 2015.
- [10] Specker, T.; Buchholz, M. und Dietmayer, K.: *Modellierung eines Trainingsgeräts zur Gangrehabilitation*. In: Sawodny, O. und Adamy, J. (Herausgeber): *Tagungsband GMA-Fachausschuss 1.30*, Seiten 122–130. VDI/VDE-GMA, Technische Universität Darmstadt, 2013.
- [11] Specker, T.; Buchholz, M. und Dietmayer, K.: *Combined State and Parameter Estimation for Adaptive Control and Feedback Applications for a Gait Rehabilitation Robot*. In: *Proceedings of the IEEE Multi-conference on Systems and Control*, Seiten 1287–1293, 2014.

# Zeitoptimale flachheitsbasierte Regelung eines Brückenkrans

Bernd Kolar, Hubert Rams, Kurt Schlacher

Institut für Regelungstechnik und Prozessautomatisierung  
Johannes Kepler Universität Linz  
Altenberger Straße 69, A-4040 Linz  
Tel.: +43 732 2468 6320  
Fax: +43 732 2468 6322  
E-Mail: {bernd.kolar,hubert.rams,kurt.schlacher}@jku.at

**Schlüsselwörter:** Flachheit, Nichtlineare Regelung, Quasistatische Zustandsrückführung, Zeitoptimale Regelung

Im Vortrag wird der Entwurf einer flachheitsbasierten Trajektorienfolgeregelung für das Labormodell Brückenkran diskutiert, wobei die Last unter Einhaltung von Zustands- und Stellgrößenbeschränkungen zeitoptimal von einer Ausgangsposition in eine vorgegebene Endposition überzuführen ist. Im Rahmen der gängigen Annahmen kann der Brückenkran als Starrkörpersystem modelliert werden, wobei man ein nichtlineares flaches System, welches nicht eingangs-zustandslinearisierbar ist, erhält. Der flachheitsbasierte Ansatz passt ideal zur Aufgabe, da die Position der Last einen flachen Ausgang darstellt.

Für den Entwurf einer flachheitsbasierten Folgeregelung gibt es nun verschiedene Zugänge, die sich unter anderem in den benötigten Messgrößen unterscheiden. Beim Labormodell des Brückenkrans können die generalisierten Koordinaten (Position der Laufkatze, Seillänge und Pendelwinkel) gemessen werden, und wegen der guten Qualität der Messsignale erhält man durch numerisches Differenzieren eine so gute Schätzung der generalisierten Geschwindigkeiten und folglich des Zustands, dass man auf einen Trajektorienfolgebeobachter verzichten kann. Für den Fall dass der Zustand eines flachen Systems bekannt ist, kann z.B. der in [1] diskutierte Zugang, der auf einer geeigneten endogenen dynamischen Erweiterung des Systems basiert, direkt angewandt werden. Dieser hat jedoch den Nachteil, dass er zu einem dynamischen Regelgesetz führt. Aus diesem Grund empfiehlt es sich, die flachheitsbasierte Folgeregelung stattdessen entsprechend der in [2] vorgestellten Methode, die auf einer quasistatischen Zustandsrückführung basiert und zu einem statischen Regelgesetz führt, zu entwerfen. Allerdings setzt dieser Entwurf die Kenntnis von Ableitungen des flachen Ausgangs bis zu einer gewissen Ordnung voraus, und im Falle des Krans ist es nicht möglich, diese Ableitungen direkt aus dem bekannten Zustand zu berechnen. Unter gewissen Voraussetzungen ist es aber möglich, das Entwurfsverfahren [2] systematisch so zu modifizieren, dass man nur den Zustand benötigt. Im Vortrag wird die Vorgangsweise zunächst allgemein diskutiert, und dann auf den Brückenkran angewandt.

Die Planung der zeitoptimalen Trajektorien basiert auf einer Diskretisierung der Integratorketten, die dem flachen Ausgang zuordenbar sind. Transformiert man die so gewonnenen zeitdiskreten Systeme auf Brunovsky-Normalform, dann gewinnt man eine besonders kompakte Darstellung des numerischen Optimierungsproblems. Letzteres wird mit Standardalgorithmen der nichtlinearen Optimierung gelöst. Abschließend wird die Leistungsfähigkeit des vorgestellten Entwurfs anhand von Messergebnissen illustriert.

## Literatur:

- [1] M. Fliess, J. Lévine, P. Martin, P. Rouchon: A Lie-Bäcklund Approach to Equivalence and Flatness of Nonlinear Systems, IEEE Trans. Automat. Contr., 44, S. 922-937, 1999.
- [2] E. Delaleau, J. Rudolph: Control of flat systems by quasi-static feedback of generalized states, Int. J. Control, 71, S. 745-765, 1998.
- [3] B. Kolar, K. Schlacher: Flatness based Control of a Gantry Crane, Proceedings 9th IFAC Symposium on Nonlinear Control Systems, S. 487-492, 2013.