

15. – 17. Februar 2017

# Programm

*Kurzfassungen zum Download unter:*

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

## Mittwoch, 15. Februar 2017

nachmittags **Anreise**

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

## Donnerstag, 16. Februar 2017

**08:15 – 08:30** **Eröffnung und Begrüßung** (Stadthalle, Haupttagungsraum im EG)  
*Prof. Jörg Raisch (Technische Universität Berlin)*

	Haupttagungsraum im EG	Tagungsraum im 3. OG
<b>08:30 – 10:00</b>	<b>Sliding Mode Verfahren und Anwendungen</b> Sitzungsleitung: Prof. Johann Reger	<b>Verteilte Automatisierungssysteme</b> Sitzungsleitung: Prof. Birgit Vogel-Heuser
08:30 – 09:00	Diskretisierungseffekte in Sliding-Mode Systemen höherer Ordnung <i>Stefan Koch (Institut für Regelungs- und Automatisierungstechnik, Technische Universität Graz, Prof. Dr. techn. Martin Horn, Gr. 7)</i>	Vereinheitlichte Analyse verteilter Automatisierungssysteme auf Basis eines formalisierten Begriffssystems zur Wissensrepräsentation, Modellbeschreibung und Ergebnispräsentation <i>Dr. Patrick Diekhake (Inst. für Verkehrssicherheit und Automatisierungstechnik, Technische Universität Braunschweig, Dr. Uwe Becker, Gr. 4)</i>
09:00 – 09:30	Sliding-Mode-Regler zur Kraft- und Positionsregelung eines FGL-Aktors <i>Arathi Pai (Heinz Nixdorf Institut, Regelungstechnik und Mechatronik, Universität Paderborn, Prof. Dr.-Ing. Ansgar Trächtler, Gr. 23)</i>	Modellierung und Simulation eines automatischen Koexistenzmanagements <i>Darina Schulze (Institut für Automation und Kommunikation e.V., Prof. Dr.-Ing. Ulrich Jumar, Gr. 20)</i>
09:30 – 10:00	Modellierung und adaptive Sliding-Mode Regelung eines hydraulischen Druckbegrenzungsventils <i>Christoph Krimpmann (Lehrstuhl für Regelungssystemtechnik, Technische Universität Dortmund, Prof. Dr.-Ing. Prof. h.c. Torsten Bertram, Gr. 8)</i>	Verifikation von verteilten Automatisierungssystemen auf Basis einer Modellkomposition <i>Andreas Zeller (Institut für Automatisierungstechnik und Softwaresysteme, Universität Stuttgart, Prof. Dr.-Ing. Michael Weyrich, Gr. 27)</i>

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

15. – 17. Februar 2017

<b>10:30 – 12:00 Modellprädiktive Regelung</b> Sitzungsleitung: Prof. Knut Graichen		<b>Automatisierungssysteme</b> Sitzungsleitung: Prof. Ulrich Jumar
10:30 – 11:00	Regionale prädiktive Regelung – MPC als Abtastung eines stückweise definierten Riccati-Reglers <i>Kai König (Lehrstuhl für Regelungstechnik und Systemtheorie, Ruhr-Universität Bochum, Prof. Dr.-Ing. Martin Mönnigmann, Gr. 3)</i>	Die richtigen Systemtests zuerst – Regressions-testen in der Produktionsautomatisierung <i>Sebastian Ulewicz (Lehrstuhl für Automatisierung und Informationssysteme, Technische Universität München, Prof. Dr.-Ing. Birgit Vogel-Heuser, Gr. 21)</i>
11:00 – 11:30	Berücksichtigung von Störungen in der ökonomisch prädiktiven Regelung <i>Florian Bayer (Institut für Systemtheorie und Regelungstechnik, Universität Stuttgart, Prof. Dr.-Ing. Frank Allgöwer, Gr. 27)</i>	Dynamisches Redeployment in Automatisierungsnetzen <i>Haitham Elfahadm (Lehrstuhl für Prozessleit-technik, RWTH Aachen, Prof. Dr.-Ing. Ulrich Epple, Gr. 1)</i>
11:30 – 12:00	Robuste modellprädiktive Regelung für sprungfähige Markow-Systeme <i>Jens Tonne (Fachgebiet Regelungs- und Systemtheorie, Universität Kassel, Prof. Dr.-Ing. Olaf Stursberg, Gr. 19)</i>	Automatisierte Bestimmung von Eigenschaften evolvierender Fertigungsanlagen <i>Jan Ladiges (Institut für Automatisierungstechnik, Helmut-Schmidt-Universität, Hamburg, Prof. Dr.-Ing. Alexander Fay, Gr. 13)</i>

**12:00 - 14:30 Mittagessen** im Rheinhotel Bellevue / Pause

<b>14:30 – 16:00 Mechatronische Systeme</b> Sitzungsleitung: Prof. Harald Aschemann		<b>Bildverarbeitung/Optische Systeme</b> Sitzungsleitung: Prof. Klaus Dietmayer
14:30 – 15:00	Mechatronisches Design und Regelung eines 2D Kippspiegelsystems <i>Ernst Csencsics (Institut Automatisierungs- und Regelungstechnik, Technische Universität Wien, Prof. Dr.sc.techn. Georg Schitter, Gr. 29)</i>	Plenoptische Bildaufnahme und -Auswertung zur automatischen Sichtprüfung transparenter Objekte <i>Johannes Meyer (Fraunhofer-Institut für Optronik, Systemtechnik und Bildauswertung IOSB, Karlsruhe, Prof. Dr. Jürgen Beyerer, Gr. 18)</i>
15:00 – 15:30	Robust Control of a Hydraulic Cylinder using Observer-based Nonlinear Controllers: Theoretical Development and Experimental Validation <i>Fateme Bakhshande (Lehrstuhl Steuerung, Regelung und Systemdynamik, Universität Duisburg-Essen, Prof. Dr.-Ing. Dirk Söffker, Gr. 11)</i>	Registrierung stabiler Merkmale zur Regularisierung des optischen Flusses bei der erscheinungsbasierten Schätzung der 3D-Kopfpose <i>Sebastian Vater (Institut für Industrielle Informationstechnik, Karlsruher Institut für Technologie KIT, Prof. Dr.-Ing. Fernando Puente León, Gr. 30)</i>
15:30 – 16:00	Vorausschauende Störgrößen-aufschaltung für die Schwingungs-dämpfung am Viertelfahrzeug <i>Johannes Strohm (Lehrstuhl für Regelungstechnik, Technische Universität München, Prof. Dr.-Ing. habil. Boris Lohmann, Gr. 22)</i>	Regelung nicht-resonanter Mikrospiegel mit elektrostatischem Kammantrieb <i>Richard Schroedter (Institut für Automatisierungstechnik, Technische Universität Dresden, Prof. Dr. techn. Klaus Janschek Gr. 9)</i>

**16:00 - 16:30 Kaffee-/Teepause** im Foyer der Stadthalle

15. – 17. Februar 2017

**16:30 – 17:30 Plenarvortrag** im Haupttagungsraum EG  
 Cars and Smarter Cities: New Services, New Applications for Control  
*Prof. Robert Shorten (University College Dublin)*

**Vergabe der at-Preise**

Auszeichnung herausragender Beiträge der Zeitschrift at-Automatisierungstechnik durch den Herausgeber

**18:30 Abendessen** im Rheinhotel Bellevue

**Freitag, 17. Februar 2017**

<b>Haupttagungsraum im EG</b>		<b>Tagungsraum im 3. OG</b>
<b>08:30 – 10:00</b>	<b>Energiesysteme</b>  Sitzungsleitung: Prof. Veit Hagenmeyer	<b>Ereignisdiskrete und fehlertolerante Systeme</b>  Sitzungsleitung: Prof. Stefan Kowalewski
08:30 – 09:00	Modellreduktion und Reglerentwurf für einen thermischen Festbetspeicher <i>Lorenz Pyta (Institut für Regelungstechnik, RWTH Aachen, Prof. Dr.-Ing. Dirk Abel, Gr. 1)</i>	Regler- und Beobachterentwurf für boolesche Netzwerke <i>Thomas Leifeld (Lehrstuhl für Automatisierungstechnik, Technische Universität Kaiserslautern, Prof. Ping Zhang, Gr. 16)</i>
09:00 – 09:30	Einsatz der „Modellbasierten prädiktiven Regelung“ für ein hybrides Energiesystem als Bestandteil eines virtuellen Kraftwerks <i>Ibrahim Skaff (Institut für Automatisierungstechnik, TU Bergakademie Freiberg, Prof. Dr.-Ing. Andreas Rehkopf, Gr. 10)</i>	A Characterisation of Consistency for Abstraction-Based Control of Sequential Behaviours <i>Xiaoying Bai (Lehrstuhl für Regelungstechnik, Universität Erlangen-Nürnberg, Prof. Dr.-Ing. Thomas Moor, Gr. 12)</i>
09:30 – 10:00	Aktive Schwingungsdämpfung einer Windkraftanlage mit hydrostatischem Getriebe und permanenterregtem Synchrongenerator <i>Julia Kersten (Lehrstuhl für Mechatronik, Universität Rostock, Prof. Dr.-Ing. Harald Aschemann, Gr. 24)</i>	Von der Analyse zur fehlertoleranten Regelung am Beispiel von Multikoptern <i>Daniel Vey (Lehrstuhl für Automatisierungstechnik und Prozessinformatik, Ruhr-Universität Bochum, Prof. Dr.-Ing. Jan Lunze, Gr. 3)</i>

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

15. – 17. Februar 2017

10:30 – 12:00	<b>Optimierungsbasierte Verfahren</b> Sitzungsleitung: Prof. Martin Mönnigmann	<b>Kooperative und autonome Systeme</b> Sitzungsleitung: Prof. Jan Lunze
10:30 – 11:00	Lineare optimale Regelung und Schätzung mittels Message Passing auf Faktorgraphen <i>Dr.-Ing. Christian Hoffmann (Institute for Electrical Engineering in Medicine, Universität zu Lübeck, Prof. Dr. Philipp Rostalski, Gr. 25)</i>	Learning robot manipulation tasks from human demonstrations <i>Maria Kyrarini, (Institut für Automatisierungstechnik, Universität Bremen, Prof. Dr.-Ing. Axel Gräser, Gr. 5)</i>
11:00 – 11:30	Ganzzahlige iterativ lernende Regelung zur Treibstoffschichtung <i>Jan-Simon Schäpel (Fachgebiet Mess- und Regelungstechnik, Technische Universität Berlin, Prof. Dr.-Ing. Rudibert King, Gr. 2)</i>	Regelung für sichere Mensch-Roboter-Interaktion <i>Melanie Kimmel (Lehrstuhl für Informationstechnische Regelung, Technische Universität München, Prof. Dr.-Ing. Sandra Hirche, Gr. 21)</i>
11:30 – 12:00	Nichtlineare modellprädiktive Regelung eines Großdieselmotors mit Emissionszielen <i>Karsten Harder (Institut für Mess-, Regel- und Mikrotechnik, Universität Ulm, Prof. Dr.-Ing. Knut Graichen, Gr. 28)</i>	Verbesserter Ansatz des kombinierten Mehrfachschießverfahrens mit Kollokation zur dynamischen Optimierung und Anwendung auf autonomes Fahren <i>Evgeny Lazutkin (Fachgebiet Simulation und Optimale Prozesse, Technische Universität Ilmenau, Prof. Dr.-Ing. habil. Pu Li, Gr. 15)</i>

**12:00 – 12:45 Abschluss** im Haupttagungsraum EG

**Preisverleihung** durch Dr. Schwarzmann (IAV)

**Aufruf für Boppard 2018**

**12:45 – 13:45 Mittagessen** im Rheinhotel Bellevue

**13:45 Ende des Kolloquiums**



# Diskretisierungseffekte in Sliding-Mode Systemen höherer Ordnung

Stefan Koch

Technische Universität Graz  
Inst. für Regelungs- und Automatisierungstechnik  
Inffeldgasse 21/B, A-8010 Graz

**Schlüsselwörter:** Sliding-Mode Regelung, Nichtlinearer Abtast-Regelkreis, Grenzzyklen

Sliding-Mode basierte Regelkreise zeichnen sich durch eine Vielzahl günstiger Eigenschaften aus z.B. Robustheit gegenüber externen Störungen und Parameterunsicherheiten sowie eine hervorragende Regelgüte hinsichtlich der erreichbaren Präzision. Bei klassischen Sliding-Mode Regelgesetzen ("Sliding-Mode erster Ordnung") für SISO-Systeme wird für den Entwurf eine sogenannte Gleitvariable, d.h. ein Systemausgang mit relativem Grad  $\rho = 1$  spezifiziert. Sobald dieser zu null geregelt ist, besitzt der Regelkreis eine gewünschte Dynamik. Die Stabilisierung des Ausgangs wird durch einen un stetigen Anteil im Stellsignal in endlicher Zeit gewährleistet. Dieser un stetige Anteil führt jedoch in realen Anwendungen oft zu unerwünschten Nebeneffekten. Durch Anwendung von Sliding-Mode Reglern höherer Ordnung können diese inhärenten Nachteile in vielen Fällen wesentlich entschärft werden. Bei diesen Konzepten wird der un stetige Anteil in die höheren Ableitungen der Gleitvariable verlagert. Um jedoch eine Stabilisierung in endlicher Zeit zu gewährleisten, muss das gewählte Regelgesetz bestimmte Voraussetzungen erfüllen. Ist dies nicht der Fall, z.B. aufgrund idealisierter Annahmen bei der Modellbildung, beobachtet man im Allgemeinen Grenzzyklen, die häufig mit "Chattering" bezeichnet werden. Die zeitdiskrete Reglerimplementierung und die damit verbundene Begrenzung der Schaltfrequenz des un stetigen Anteils im Regelgesetz ist eine typische Ursache für das Chattering. Abbildung 1 zeigt einen Grenzzyklus in einem geschlossenen Regelkreis zweiter Ordnung, verursacht durch die zeitdiskrete Realisierung des Sliding-Mode Reglers.

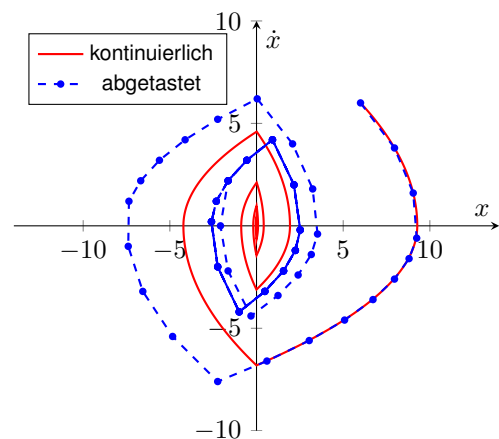


Abbildung 1: Grenzzyklus in einem abgetasteten Sliding-Mode basierten Regelkreis.

Der Umstand, dass Regelalgorithmen heutzutage vorwiegend digital realisiert werden, sowie Vereinfachungen im Entwurfsmodell machen das Chattering Phänomen in realen Anwendungen unvermeidbar. Die Analyse von Grenzzyklen, die aufgrund der zeitdiskreten Realisierung des Regelgesetzes entstehen ist Thema zahlreicher Publikationen siehe beispielsweise [1, 2, 3]. Jedoch wird in diesen Aufsätzen meist der un gestörte geschlossene Regelkreis diskretisiert und danach analysiert. Es zeigt sich aber, dass die exakte Berechnung von Grenzzyklen in diskreten Sliding-Mode Systemen höherer Ordnung sehr aufwendig ist.

Dieser Vortrag diskutiert alternative Methoden zur Charakterisierung von Grenzzyklen in

Sliding-Mode Abtast-Systemen. Dabei wird vorwiegend auf klassische Frequenzbereichsmethoden wie die Methode der harmonischen Balance und deren Erweiterung auf den nichtlinearen Abtastregelkreis zurückgegriffen, siehe [4, 5, 6]. Die Methode der harmonischen Balance stellt allerdings nur ein Näherungsverfahren dar. Eine alternative Theorie zur exakten Bestimmung von Grenzzyklen ist die sogenannte LPRS-Methode (Locus of Perturbed Relay System). Diese Methode erlaubt nicht nur die Charakterisierung von Grenzzyklen, sondern auch die Analyse des Eingangs-Ausgangsverhaltens [7, 8]. Zusätzlich ermöglichen die diskutierten Methoden den geradlinigen Entwurf von Korrekturgliedern zur Abschwächung unerwünschter Auswirkungen des Chattering Effekts. Die diskutierten Methoden werden anhand von Simulationsbeispielen und einfachen praktischen Anwendungen gezeigt.

## Literatur

- [1] ZBIGNIEW, G. and XINGHUO, Y.: *Euler's Discretization of Single Input Sliding-Mode Control Systems*. IEEE Trans. on Automatic Control, 52 (9), 1726-1730, 2007.
- [2] YAN, Y., ZBIGNIEW, G., XINGHUO, Y. and CHANGYIN, S.: *Euler's Discretization Effect on a Twisting Algorithm Based Sliding Mode Control*. Automatica submission 14-0764.3, 2016.
- [3] YAN, Y., XINGHUO, Y. and CHANGYIN, S.: *Discretization behaviors of a super-twisting algorithm based sliding mode control system*. In International Workshop on Recent Advances in Sliding Modes (RASM), 2015.
- [4] ACKERMANN, J: *Beschreibungsfunktionen für die Analyse und Synthese von nichtlinearen Abtast-Regelkreisen*. at - Automatisierungstechnik 14, (1-12), 497-504 1966.
- [5] GEIGER, F.: *Die Anwendung der Methode der Beschreibungsfunktion auf Abtastsysteme*. Dissertation, Technische Universität Graz, 1998.
- [6] KOCH, S., REICHHARTINGER, M., HORN, M. and FRIDMAN, L.: *Sampled Describing Function Analysis of Second Order Sliding Modes*. In 55th IEEE CDC 2016 [accepted for publication].
- [7] BOIKO, I.: *Discontinuous Control Systems : Frequency-Domain Analysis and Design*. Berlin Heidelberg: Springer Science & Business Media, 2008.
- [8] BOIKO, I.: *Analysis of Closed-Loop Performance and Frequency-Domain Design of Compensating Filters for Sliding Mode Control Systems*. IEEE Trans. on Automatic Control, 52 (10), 1882-1891, 2007.

# Sliding-Mode-Regler zur Kraft- und Positionsregelung eines FGL-Aktors

Arathi Pai \*

\* Fraunhofer Institut für Entwurfstechnik  
Mechatronik IEM  
Zukunftsmeile 1, 33102 Paderborn  
05251 / 5465 106  
arathi.pai@iem.fraunhofer.de

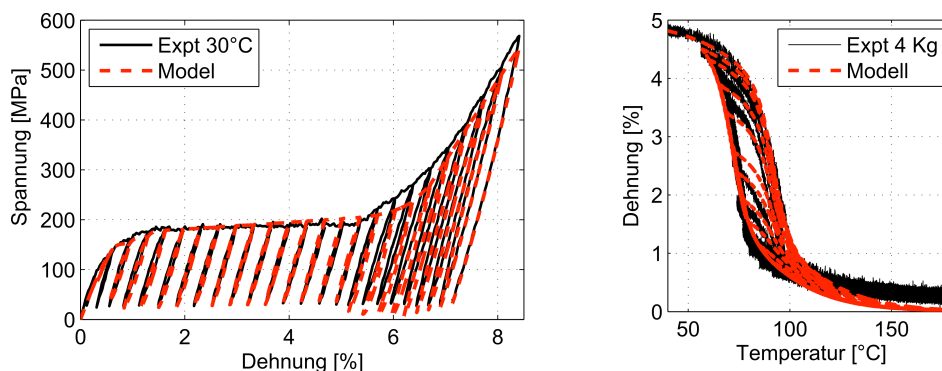
Prof. Dr.-Ing. Ansgar Trächtler \*\*

\*\* Heinz Nixdorf Institut, Regelungstechnik und  
Mechatronik, Universität Paderborn  
Fürstenallee 11, 33102 Paderborn  
05251 / 60 6277  
ansgar.traechtler@hni.uni-paderborn.de

**Schlüsselwörter:** Aktoren, Sliding-mode / strukturvariable Regelung, Temperaturregelung, Echtzeitmodell, Kraft- und Positionsregelung, Spannvorrichtung

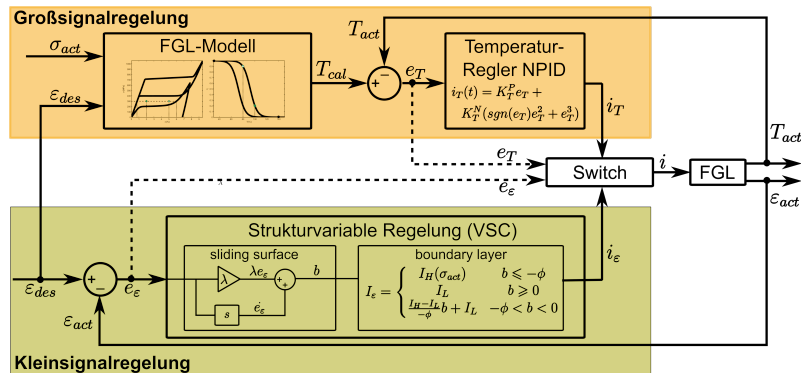
Formgedächtnislegierungen (FGL) sind metallische Werkstoffe, deren makroskopische Formdeformationen sich ausgehend von einer eingepprägten Basisform durch eine Temperaturerhöhung erholen können. Diese Erholung wird als Formgedächtniseffekt bezeichnet und kann gezielt genutzt werden, um einen kraft- oder positionsgeregelten FGL-Aktor zu realisieren. Im Vergleich zu anderen Aktorprinzipien verfügen FGL über eine besonders hohe Energiedichte, was sie bspw. interessant für industrielle Anwendungen macht, wo kompakte, hochleistungsfähige Aktoren erforderlich sind. Allerdings ist aufgrund des stark nichtlinearen Verhaltens mit vielen Hystereseschleifen (siehe *Abbildung 1*) der Entwurf einer präzisen Regelung nicht trivial.

Die zu entwerfende Regelung soll modellbasiert erfolgen, was Modelle erfordert, die die Nichtlinearitäten nicht nur mathematisch präzise beschreiben, sondern zudem echtzeitfähig sind. Dies ist bei den in den Materialwissenschaften gängigen FGL-Modellen nicht der Fall. In diesem Beitrag wird dazu ein phänomenologisches Modell vorgestellt, welches sowohl das phasenkinetische wie auch das mechanische Verhalten von FGL-Werkstoffen abhängig von Temperatur und mechanischer Spannung beschreiben kann. Das gesamte Modell basiert ausschließlich auf geschlossenen und differenzierbaren analytischen Gleichungen, welche eine extrem schnelle computergestützte Berechnung ermöglichen [1]. Das Modell wurde durch Laborversuche validiert und weist dabei eine außerordentliche gute Korrelation mit den in den Experimenten festgestellten Daten auf (siehe *Abbildung 1*). Um dieses Modell in einem geschlossenen Regelkreis effizient verwenden zu können, wurde zudem in diesem Beitrag ein inverses Modell abgeleitet.



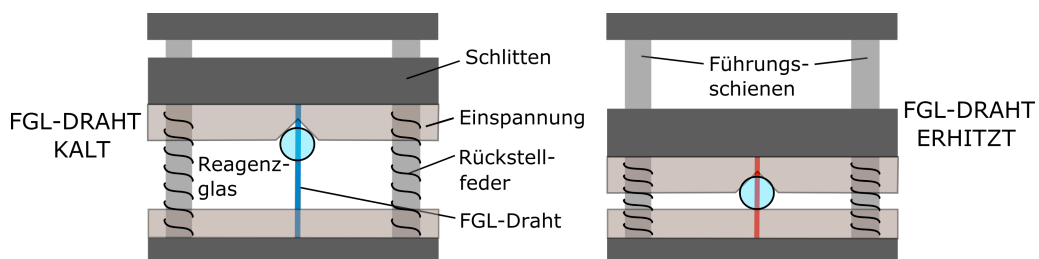
*Abbildung 1: Spannungs- / Dehnungs- und Dehnungs- / Temperaturdiagramm: Vergleich von Modell und Experiment*

Darauf aufbauend wurde eine Regelstrategie entwickelt, die aus einer Kombination von 2 Teilregelungen für den Kleinsignal- und den Großsignalbereich besteht, siehe *Abbildung 2*. Der Großsignalregler für die grobe Positionsregelung ist ein nichtlinearer PID (NPID) Temperaturregler [2], der seine einzuregelnden Solltemperaturwerte aus dem inversen FGL-Modell erhält. Der Kleinsignalregler für die Feinregelung der Position ist ein strukturvariabler (VSC) Regler mit einer asymmetrischen Grenzumgebung, um einer möglichen Überhitzung vorzubeugen. Zusätzlich passen sich die Regelsignale adaptiv an beliebige dynamische Lasten an. In anschließenden Versuchen wurden die Regelstrategien getestet und validiert. Die Ergebnisse weisen eine außerordentlich gute Regelgüte (Genauigkeit, Schnelligkeit und Störunterdrückung) für diesen FGL-Aktor auf [3].



*Abbildung 2: Regelstrategie für den FGL-Aktor*

Die Regelstrategie für den FGL-Aktor wurde dann ebenfalls zur Kraftregelung einer industriellen Spannvorrichtung genutzt. Hierzu wurde als einzuspännender Gegenstand ein dünnwandiges Reagenzglas verwendet (siehe *Abbildung 3*). Der Großsignalregler ist in dieser Anwendung unverändert geblieben, während der Kleinsignalregler als Kraftregler ausgeführt ist (Vorgabe einer Sollkraft, Rückführung der gemessenen Kraft) und die gleiche Struktur wie der VSC-Positionsregler hat. Die Regelung wurde auf einem eingebetteten Prozessor implementiert bei einer Abtastrate von 3 ms. Auch hier wurde in den Experimenten wieder eine hohe Regelgüte erreicht.



*Abbildung 3: Industrielle Spannvorrichtung mit FGL-Drähten*

## Literatur:

- [1] Pai, A. et al.: Modelling the Constitutive Behaviour of Martensite and Austenite in SMAs Using Closed-Form Analytical Continuous Equations. In: SPRINGER 2016 Computational Methods in Applied Sciences, Smart Structures and Materials, Vol. 43
- [2] Rahman, S et al.: A comparative study of position control of a SMA actuated manipulator. In: Communications and Electronics, 2008.
- [3] Pai, A.; Riebold, M.; Trächtler, A.: Precision Control of SMA Actuators with a Real Time Model-Based Controller and Extended VSC. In: IFAC Mechatronics 2016

# Modellierung und adaptive Sliding-Mode Regelung eines hydraulischen Druckbegrenzungsventils

Christoph Krimpmann, Torsten Bertram

Georg Schoppel, Ingo Glowatzky

Lehrstuhl für Regelungssystemtechnik  
TU Dortmund  
Otto-Hahn-Str. 8, 44221 Dortmund  
0231/755-2745  
0231/755-2752  
christoph.krimpmann@tu-dortmund.de

Bosch Rexroth AG  
Partensteiner Str. 23, 97816 Lohr am Main

**Schlüsselwörter:** Sliding-Mode Control, Lyapunov-Theorie, Self-Tuning, Hydraulik

Im Fokus dieses Beitrags steht der anwendungsorientierte Entwurf von sich selbsteinstellenden Sliding-Mode Reglern für hydraulische Druckbegrenzungsventile. Der Aufbau eines solchen Ventils bestehend aus einem elektromagnetischem Aktor sowie einem variabel justierbaren Ventilkegel und festem Sitz ist in Abb. 1 dargestellt. Wie bei der Sliding-Mode Regelung üblich wird für das geregelte System ein Wunschverhalten spezifiziert und durch eine zustandsabhängige Schaltfunktion aufgeprägt. Im Vergleich zu konventionellen Regelungsansätzen, die auf PI-Reglern mit nichtlinearen Verstärkungskennlinien basieren und die durch eine Vielzahl zu parametrisierender Größen gekennzeichnet sind (vgl. [1, 2]), kann die Vorgabe des designierten Systemverhaltens durch die Wahl einer linearen Differentialgleichung für den Regelungsfehler erfolgen und somit die Anzahl der zu bestimmenden Parameter reduziert werden. Zur Bestimmung der Ordnung des Systems und somit der benötigten Schaltfunktion wird in diesem Beitrag ein regelungstechnischer Modellierungsansatz für ein Druckbegrenzungsventil vorgestellt. Basierend auf dem resultierenden analytischen Zustandsraummodell des Ventils erfolgt die Analyse der Systemdynamik und Ordnung. Durch Bestimmung des dominanten Systemverhaltens wird die für die Regelung relevante Systemordnung bestimmt.

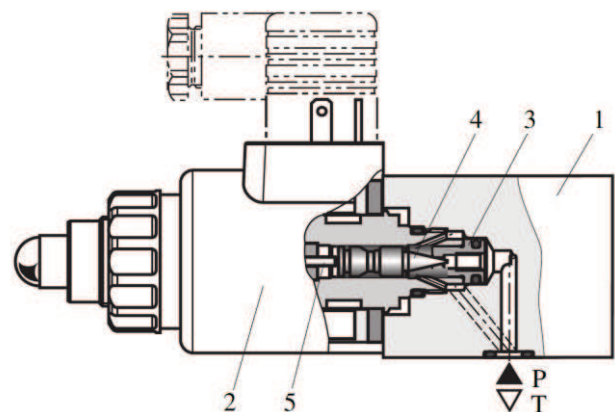


Abbildung 1: Querschnitt eines Druckbegrenzungsventils. 1: Ventilkörper, 2. Aktor, 3. Ventilsitz, 4. Ventilkegel, 5. Stößel, P. Druckanschluss, T. Rücklauf

Der angewandte Regler basiert auf dem Konzept der Sliding-Mode Regelung höherer Ordnung (vgl. z.B. [3]), sodass sichergestellt werden kann, dass keine unerwünschten Schwingungen in der Regelgröße auftreten, die durch eine Fehlabschätzung des relativen Grades der Strecke resultieren. Die Parametrisierung des verwendeten Super-Twisting Algorithmus [4] sowie der Schaltfunktion erfolgen durch Lyapunov-basierte Self-Tuning Ansätze, sodass innerhalb kurzer Zeit durch Vorgabe von Qualitätsmaßen die optimale Regelungsgüte erreicht wird. Durch Verwendung

bekannter Adaptionstrategien für Sliding-Mode Regler [5, 6] sowie die Kombination derer mit neu entwickelten Ansätzen zur Selbsteinstellung der Zieldynamik über die Adaption der Schaltfunktion [7, 8] kann gezeigt werden, dass die Optimierung von Sliding-Mode Reglern als ganzheitliches Optimierungsproblem betrachtet werden kann und eine Partitionierung in einzelne Teilkomponenten nicht notwendig ist, um eine optimale Regelungsgüte zu erzielen. Der vollständige Beitrag stellt die Ergebnisse des entwickelten Regelungsverfahrens sowohl in simulativen wie auch real durchgeführten Experimenten dar.

## Literatur:

- [1] J. Krettek, J. Braun, F. Hoffmann, T. Bertram, T. Ewald, H.-G. Schubert, und H. Lausch, "Interactive evolutionary multiobjective optimization for hydraulic valve controller parameters," *IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*, Seiten 816–821, 2009.
- [2] C. Krimpmann, J. Braun, T. Bertram, I. Glowatzky, T. Ewald, und H. Lausch, "Intuitive Objective Definition for the automated Optimization of Hydraulic Valves," *9th International Fluid Power Conference*, Seiten 68–78, 2014.
- [3] A. Levant, "Higher-order sliding modes, differentiation and output-feedback control," *International Journal of Control*, Band 76, Heft 9-10, Seiten 924–941, 2003.
- [4] A. Levant, "Sliding order and sliding accuracy in sliding mode control," *International Journal of Control*, Band 58, Heft 6, Seiten 1247–1263, 1993.
- [5] Y. Shtessel, M. Taleb, und F. Plestan, "A novel adaptive-gain super-twisting sliding mode controller: Methodology and application," *Automatica*, Band 48, Heft 5, Seiten 759–769, 2012.
- [6] F. Plestan, Y. Shtessel, V. Brégeault, und A. Poznyak, "New methodologies for adaptive sliding mode control," *International Journal of Control*, Band 83, Heft 9, Seiten 1907–1919, 2010.
- [7] C. Krimpmann, G. Schoppel, I. Glowatzky, und T. Bertram, "Performance evaluation of nonlinear surfaces for sliding mode control of a hydraulic valve," *IEEE Multi-Conference on Systems and Control*, Seiten 822–827, 2015.
- [8] C. Krimpmann, G. Schoppel, I. Glowatzky, und T. Bertram, "Lyapunov-based self-tuning of sliding surfaces - methodology and application to hydraulic valves," *IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM)*, Seiten 457–462, 2016.

# Vereinheitlichte Analyse verteilter Automatisierungssysteme auf Basis eines formalisierten Begriffssystems zur Wissensrepräsentation, Modellbeschreibung und Ergebnispräsentation

Dr. Patrick Diekhake

Institut für Verkehrssicherheit und  
Automatisierungstechnik  
Technische Universität Braunschweig  
Hermann-Blenk-Straße 42  
D-38108 Braunschweig  
Tel: 0531/391-66301  
Fax: 0531/391-66399  
p.diekhake@tu-braunschweig.de

Dr. Uwe Becker

Institut für Verkehrssicherheit und  
Automatisierungstechnik  
Technische Universität Braunschweig  
Hermann-Blenk-Straße 42  
D-38108 Braunschweig  
Tel: 0531/391-66333  
Fax: 0531/391-66399  
u.becker@tu-braunschweig.de

**Schlüsselwörter:** verteilte Automatisierungssysteme, Systemanalyse, Begriffsformalisierung, Modellgenerierung, Petrinetzanalysen

Während der Entwicklungsprozess verteilter Automatisierungssysteme mittels einer durchgängigen Werkzeugkette unterstützt wird und somit die Entwicklungsphasen horizontal verknüpft werden, erfolgen Analysetätigkeiten zumeist noch isoliert voneinander und sind je fokussiert auf eine konkrete Problemstellung innerhalb einer Lebenszyklusphase. Den vielfältigen und vielzähligen Problemstellungen verteilter Automatisierungssysteme stehen daher verschiedenste Analysekonzepte und -tätigkeiten in sämtlichen Phasen von der System- und Anforderungserhebung bis hin zum Monitoring des Systems im operativen Betrieb gegenüber, d.h. der Gesamtaufwand für die Modellierung und Analyse verteilter Automatisierungssysteme ist dementsprechend hoch.

Schwerpunkt des Beitrages ist daher eine Vorgehensweise für eine systematische und vereinheitlichte Analyse von verteilten Automatisierungssystemen [1]. Unter dem Einsatz weniger, geeigneter Beschreibungsmittel, probaten Methoden und vielseitig einsetzbaren Werkzeugen wird eine strukturierte Modellierung, Simulation und Überwachung eines verteilten Automatisierungssystems vorgestellt.

Ein wesentlicher Bestandteil des Vorgehens ist die Bereitstellung einer verständlichen und gleichzeitig detaillierten Beschreibung des zu analysierenden Systems über ein Begriffssystem in Form eines Systemmodells. Dieses Systemmodells dient der Wissensrepräsentation von Systeminformationen, stellt die Basis zur Generierung weiterführender ausführbarer Analysemodelle bereit und ermöglicht später eine Präsentation der ermittelten Analyseergebnisse. Das schrittweise Erstellen und Ergänzen des Systemmodells wird in diesem Beitrag unter Verwendung von Beispielen näher erörtert. Im Kontext der klassischen Systemanalyse beinhaltet das Modell im Bezug zu einer betrachteten Problemstellung zunächst eine eindeutige Unterscheidungsfindung des zu



analysierenden (Teil-)Systems zu seiner Umwelt, das Feststellen der Systemelemente und deren Beziehungen sowie die systematische Erhebung und Quantifizierung der Systemeigenschaften und Anforderungen. Ergänzt wird das Systemmodell durch eine Begriffsformalisierung [2] wodurch sich die für die Problemstellung relevanten Informationen formal darstellen und eindeutig zuordnen lassen. Damit stellt das formalisierte Systemmodell eine umfassende beschreibende Modellbasis dar, die die für eine konkrete Problemstellung relevanten Informationen durch variable Abstraktion bzw. Detailierung abbilden kann, beginnend von einer abstraktesten Sicht auf den allgemeinen Systembegriff bis hin zu einer gerätetechnischen Sicht auf ein konkretes Bauelement und seine Kennwerte. Das Modell erlaubt somit u.a. eine mathematische Strukturbeschreibung nachstehend auszuführenden Analysemodellen wie Strukturmodelle, Simulationsmodelle, Umgebungs- bzw. Stimulationsmodelle, Testfall- und Monitoringmodelle sowie eine Ablage der entsprechenden Parameter für diese Modelle. Nach einer Generierung und Ausführung solcher Analysemodelle lassen sich die gewonnenen Ergebnisse zur Wissensanreicherung in das wissensbeschreibende Systemmodell zurückführen.

Die Anwendung der erarbeiteten Methodik mittels strukturierter Wissensmodellierung und Ausführung der abgeleiteten Analysemodelle wird am Beispiel von simulativen Analysen für folgende exemplarische Problemstellungen vorgestellt:

- Ermittlung nichtfunktionaler Eigenschaften eines maximal ausgedehnten Bitübertragungssystems mittels SPICE-Simulation aufgrund einer möglichen Degradation der Signalqualität
- Bestimmung von Verzögerungszeiten mittels Petrinetzsimulation aufgrund physikalisch bedingten Kommunikationsprozessen zwischen verteilten Gerätekomponenten

Weiter wird die Anwendung der Methodik am Beispiel einer statischen Analyse zur Ermittlung der Eigenschaften der Beobachtbarkeit und der Steuerbarkeit verteilter Automatisierungssysteme sowie am Beispiel einer Online-Analyse für eine Testausführung während der Inbetriebnahme bzw. für eine Laufzeitanalyse im operativen Betrieb des Systems kurz erläutert.

Die durchgeführten statischen Analysen (z.B. Beobachtbarkeits- und Steuerbarkeitsanalysen), Simulationsanalysen (z.B. Performanceanalyse) und Online-Analysen (z.B. Testausführung oder Laufzeitanalyse) erfolgten auf Basis der systematischen Vorgehensweise zur Beschreibung von Analysemodellen, die vorwiegend mittels Petrinetzen modelliert wurden.

## **Literatur:**

- [1] Diekhake, Patrick: Systematische Modellierung und Analyse verteilter Automatisierungssysteme. Dissertation, Technische Universität Braunschweig, Mai 2016.
- [2] Schnieder, Eckehard und Schnieder, Lars: Axiomatik der Begriffe für die Automatisierungstechnik. In: Deutscher Industrieverlag (Hrsg.): atp-Automatisierungstechnische Praxis, S. 62–73, 2012.



# Modellierung und Simulation eines automatischen Koexistenzmanagements

Darina Schulze \*

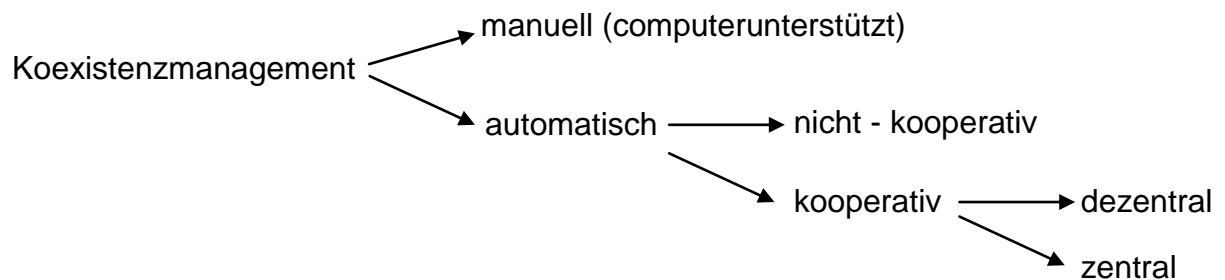
Ulrich Jumar \*\*

\* Institut für Automation und Kommunikation e.V.  
 Werner-Heisenberg-Str. 1  
 39106 Magdeburg  
 0391/9901499  
 0391/9901590  
 darina.schulze@ifak.eu

\*\* Institut für Automation und Kommunikation e.V.  
 Werner-Heisenberg-Str. 1  
 39106 Magdeburg  
 0391/9901410  
 0391/9901590  
 ulrich.jumar@ifak.eu

**Schlüsselwörter:** Drahtlose industrielle Kommunikationssysteme, Interferenzmodellierung, Zuverlässigkeit, Petri-Netze

Im industriellen Bereich der drahtlosen Kommunikation ist ein großer Zuwachs zu verzeichnen. Dabei werden zunehmend höhere Anforderungen an das Zeit- und Fehlerverhalten der Funkkommunikation gestellt. Es kommen unterschiedliche Funktechnologien, wie WLAN oder Bluetooth, sowie mehrere Kommunikationssysteme zum Einsatz. Ist dies gleichzeitig und am selben Ort sowie unter der Nutzung des gleichen Frequenzbereiches der Fall, können diese Kommunikationssysteme interferieren. Dennoch sollen die gestellten Anforderungen erfüllt werden, womit der sogenannte Zustand der Koexistenz [2] gewährleistet werden muss. Der Koexistenzzustand kann über einen Koexistenzmanagementprozess erhalten bzw. erreicht werden. Dabei lassen sich die folgenden Arten unterscheiden.



Weder in der Literatur, noch in der Praxis wird ein gesamtheitliches Koexistenzmanagementsystem betrachtet. Lediglich Teile daraus werden untersucht, wie z. B. der kognitive Medienzugriff [1]. Dieser gehört zu den nicht-kooperativen Ansätzen, bei denen die drahtlosen Kommunikationssysteme über ihren eigenen Medienzugriff entscheiden. Dies macht das Gesamtsystem störanfälliger, da kein Informationsaustausch zwischen den drahtlosen Kommunikationssystemen erfolgt. Der Forschungsbeitrag der Autoren adressiert einen anwendungsorientierten, technologieunabhängigen und automatisierten Koexistenzmanagementprozess. Dabei wird eine regelungstechnische Interpretation verfolgt. Der Regelkreis wird wie folgt formuliert:

Tabelle 1: Formulierung des Regelkreises nach [3]

Führungsgröße	Vorgabe der Übertragungszeit, der Packetverlustrate oder der Verfügbarkeit
Regelgröße	Istgröße der Übertragungszeit, der Packetverlustrate oder der Verfügbarkeit
Stellgröße	Einflussgrößen unterteilt in: - anwendungsbasiert (z. B. Abstand)

	<ul style="list-style-type: none"> <li>- oder Beweglichkeit der Geräte),</li> <li>- systembezogen (z. B. Position der Funkgerätes oder Bitrate) und</li> <li>- gerätebezogen (z. B. Antennenleistung)</li> </ul>
Störgröße	Beeinflussung durch andere Funkteilnehmer, die Interferenzen verursachen

Abbildung 1 zeigt ein Beispiel der Regelstrecke  $P$ . Ein Funkgerät (FG) kann dabei ein Sender (Quelle) oder ein Empfänger (Ziel) für eine Nachricht sein. Funkgeräte mit gleicher Bezifferung stellen *ein* drahtloses Kommunikationssystem dar.

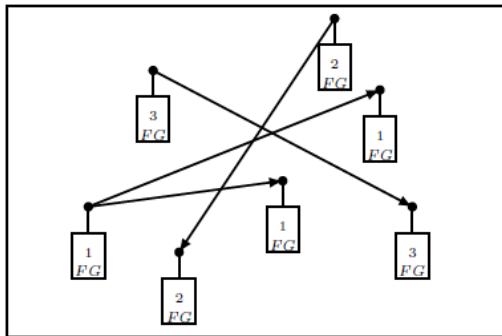


Abbildung 1: Regelstrecke

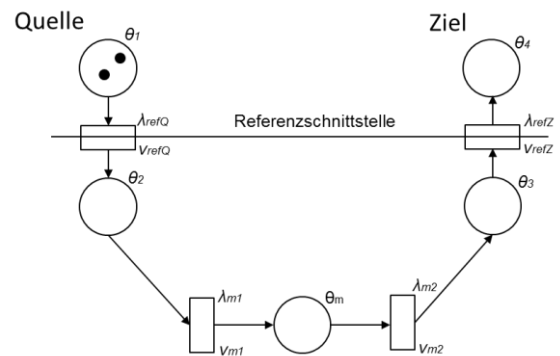


Abbildung 2: Regelstreckenmodellierung

Für eine Beschreibung des Verhaltens der Regelstrecke nutzen die Autoren die Notation zeitbehafteter Petri-Netze. Abbildung 2 zeigt den interferenzfreien Fall für eine Nachrichtenübertragung. Die Menge der Plätze beschreibt dabei  $\Theta \ni \{\theta_1, \theta_2, \theta_m, \theta_3, \theta_4\}$ , wobei  $\theta_1$  die Nachrichtengeneration,  $\theta_2$  den Medienzugriff,  $\theta_m$  die Medienbelegung und  $\theta_3$  den Erfolg der Nachrichtenübertragung beschreiben. In  $\theta_4$  werden die Regelgrößen gemessen bzw. berechnet. Die Menge der Transitionen beschreibt dabei  $\Lambda \ni \{\lambda_{refQ}, \lambda_{m1}, \lambda_{m2}, \lambda_{refZ}\}$ , wobei die Zustandsübergänge  $\lambda_{refQ}$ ,  $\lambda_{m1}$ ,  $\lambda_{m2}$ ,  $\lambda_{refZ}$  jeweils an der Referenzschnittstelle der Quelle, Sender zum Medium, Medium zum Empfänger und Referenzschnittstelle des Zieles beschrieben werden. Die Menge der Verzögerungen beschreibt  $V \ni \{V_{refQ}, V_{m1}, V_{m2}, V_{refZ}\}$ .

Der Beitrag zeigt erste Schritte für die Modellierung eines automatischen Koexistenzmanagements. Die Autoren präsentieren Simulationsergebnisse zur Modellvalidierung des Koexistenzverhaltens in einer realen Testumgebung.

## Literatur:

- [1] Haykin, S.: Cognitive Radio: Brain-Empowered Wireless Communication. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 23(2), 2005.
- [2] IEC62657-2. Ed1: Industrial Communication Networks Wireless Communication Networks Part 2: Coexistence Management. Technical report, 2014.
- [3] Schulze, D. and Rauchhaupt, L.: A Control Engineering Approach for an Automated Coexistence Management. In 4th IFAC Symposium on Telematics Application (TA2016). Porto Alegre, Brazil, 2016

# Verifikation von verteilten Automatisierungssystemen auf Basis einer Modellkomposition

Andreas Zeller \*

Prof. Michael Weyrich \*\*

\*Institut für Automatisierungstechnik  
und Softwaresysteme  
Universität Stuttgart  
Pfaffenwaldring 47  
0711/685-67291  
0711/685-67302  
andreas.zeller@ias.uni-stuttgart.de

\*\*Institut für Automatisierungstechnik  
und Softwaresysteme  
Universität Stuttgart  
Pfaffenwaldring 47  
0711/685-67301  
0711/685-67302  
michael.weyrich@ias.uni-stuttgart.de

**Schlüsselwörter:** Modellierung verteilter Automatisierungssysteme, Rekonfiguration, Verifikation

Die Bedeutung von Software in der Automatisierungstechnik nimmt stetig zu. Ein Ende dieses Trends ist zurzeit nicht absehbar [1]. Dabei ist zu beobachten, dass sich Software über den Lebenszyklus eines Produkts ändert. Bei Automobilen ist es schon heute möglich, neue Funktionalitäten über Software-Updates einzubinden. Zur Steigerung der Flexibilität von Automatisierungssystemen wird dies auch im Bereich der industriellen Produktion relevant [2]. Dies führt dazu, dass Funktionstests, welche heutzutage hauptsächlich in der Engineering- und Inbetriebnahmephase relevant sind, aufgrund von Rekonfigurationen zunehmend Bedeutung in der Betriebsphase gewinnen (siehe Abbildung 1).

Um Flexibilität bei Automatisierungssystemen zu ermöglichen, werden diese vermehrt dezentral mittels serviceorientierten Architekturen koordiniert. Durch die Kapselung von Funktionalität in einen Service, lose Kopplung zwischen Systemkomponenten und definierte Schnittstellen ermöglicht die Serviceorientierung die Realisierung eines hoch flexiblen Automatisierungssystems. Für die Absicherung ergeben sich dabei zahlreiche Herausforderungen [3]:

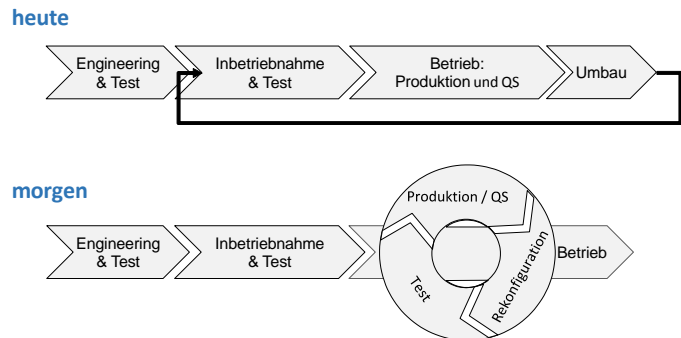


Abbildung 1: Veränderungen des Lebenszyklus einer Produktionsanlage durch Rekonfigurationen

- N-zu-N-Kommunikation erschwert die Ermittlung von Abhängigkeiten
- Hohe Funktionalität in Software resultiert in einer hohen Anzahl von Anforderungen, die abgesichert werden müssen.
- Die Verteilung von Funktionalitäten auf mehrere Systemkomponenten erschwert die Ermittlung von Abhängigkeiten und die Fehlerlokalisierung

Zur Bewältigung dieser Herausforderungen wird ein Konzept vorgestellt, welches automatisiert Abhängigkeiten eines serviceorientierten Automatisierungssystems erkennt und über diese Abhängigkeiten die Teilmodelle der Softwarekomponenten zu

einem Modell des Gesamtsystems komponiert. Mithilfe des komponierten Systemmodells lässt sich die Kooperation zwischen den einzelnen Systemkomponenten testen (Integrationstest). Bei diesen Systemkomponenten kann es sich beispielsweise um Steuerungen, Aktoren und Sensoren handeln, welche ihre Funktionalitäten in Services kapseln. Das Systemmodell ermöglicht es darüber hinaus abzuleiten, welche Systemkomponenten von Software-Rekonfigurationen betroffen sind. Die Isolation des betroffenen Teilsystems erlaubt eine zielgerichtete Verifikation und mindert somit den notwendigen Testaufwand.

Ein Automatisierungssystem kann dabei als Komposition verschiedener Systemkomponenten angesehen werden. Diese sind über einen Kommunikationskanal durch Kommunikationsnachrichten miteinander verbunden. Das Verhalten der einzelnen Systemkomponenten kann über ein offenes Petri-Netz beschrieben werden. Dabei beschreiben Interface-Stellen (siehe p4-p8 in Abbildung 2) die Schnittstellen nach außen, welche über die Kommunikationsnachrichten (Start, ackFörderband, etc.) eindeutig beschrieben sind. Des Weiteren können Anforderungen, welche an die Systemkomponente gestellt werden, dem jeweiligen Petri-Netz zugeordnet werden. Durch algebraische Operation können die modularen Petri-Netze über einen Abgleich der Interface-Stellen zu einem Modell des Gesamtsystems komponiert werden. Anhand eines Erreichbarkeitsgraphen werden die Auswirkungen von Rekonfigurationen auf andere Systemkomponenten ermittelt.

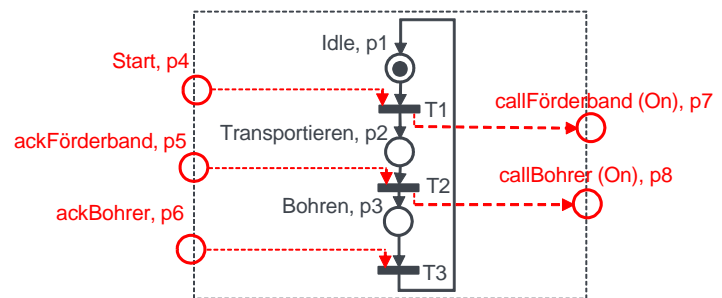


Abbildung 2: Darstellung des Ablaufs einer Prozesssteuerung über ein offenes Petri-Netz

Damit ist es möglich, das von Software-Rekonfigurationen betroffene Teilsystem einzugrenzen und dieses zielgerichtet abzusichern. Das vorliegende komponierte Petri-Netz beschreibt dabei das Verhalten des durch Rekonfigurationen betroffenen Teilsystems. Durch die Komposition der Teilmodelle kann nun die Interaktion der Systemkomponenten gegen die Anforderungen der betroffenen Systemkomponenten modellbasiert verifiziert werden.

Damit ist es möglich, das von Software-Rekonfigurationen betroffene Teilsystem einzugrenzen und dieses zielgerichtet abzusichern. Das vorliegende komponierte Petri-Netz beschreibt dabei das Verhalten des durch Rekonfigurationen betroffenen Teilsystems. Durch die Komposition der Teilmodelle kann nun die Interaktion der Systemkomponenten gegen die Anforderungen der betroffenen Systemkomponenten modellbasiert verifiziert werden.

## Literatur:

- [1] VDMA: *IT und Automation im Maschinenbau – VDMA Trendstudie 2015 Zusammenfassung*, 2015.
- [2] Kagermann, H. et. al.: *Umsetzungsempfehlungen für das Zukunftsprojekt Industrie 4.0. Abschlussbericht des Arbeitskreises Industrie 4.0*, Forschungsunion, Berlin 2013.
- [3] Zeller A., Weyrich M.: *Challenges for Functional of reconfigurable Production Systems*, 21st IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation, 2016

# Regionale prädiktive Regelung – MPC als Abtastung eines stückweise definierten Riccati-Reglers

Kai König\*

\* Lehrstuhl für Regelungstechnik und Systemtheorie  
Ruhr-Universität Bochum  
IC 1-101, 44801 Bochum  
0234 32-21560  
0234 32-14155  
kai.koenig-h4d@rub.de

Martin Mönnigmann\*\*

\*\* Lehrstuhl für Regelungstechnik und Systemtheorie  
Ruhr-Universität Bochum  
IC 1-115, 44801 Bochum  
0234 32-24060  
0234 32-14155  
martin.moennigmann@rub.de

**Schlüsselwörter:** prädiktive Regelung, Systeme unter Beschränkungen, quadratische Programmierung, nichtlineare Programmierung, Riccati-Regler

Prädiktive Regelungen basieren darauf, ein Optimalsteuerungsproblem periodisch zu lösen und dabei den aktuellen Systemzustand jeweils als Anfangswert zu wählen. Dieses Vorgehen kann als punktwises Abtasten eines Regelgesetzes aufgefasst werden, denn für den jeweils aktuellen Zustand  $x(t_k) \in \mathbb{R}^n$  wird das optimale  $u^*(x(t_k)) \in \mathbb{R}^m$  berechnet. Für die Folge  $x(t_1), x(t_2), x(t_3), \dots$  der Zustände des geregelten Systems ergibt sich so eine Folge  $u^*(x(t_1)), u^*(x(t_2)), u^*(x(t_3)), \dots$  von Punkten im  $\mathbb{R}^m$ , die als Ergebnis einer Abtastung des unterlagerten optimalen Regelgesetzes  $x \rightarrow u^*(x)$  aufgefasst werden kann.

Das einer prädiktiven Regelung zugrunde liegende Optimalsteuerungsproblem wird üblicherweise numerisch gelöst und inzwischen wurden viele Untersuchungen der Entwicklung von effizienten Algorithmen gewidmet. Der vorliegende Beitrag schlägt vor, einen anderen Weg zu gehen, bei dem die Optimalsteuerungsaufgabe nicht von-Punkt-zu-Punkt gelöst wird. Die zentrale Idee besteht darin, dass die Lösung dieser Aufgabe an einem Punkt  $x(t_k)$  nicht nur den einen Wert  $u^*(x(t_k))$  festlegt, sondern ein regional gültiges Regelgesetz  $u^*(\cdot)$ . Im Fall der linearen prädiktiven Regelung ist dieses regionale Regelgesetz eine affine Rückführung  $u(x) = Kx + b$ , die auf einem volldimensionalen Polytop im Zustandsraum optimal ist [2,3]. Diese affine Rückführung ist die Verallgemeinerung des linearen Riccati-Reglers, der die linear-quadratische Aufgabe ohne Beschränkungen löst und an dessen Lösung Kalman maßgeblich beteiligt war [1]. Es liegt also nahe das Regelgesetz, das die MPC-Aufgabe löst, durch eine Folge von regionalen affinen Regelgesetzen mit polytopen Gültigkeitsgebieten zu sampeln statt nur durch die oben beschriebene Folge von Punkten  $u(x(t_1)), u(x(t_2)), u(x(t_3)), \dots$  im  $\mathbb{R}^m$ .

Ausgehend von der Einsicht, dass regionale Regelgesetze existieren, können verschiedene Verbesserungen bestehender Umsetzungen prädiktiver Regelungen abgeleitet werden. Zunächst ist wichtig, dass die Berechnung der regionalen Regelgesetze und ihrer Gültigkeitsgebiete keinen höheren Rechenaufwand erfordert als das Lösen der Optimalsteuerungsaufgabe an einem Punkt (siehe [4]; dieses Ergebnis folgt unmittelbar aus [2,3]). Zudem ist es offensichtlich sinnvoll, ein einmal berechnetes regionales Regelgesetz so lange weiter zu verwenden, wie sein

Gültigkeitsgebiet nicht verlassen wird, statt die viel aufwändigere Optimalsteuerungsaufgabe zu lösen [4]. Weil die Auswertung der regionalen Regelgesetze erheblich weniger rechenintensiv ist als das Lösen der Optimalsteuerungsaufgabe, können die regionalen Regelgesetze auf schlanken eingebetteten Systemen ausgewertet werden, die bei Bedarf neue Regelgesetze von einem leistungsfähigen zentralen Knoten anfordern [5]. Eine Erweiterung auf den Fall der nichtlinearen prädiktiven Regelung ist möglich [6], führt aber bisher noch nicht zu rechentechnischen Verbesserungen, weil sich die regionalen Regelgesetze i.Allg. nur implizit durch ein nichtlineares Gleichungssystem charakterisieren lassen. Im vorliegenden Beitrag liegt der Schwerpunkt darauf zu untersuchen, wie die stückweise Struktur des unbekanntes  $x \rightarrow u^*(x)$  ausgenutzt werden kann, um nicht nur innerhalb der polytopen Gültigkeitsbereiche, sondern auch beim Wechsel von einem regionalen Regelgesetz zum nächsten auf das Lösen der Optimalsteuerungsaufgabe verzichten zu können.

### **Literatur:**

- [1] R. E. Kalman, Contributions to the theory of optimal control, Boletín de la Sociedad Matemática Mexicana, Vol. 5, S. 102-119, 1960.
- [2] A. Bemporad, M. Morari, V. Dua, E. N. Pistikopoulos, "The explicit linear quadratic regulator for constrained systems," Automatica, Vol. 38(1), S. 3-20, 2002.
- [3] M. Seron, G. Goodwin, J. DeDona, "Characterisation of receding horizon control for constrained systems," Asian Journal of Control, Vol. 5, S. 271-286, 2003.
- [4] M. Jost, M. Schulze Darup, M. Mönnigmann, "Optimal and suboptimal event-triggering in linear model predictive control," Proc. 2015 European Control Conference, S. 1147–1152, 2015.
- [5] P. S. Berner, M. Mönnigmann, A comparison of four variants of event-triggered networked MPC, Proc. 2016 IEEE Multi-Conference on Systems and Control, S. 1519-1524, 2016.
- [6] M. Mönnigmann, J. Otten and M. Jost. Nonlinear MPC defines implicit regional optimal control laws. Proc. 5th IFAC Conference on Nonlinear Model Predictive Control, S. 134-139, 2015.
- [7] K. König, M. Mönnigmann, Regional MPC with active set updates, eingereicht für den IFAC Weltkongress, 2017.

# Berücksichtigung von Störungen in der ökonomisch prädiktiven Regelung

Florian A. Bayer \*

Frank Allgöwer \*\*

\* Institut für Systemtheorie und Regelungstechnik

\*\* Institut für Systemtheorie und  
Regelungstechnik

Universität Stuttgart  
Pfaffenwaldring 9, 70550 Stuttgart  
Tel.: +49 711 685 67744  
Fax: + 49 711 685 67735

Universität Stuttgart  
Pfaffenwaldring 9, 70550 Stuttgart  
Tel.: +49 711 685 67733  
Fax: + 49 711 685 67735

E-Mail: florian.bayer@ist.uni-stuttgart.de

E-Mail: frank.allgower@ist.uni-stuttgart.de

**Schlüsselwörter:** Ökonomisch prädiktive Regelung, robuste prädiktive Regelung, stochastische Störungen

Die ökonomisch prädiktive Regelung (engl.: *economic model predictive control*) ist ein prädiktives Regelungsverfahren, welches, im Gegensatz zur klassischen prädiktiven Regelung, nicht auf die Stabilisierung eines gegebenen Sollwerts abzielt. Stattdessen liegt der Fokus auf der Minimierung eines allgemeinen Gütekriteriums, beispielsweise auf der Minimierung von Energiekosten oder der Profitmaximierung [1]. Um dies zu erreichen wird die sonst übliche Annahme, dass das Gütefunktional positiv definit bezüglich des Sollwertes ist, fallen gelassen. Infolgedessen ist der geschlossene Regelkreis nicht notwendigerweise konvergent und periodische oder sogar chaotische Trajektorien können zu besserer Regelgüte führen.

Dieser Vortrag beschäftigt sich mit der Fragestellung, wie unbekannte Störungen die Regelgüte von Systemen beeinflussen, beziehungsweise wie diese beim Entwurf des Optimalsteuerungsproblems, das dem ökonomisch prädiktiven Regler zu Grunde liegt, berücksichtigt werden können. Es wird untersucht, ob klassische Ansätze zur robusten prädiktiven Regelung auch auf den ökonomisch prädiktiven Fall angewendet werden können. Zudem werden Methoden präsentiert, die es erlauben Störungen in der Optimierung zu berücksichtigen ohne dabei den damit verbundenen online Rechenaufwand des Optimalsteuerungsproblems zu erhöhen. Für diese Methoden können Schranken an die zu erwartende Regelgüte hergeleitet werden [2].

Außerdem wird der Fall betrachtet, dass *stochastische* Informationen über die Störung bekannt sind, zum Beispiel über die Verteilung der Störung. In diesem Fall kann die zusätzliche stochastische Information für die Regelung ausgenutzt werden und führt im Allgemeinen zu besserer Regelgüte. Allerdings erhöht dies die Komplexität des Optimierungsproblems, welches nun ein stochastisches ist. Auf Grund der gegebenen Problemstruktur können jedoch erneut Schranken für die Regelgüte hergeleitet und das Problem umformuliert werden, sodass eine effiziente Lösbarkeit des Problems erreicht werden kann und sich ein erster Ansatz für die Formulierung von *stochastisch ökonomisch prädiktiver Regelung* ergibt [3].

## Literatur:

- [1] M. Ellis, H. Durand, and P. D. Christofides. A tutorial review of economic model predictive control methods, *Journal of Process Control* 24(8), pp. 1156–1178, 2014.
- [2] F. A. Bayer, M. A. Müller, and F. Allgöwer. Tube-based robust economic model predictive control. *Journal of Process Control* 24(8), pp. 1237–1246, 2014.
- [3] F. A. Bayer, M. Lorenzen, M. A. Müller, and F. Allgöwer, Robust economic model predictive control using stochastic information, *Automatica* 74, pp. 151–161, 2016.



# Robuste modellprädiktive Regelung für sprungfähige Markow-Systeme

Jens Tonne \*

\* Fachgebiet Regelungs- und Systemtheorie  
Fachbereich Elektrotechnik/Informatik  
Universität Kassel  
Wilhelmshöher Allee 71 – 73, 34121 Kassel  
+49-(0)561-804-6496  
+49-(0)561-804-6383  
jens.tonne@uni-kassel.de

Olaf Stursberg \*\*

\*\* Fachgebiet Regelungs- und Systemtheorie  
Fachbereich Elektrotechnik/Informatik  
Universität Kassel  
Wilhelmshöher Allee 71 – 73, 34121 Kassel  
+49-(0)561-804-6367  
+49-(0)561-804-6383  
stursberg@uni-kassel.de

**Schlüsselwörter:** Modellprädiktive Regelung, (Produktions-)Systeme mit sprunghaften Unsicherheiten, Stochastische Regelung

Reale Systeme wie beispielsweise Produktionsanlagen oder Stromnetze werden durch kontinuierliche Störgrößen aber insbesondere auch sprunghafte Unsicherheiten, wie z.B. Materialschwankungen, Lastwechsel oder Komponentenausfälle beeinflusst. Die Zeitpunkte dieser abrupt eintretenden Unsicherheiten sind in der Regel nicht vorab bekannt

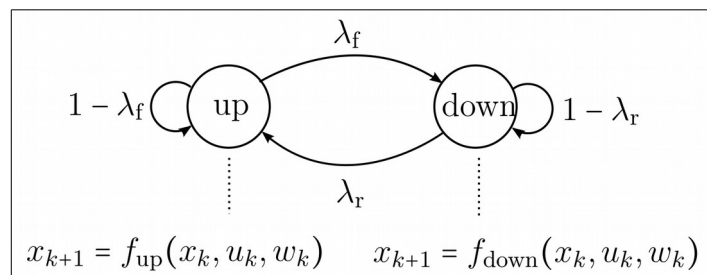


Abbildung 1: Sprungfähiges Markow-System eines Ausfall- und Reparaturprozesses

und können lediglich über Eintrittswahrscheinlichkeiten beschrieben werden. Ein solches Verhalten ist mithilfe sprungfähiger Markow-Systeme (SMS) [1] darstellbar, in denen eine Menge zeit-invarianter Systeme die verschiedenen Dynamiken beschreibt und die sprunghaften Wechsel durch die Transitionen einer Markow-Kette modelliert werden. Die Transitionswahrscheinlichkeiten können dabei aus zumeist bekannten Ausfallraten und Reparaturdauern bestimmt werden, wie in Abbildung 1 exemplarisch dargestellt.

Für die meisten Anwendungen ist die Berücksichtigung bzw. Einhaltung von Stellgrößen- und Zustandsbeschränkungen von zentraler Bedeutung, was die Verwendung der modellprädiktiven Regelung (MPR) [2] nahelegt. Die bestehenden Ansätze der MPR für SMS (siehe Quellen in [3-5]) basieren in der Regel auf der Lösung von semi-definiten Programmen oder berücksichtigen keine kontinuierlichen Störungen und sind damit aufgrund der resultierenden Rechenzeiten und/oder Robustheitseigenschaften für viele Anwendungen nicht geeignet. Daher wird in diesem Beitrag ein robustes MPR-Verfahren für die Regelung von SMS vorgestellt, das vergleichsweise geringe Rechenzeiten benötigt.

Dazu wird zunächst gezeigt, wie das MPR-Optimierungsproblem für lineare SMS zur Minimierung des Erwartungswerts der Zustands- und Stellgrößenkosten für einen endlichen Prädiktionshorizont  $N$  unter Berücksichtigung von polytopischen Stellgrößen- und Zustandsbeschränkungen in ein konventionelles quadratisches

Programm (QP) überführt werden kann [3,4]. Der Berechnungsaufwand zum Aufstellen und Lösen des QP ist sehr gering im Vergleich zu bestehenden Ansätzen.

Um die robuste Einhaltung von Stellgrößen- und Zustandsbeschränkungen sowie Stabilität und rekursive Zulässigkeit garantieren zu können, wird ein Verfahren zur Bestimmung von robusten regelungsinvarianten Mengen und zugehörigen stabilisierenden Zustandsrückführungen vorgestellt. Die regelungsinvarianten Mengen werden durch Ellipsoiden beschrieben, hängen vom Markow-Zustand ab und können offline durch Lösen semi-definiter Programme berechnet werden. Die invarianten Mengen werden dann online durch die MPR in Form von zusätzlichen quadratischen Zustandsbeschränkungen für den ersten Prädiktionsschritt berücksichtigt. Die resultierenden Optimierungsprobleme sind somit quadratisch beschränkte QP, welche effizient mit Solvern wie CPLEX gelöst werden können [5].

Anschließend wird skizziert, wie der präsentierte robuste MPR-Ansatz auf nichtlineare SMS erweitert werden kann. Dabei wird das SMS online um den aktuellen Zustand linearisiert. Die dabei entstehenden Unsicherheiten werden zuvor bei der Auslegung der invarianten Mengen mithilfe von Ansätzen für Systeme mit polytopischen Systemunsicherheiten und LPV-Verfahren berücksichtigt. Durch dieses Vorgehen bleiben die positiven Eigenschaften bzgl. der Rechenzeiten, Stabilität, Robustheit und rekursiver Zulässigkeit erhalten.

Eine Simulationsstudie zeigt anhand eines anwendungsnahen Beispiels die stabilisierenden Eigenschaften des MPR-Ansatzes und insbesondere den Einfluss der invarianten Mengen auf die rekursive Zulässigkeit und die Rechenzeit. Als Ausblick wird aufgezeigt, wie die vorgestellten Verfahren für eine verteilte, kooperative Regelung von Produktionsprozessen mit mehreren Produktionsschritten erweitert werden können.

## **Literatur:**

[1] O. L. V. Costa, M. D. Fragoso und R. P. Marques: Discrete-time Markow jump linear systems. Springer, 2005.

[2] D. Q. Mayne: Model predictive control: Recent developments and future promise. Automatica, Vol. 50, No. 12, S. 2967 - 2986, 2014.

[3] J. Tonne and M. Jilg and O. Stursberg: Constrained Model Predictive Control of High Dimensional Jump Markow Linear Systems. American Control Conference, Chicago, S. 2993 - 2998, 2015.

[4] J. Tonne und O. Stursberg: Constrained Model Predictive Control of Processes with Uncertain Structure Modeled by Jump Markow Linear Systems. In: Variable-Structure Approaches - Analysis, Simulation, Robust Control and Estimation of Uncertain Dynamic Processes, Springer, S. 335 - 361, 2016.

[5] J. Tonne und O. Stursberg: Constraint Robust Model Predictive Control for Jump Markow Linear Systems with Additive Disturbances. European Control Conference, Aalborg, S. 1315 - 1321, 2016.

# Die richtigen Systemtests zuerst – Regressionstesten in der Produktionsautomatisierung

Dipl.-Ing. Sebastian Ulewicz

Prof. Dr.-Ing. Birgit Vogel-Heuser

Lehrstuhl für Automatisierung und Informations-  
systeme  
Technische Universität München  
Boltzmannstr. 15, 85748 Garching bei München  
Telefon 089 289 16443  
Fax 089 289 16410  
ulewicz@ais.mw.tum.de

Lehrstuhl für Automatisierung und Informations-  
systeme  
Technische Universität München  
Boltzmannstr. 15, 85748 Garching bei München  
Telefon 089 289 16400  
Fax 089 289 16410  
vogel-heuser@ais.mw.tum.de

**Schlüsselwörter:** Systemtest, Regressionstest, Produktionsautomatisierung

Automatisierte Produktionsanlagen haben auf Grund langer Laufzeiten und hohen Kosten bei Ausfall oder Fehlfunktion strenge Qualitätsanforderungen. Sie werden stetig komplexer und immer häufiger nachgerüstet (Retrofit) oder erweitert, um an veränderte Kundenanforderungen angepasst zu werden [1]. Dies resultiert in einem immer höheren Ressourcenbedarf für die Qualitätssicherung bei der Wiederinbetriebnahme nach Änderungen oder Wartungsarbeiten. Seiteneffekte, die durch diese Änderungen des Systems entstehen sind häufig schwer zu überblicken [2]. Insbesondere negative Seiteneffekte, sogenannte Regressionen, müssen nach Möglichkeit mit Hilfe von Regressionstests identifiziert und behoben werden. Da diese wiederholten Systemtests, also Tests die das vollständig integrierte System betreffen, meist manuell vom Personal durchgeführt werden müssen, entsteht hier ein hoher Personalaufwand. Eine unstrukturierte Qualitätssicherung des vollständigen, zuvor bereits validierten Systems ist aus Kostengründen deswegen zu vermeiden. Stattdessen kann die Selektion und Priorisierung von Testfälle, die mit hoher Wahrscheinlichkeit neue Fehler aufdecken, den Prozess effizienter gestalten. Bei der manuellen Auswahl und Durchführung der Tests ist die Effizienz des Regressionstestprozesses jedoch sehr stark von dem Wissen, der Erfahrung und teils auch der Intuition des Testers abhängig, da bisher keine werkzeugunterstützte Entscheidungsgrundlage für den Tester vorhanden ist. Das Resultat sind lange Einarbeitungszeiten in die Funktionsweise der Maschine, sowie stark variierende Qualität bei der Genauigkeit der Qualitätssicherung.

Für dieses Problem wurden in der klassischen IT schon eine Vielzahl von Ansätzen vorgestellt [3], die jedoch für die Produktionsautomatisierung, insbesondere den Systemtest, nicht direkt übertragbar sind. Grund dafür sind unter anderem, dass die dort verwendeten Testfälle keine zyklische Abarbeitung von Programmen und in der Produktionsautomatisierung übliche manuelle Testvorgänge betrachten und die Methoden meist Voraussetzungen haben, die in der Produktionsautomatisierung nicht erfüllt werden können. Beispielsweise werden häufig keine Echtzeiteigenschaften betrachtet oder detaillierte Funktionsspezifikationen gefordert. Letztere werden auch von den in der Automatisierungstechnik oder Embedded Systems angesiedelte Forschungsarbeiten benötigen (z.B. [4]) und sind somit in vielen Fällen nicht ohne weiteres im industriellen Umfeld einsetzbar.

Aus diesem Grund wurde ein Konzept entwickelt (siehe Abbildung 1), dass mit Hilfe der Aufnahme und Analyse von Laufzeitdaten während der Testausführung eine Unterstützung bei der Wahl der richtigen Testfälle nach Änderungen unterstützt. Aufbauend auf dem Konzept des semi-automatischen, geführten Systemtest [5] können während der Testausführung sogenannte *Execution Traces* aufgenommen und den einzelnen Testfällen zugeordnet werden. Diese Daten beschreiben, welche Teile des Steuerungsprogramms während der Testausführung ausgeführt wurden und lassen so eine Zuordnung des Tests zu einem Teil der Software zu. Nach Änderungen des Systems können somit Testfälle besonders hoch priorisiert werden, die durch die Änderung beeinflusst sein könnten: vormals den jetzt geänderten Teil der Steuerungssoftware betreffende Testfälle zeigen mit besonders hoher Wahrscheinlichkeit ein verändertes Verhalten [6]. Schlagen diese Tests fehl, können somit Regressionen schnell aufgedeckt, behoben und der Regressionstests fortgesetzt werden.

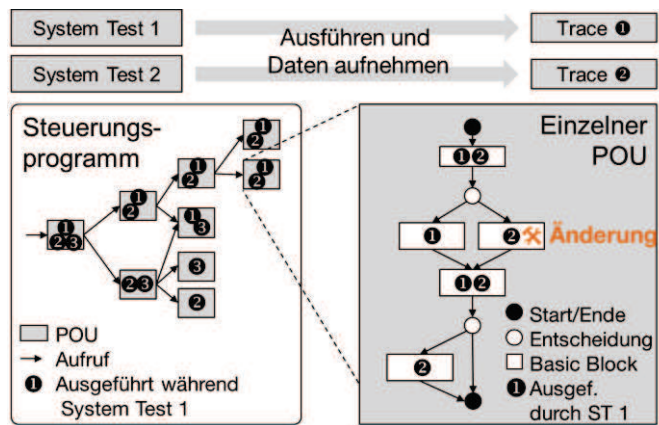


Abbildung 1: Systemtest 2 würde hier höher Priorisiert werden, da ein durch diesen Test vormals getesteter Teil der Steuerungssoftware geändert wurde.

Der vorgestellte Ansatz ermöglicht es erstmalig auch bei der Durchführung von Systemtests an Produktionsanlagen ohne aufwändige Zusatzdokumente eine Testabdeckungsabschätzung und Regressionstestpriorisierung durchführen zu können. Statt vollständig auf ihre Intuition zu bauen, wie es derzeit der Fall ist, kann für Entwickler und Inbetriebnehmer automatisierter Produktionsanlagen somit eine Entscheidungsgrundlage geschaffen werden, die im Testprozess Zeit sparen und Qualität steigern kann. Anhand von an industrielle Szenarien angelehnten Experimente an einer echten Industrieanlage und einer Expertenbefragung wird beschrieben, wie der Ansatz auch im Praxiseinsatz umsetzbar ist.

## Literatur:

- [1] B. Vogel-Heuser, A. Fay, I. Schaefer, and M. Tichy, "Evolution of software in automated production systems: Challenges and research directions," *J. Syst. Softw.*, vol. 110, pp. 54–84, Dec. 2015.
- [2] T. Jäger, A. Fay, T. Wagner, and U. Löwen, "Mining technical dependencies throughout engineering process knowledge," in *Emerging Technologies and Factory Automation*, 2011, pp. 1–7.
- [3] G. Rothmel and M. J. Harrold, "Analyzing regression test selection techniques," *IEEE Trans. Softw. Eng.*, vol. 22, no. 8, pp. 529–551, 1996.
- [4] P. Caliebe, T. Herpel, and R. German, "Dependency-Based Test Case Selection and Prioritization in Embedded Systems," in *IEEE International Conference on Software Testing, Verification and Validation*, 2012, pp. 731–735.
- [5] S. Ulewicz and B. Vogel-Heuser, "Guided Semi-Automatic System Testing In Factory Automation," in *International Conference on Industrial Informatics*, 2015.
- [6] S. Ulewicz and B. Vogel-heuser, "System Regression Test Prioritization in Factory Automation - Relating Functional System Tests to the Tested Code using Field Data," in *Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, 2016, pp. 1–8.

# Dynamisches Redeployment in Automatisierungsnetzen

Haitham Elfaham, Constantin Wagner, Ulrich Epple

Lehrstuhl für Prozessleittechnik  
RWTH Aachen

Turmstr. 46, 52064 Aachen

Tel: +49 241 80-95161

Fax: +49 241 80-92238

E-Mail: {h.elfaham, c.wagner, epple}@plt.rwth-aachen.de

**Schlüsselwörter:** Anwendungsverschiebung, Verteilungsalgorithmen, dezentrale Optimierung, Zustandsraummodell

Aktuell erfährt die Initiative „Industrie 4.0“ großes Interesse und Aufmerksamkeit. Ein wichtiger Aspekt der Initiative „Industrie 4.0“ ist die Wandelbarkeit der Produktion. Zur Realisierung der Wandelbarkeit muss sich die automatisierungstechnische Funktionalität dynamisch an die veränderten Strukturen anpassen können [1]. Im verteilten Netzwerk erfordert dies die Fähigkeit zum dynamischen Deployment und Redeployment der automatisierungstechnischen Dienste und Anwendungen. Wesentliche nichtfunktionale Eigenschaften hängen von der aktuellen Verteilung der Anwendungen im Netzwerk ab. So z.B. Verfügbarkeiten, maximale Reaktionszeiten, die Robustheit gegenüber Störungen, die Effizienz der Ressourcennutzung oder die Informationssicherheit. In klassischen Systemdesigns kann eine optimale Verteilung entwickelt und in der Engineeringphase fest konfiguriert werden. Im Umfeld der wandelbaren Systeme muss sich die Verteilung dynamisch an neue Situationen anpassen können. In diesem Vortrag werden die grundlegenden Aspekte des dynamischen Redeployments vorgestellt und klassifiziert. Anhand von einfachen Modellen werden die systemdynamischen Herausforderungen erläutert und Lösungsmöglichkeiten aufgezeigt.

Ausgangspunkt ist ein einfaches Referenzmodell der Verteilung und der Redeployment Prozedur. Grundlage ist die Abbildung des Automatisierungsnetzes in einem Graphen [2] (Abbildung 1). In diesem stellen die Knoten die (virtuellen) Devices und die Kanten die logischen Kommunikationsstrecken dar. Im einfachsten Fall sind alle Knoten gleichwertig und die Anwendungen können beliebig granular (wertekontinuierlich) auf die Knoten verteilt werden.

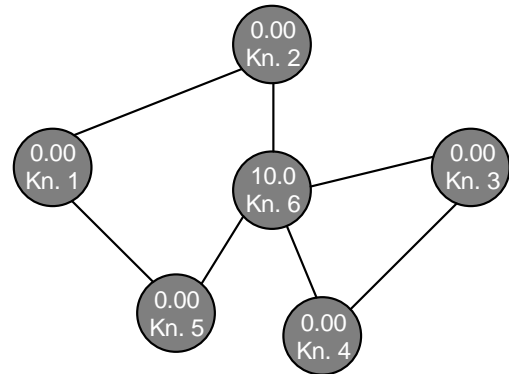


Abbildung 1: Beispielnetzwerk

Die Menge an Anwendungen auf einem Knoten bezeichnen wir als „Last“. Eine optimale Verteilung ist erreicht, wenn die Last auf allen Knoten gleich ist. Anhand dieses einfachen (und etwas unrealistischen) Verteilungsmodells werden verschiedene Redeployment Konzepte erläutert und analysiert.

Zunächst wird ein synchrones Verschieben von Lasten nach einem einfachen einstufigen dezentralen Relaxations-Algorithmus vorgestellt. In diesem Fall lassen sich analytische Aussagen zur Dynamik und Stabilität des Algorithmus ableiten. In Abbildung 2 ist die Antwort des oben dargestellten Netzwerks auf eine Impulslast am Knoten 6 für verschiedene Relaxationsfaktoren abgebildet.

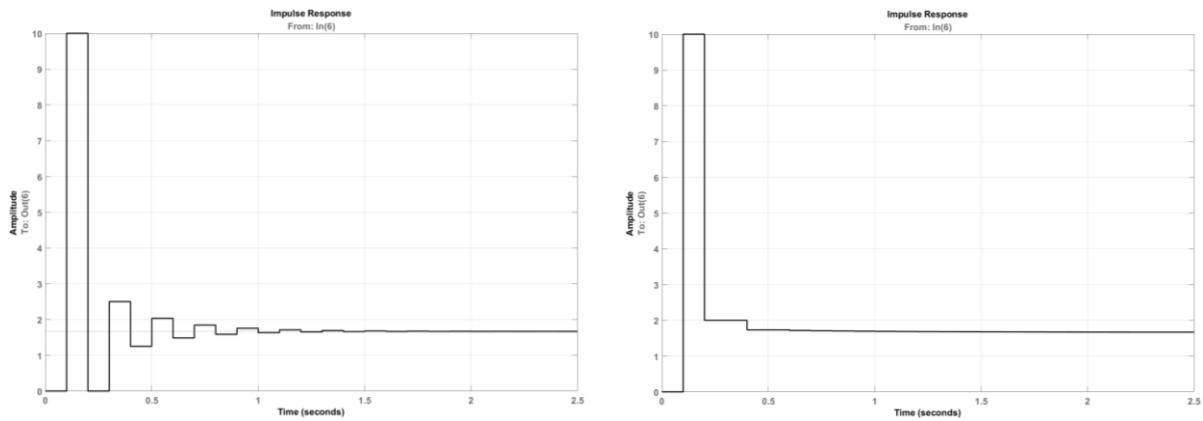


Abbildung 2: Impulsantwort des Knotens 6

Geht man mit dem Relaxations-Algorithmus auf wertediskrete Lastmodelle über, ergeben sich je nach Rundungsverfahren zusätzliche neue nichtlineare Effekte. Für komplexere Situationen kann auf Simulationsstudien zurückgegriffen werden.

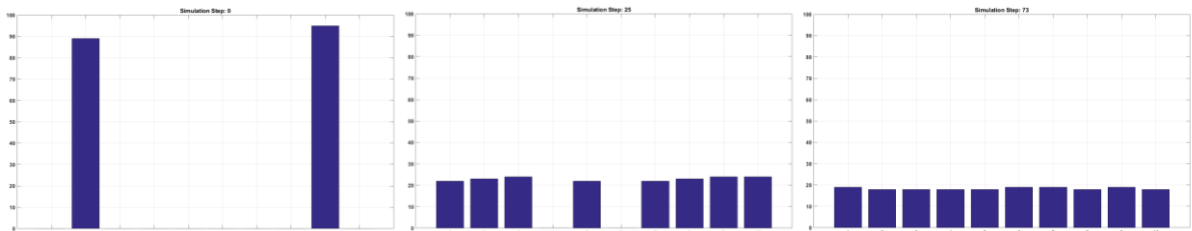


Abbildung 3: Anfang-, Zwischen und finale Verteilung des Ameisenalgorithmus

Am Beispiel des erweiterten Relaxationsmechanismus, des Flüssigkeitsalgorithmus [3] und des Ameisenalgorithmus [4,5,6] werden die Effekte erläutert. Für den Vergleich wurden Spezielle Benchmarks entwickelt [7]. Abbildung 3 zeigt die Simulation eines Ameisenalgorithmus an drei verschiedenen Zeitpunkten. Die auf den Knoten sitzende Anzahl der Lastpakete kann durch die Diskretisierung Abweichungen bis zu einem Paket pro Kante oder ein Grenzyklusverhalten aufweisen.

## Literatur:

- [1] Status Report- Reference Architecture Model Industrie 4.0 (RAMI4.0). VDI/VDE-Gesellschaft Mess- und Automatisierungstechnik, 2015.
- [2] John Adrian Bondy and Uppaluri Siva Ramachandra Murty. Graph theory with applications, volume 290. Citeseer, 1976.
- [3] H.-U. Heiss and M. Schmitz, "Decentralized dynamic load balancing: The particles approach," Information Sciences, vol. 84, no. 1, pp. 115–128, 1995.
- [4] Montresor, H. Meling, and Ö. Babaoglu, "Messor: Load-balancing through a swarm of autonomous agents," in Agents and Peer-to-Peer Computing. Springer, 2002, pp. 125–137.
- [4] J. Cao, "Self-organizing agents for grid load balancing," in Proceedings of the 5th IEEE International Workshop on Grid Computing. IEEE Computer Society, 2004.
- [6] John Adrian Bondy and Uppaluri Siva Ramachandra Murty. Graph theory with applications, volume 290. Citeseer, 1976.
- [7] Haitham Elfaham, Constantin Wagner, Sten Grüner, Lars Nothdurft, and Ulrich Epple. A modular benchmark for evaluating load distribution algorithms. In IECON 2016: The 42nd Annual Conference of IEEE Industrial Electronics Society, 2016.

# Automatisierte Bestimmung von Eigenschaften evolvierender Fertigungsanlagen

Jan Ladiges, M.Sc. \*

\* Institut für Automatisierungstechnik  
Helmut-Schmidt-Universität  
Holstenhofweg 85, 22043 Hamburg  
+49 (0)40 6541 - 3663  
+49 (0)40 6541 - 2004  
jan.ladiges@hsu-hh.de

Prof. Dr.-Ing. Alexander Fay \*\*

\*\* Institut für Automatisierungstechnik  
Helmut-Schmidt-Universität  
Holstenhofweg 85, 22043 Hamburg  
+49 (0)40 6541 - 2719  
+49 (0)40 6541 - 2004  
alexander.fay@hsu-hh.de

**Schlüsselwörter:** Anlagenevolution, Modell-Generierung, Prozessanalyse, Petrinetze

Fertigungsanlagen werden meist über Jahrzehnte betrieben und unterliegen dabei häufigem Wandel aufgrund geänderter gesetzlicher Anforderungen, geänderter Betreiberwünsche oder dem Einzug neuer Technologien im Rahmen von Verbesserungs- und Instandhaltungsmaßnahmen. Diese Änderungen betreffen die Mechanik, Elektrik und/oder die Steuerungssoftware zur Automatisierung der Anlage. Im Rahmen des DFG-Schwerpunktprogramms „Design for Future – Managed Software Evolution“ wird dies als Evolution von Produktionssystemen bezeichnet. Diese Evolution muss zum einen dokumentiert und zum anderen hinsichtlich der Anlageneigenschaften bewertet werden [1]. Der ideale Ansatz hierzu beinhaltet die folgenden Schritte [1]:

1. Informelle Änderung der Anforderungen an die Fertigungsanlage
2. Formalisierung der geänderten Anforderungen
3. Überführung in eine (formale) Systemspezifikation und Bewertung
4. Implementierung der geplanten und bewerteten Änderungen

Dieser Ansatz wird auch als Model-Driven-Engineering (MDE) bezeichnet. In der Praxis findet jedoch häufig eine direkte Implementierung der informellen Anforderungen statt, ohne Modelladaption oder Bewertung der Änderungen [2]. Die Gründe hierfür liegen in den Kosten- und Zeitrestriktionen zur Durchführung der Änderungen sowie im begrenzten Fachwissen des Personals, welches die Änderungen durchführt. Dieses in der Praxis häufige Vorgehen führt dazu, dass das tatsächliche Verhalten der Fertigungsanlage mehr und mehr von dem ursprünglichen Modell der Anlage abweicht und letzteres damit zunehmend entwertet wird. Im Rahmen des o.g. DFG-Schwerpunktprogramms wurde im Projekt „FYPA<sup>2</sup>C“<sup>1</sup> eine Methode erarbeitet, mit der das Modell einer Fertigungsanlage automatisch nachgepflegt werden kann und damit im laufenden Betrieb die Erfüllung funktionaler und nicht-funktionaler Anforderungen geprüft werden kann. Der in diesem Vortrag vorgestellte Ansatz folgt der Idee der automatisierten Modellgenerierung aus Beobachtungen des I/O-Verhaltens der Anlage [3]. Dabei wird davon ausgegangen, dass es sich um eine Fertigungsanlage handelt, die (überwiegend) mittels binären I/Os automatisiert ist, deren Flanken als Events mit Zeitstempel beobachtet werden können. Bestehende Algorithmen zur Modellgenerierung existieren bspw. im Bereich der Diagnose für Discrete-Event-Systems. Diese resultieren i.d.R. in Automaten oder Petri-Netzen, die sich zur Fehler- bzw. Anomalieerkennung sowie der Eingrenzung

---

<sup>1</sup> Forever Young Production Automation with Active Components (DFG-GZ FA 863/6-1 und LA 1061/X-1)



der Fehlerursachen eignen. Allerdings sind die resultierenden Modelle aufgrund ihres niedrigen Abstraktionsniveaus nicht geeignet für Analysen hinsichtlich typischer relevanter nicht-funktionaler Eigenschaften. Dem wirkt dieser Ansatz entgegen, indem er a-priori Informationen aus einem Informationsmodell nutzt [3]. Dieses Modell ist möglichst einfach gehalten und beinhaltet lediglich die Zuordnung von Signalen zu Anlagenteilen und die Signalbedeutung, z.B. *Sensor-Werkstückerkennung* für eine Lichtschranke oder einen Endlagenschalter. Der Eventverlauf der somit semantisch angereicherten Daten wird genutzt, um Verhaltensmodelle in Form von Petri-Netzen zu lernen, die verschiedene Systemaspekte wiedergeben (z.B. den Materialfluss durch die Anlage oder das Zustandsmodell einzelner Maschinen). Eine entsprechende Vorauswahl der relevanten Signale findet anhand von Preprocessing-Regeln statt, die allgemeingültig auf dem Informationsmodell definiert sind. Die Lernalgorithmen greifen auf das Meta-Modell des Informationsmodells zurück und sind daher anlagenübergreifend anwendbar.

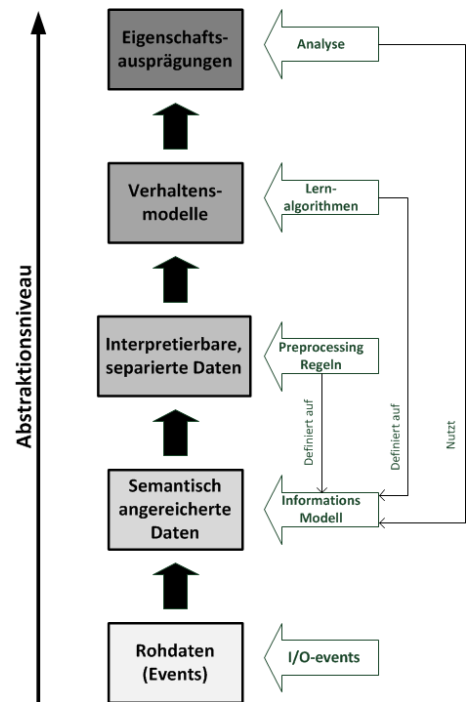


Abbildung 1: Workflow des Ansatzes

Die gelernten Modelle, können Sie zum einen genutzt werden, um Anomalien im Verhalten zu erkennen, indem zur Laufzeit beobachtetes Verhalten mit dem Verhalten der Modelle abgeglichen wird. Hierzu können vorhandene Methoden der Fehlerdiagnose angewandt werden. Zum anderen erlauben die Modelle eine Analyse hinsichtlich typischer nicht-funktionaler Eigenschaften des Systems. Beispiele hierfür sind verschiedene Performance-Indikatoren nach ISO/IEC 22400-2 [4] oder aber auch verschiedene Flexibilitätseigenschaften, vgl. [5].

Der Ansatz ermöglicht mit geringem manuellen Aufwand das Abstraktionsniveau von Analyseergebnissen automatisch generierter Verhaltensmodelle anzuheben. Somit kann eine Unterstützung der Anlagenevolution stattfinden.

## Literatur:

- [1] B. Vogel-Heuser, A. Fay, I. Schäfer, M. Tichy: *Evolution of software in automated production systems: Challenges and Research Directions*. Journal of Systems and Software, Vol. 110, 2015, S. 54–84.
- [2] M. Bellgran, K. Säfsen: *Production development: Design and operation of production systems*. London: Springer, 2010.
- [3] J. Ladiges, A. Fay, W. Lamersdorf: *Automated Determining of Manufacturing Properties and Their Evolutionary Changes from Event Traces*. Intelligent Industrial Systems, Vol. 2 (2), 2016, S. 163–178.
- [4] ISO 22400-2. *Automation systems and integration - Key performance indicators for manufacturing operations management - Part 2: Definitions and descriptions*, 2012.
- [5] A. Sethi, S. Sethi: *Flexibility in manufacturing: A survey*. International Journal of Flexible Manufacturing Systems, Vol. 2 (4), 1990, S. 289–328.



# Mechatronisches Design und Regelung eines 2D Kippspiegelsystems

Ernst Csencsics und Georg Schitter

Christian Doppler Labor für Präzisionstechnologie  
für automatisierte In-Line Messtechnik

Institut Automatisierungs- und  
Regelungstechnik (ACIN)

Technische Universität Wien

Gußhausstraße 27-29/E376

+43/1/58801/37602

{csencsics,schitter}@acin.tuwien.ac.at

**Schlüsselwörter:** Mechatronisches Systemdesign, Modellbasierte Regelung, Lissajous-Trajektorie

Kippspiegelsysteme (Fast Steering Mirrors, siehe Abb. 1) werden vielfach in unterschiedlichen Bereichen von Laser Scannern und optischen Kommunikationssystemen, über Lithographieanwendungen und konfokale Mikroskopie, bis hin zur Materialbearbeitung eingesetzt [1]. Für 2-dimensionale Scan-Anwendungen werden Kippspiegelsysteme häufig mit Rasterscantrajektorien verwendet [2], da diese im gesamten Scanbereich eine gleichmäßige Auflösung und eine konstante Scangeschwindigkeiten aufweisen. Nachteilig ist allerdings, dass für hohe Auflösungen und hohe Bildraten eine hohe Breite des mechatronischen Systems erforderlich ist, und stellt somit eine große Herausforderung für das mechatronische Systemdesign dar. Im Hinblick auf scannende Messanwendungen ist außerdem der linienweise Aufbau des Bildes von Nachteil, da Information über alle Bereiche des Scanfeldes erst nach einem kompletten Scan verfügbar ist.

Eine Alternative sind Lissajous-Trajektorien, die sich durch Ansteuern der orthogonalen Systemachsen mit je einem einzelnen Sinussignalen definierter Frequenz ( $f_x$  und  $f_y$ ) ergeben [3]. Diese erlauben bereits nach einem Bruchteil der Bildrate einen Gesamtüberblick über das Scanfeld, wobei die Auflösung schrittweise erhöht wird, und bieten durch die schmalbandige Anregung der individuellen Scanachsen zusätzliche Freiheitsgrade beim Systemdesign und beim Reglerentwurf.

Da bei Verwendung einer Lissajous Trajektorie jede Systemachse lediglich an einer einzigen Frequenz gutes Folgeverhalten aufweisen muss, kann die Regelung mittels eines  $H_\infty$ -Entwurfs entsprechend auf diese einzelne Frequenz (single tone) ausgelegt werden. Zusätzlich können koppelungsbedingte Störungen zwischen beiden Scanachsen durch einen entsprechenden Reglerentwurf (dual tone control) unterdrückt werden [4]. Die schmalbandige Rückkoppelung des Dual-Tone-Reglers führt dabei unter anderem zu einer Reduktion des rückgekoppelten Sensorrauschens

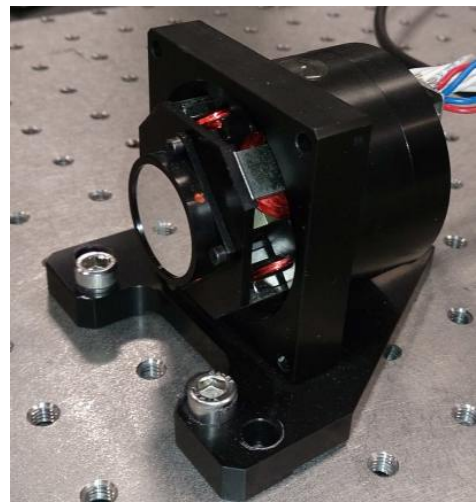


Abb. 1 Konventionelles Lorentz-aktuiertes Kippspiegelsystem mit kardanischer Aufhängung zur Positionierung in 2 Freiheitsgraden.

und reduziert somit die verbleibende Positionierungsunsicherheit der Kippspiegelsystems. Im Vergleich zu einer Rastertrajektorie des Kippspiegelsystems mit PID Reglern kann bei gleicher räumlicher Auflösung (siehe Abb. 2) der RMS Folgefehler bei Verwendung einer Lissajous-Trajektorie mit dem Dual-Tone-Regler um eine Größenordnung reduziert werden. Weiters kann die maximale räumliche Auflösung bei gleichbleibender Bildrate auf das Dreifache erhöht werden.

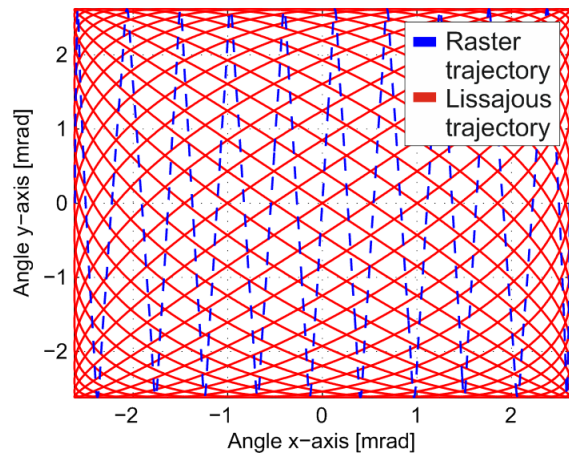


Abb. 2 Vergleich zwischen Raster-Scan und Lissajous Trajektorien mit gleicher räumliche Auflösung.

In einem zweiten Schritt wird das mechatronische Systemdesign an die Zieltrajektorie angepasst, um zusätzlich die Energieeffizienz des Kippspiegelsystems zu steigern, da die Stromaufnahme der Aktuatoren und die damit verbundene Energiedissipation in den Spulen die erreichbare Scan-Amplitude limitiert.

Durch eine gezielte Verschiebung der fundamentalen Resonanzfrequenz der jeweiligen Scanachse, mittels Einstellung der jeweiligen Aufhängungsteifigkeit, wird durch die Resonanzüberhöhung an den Ansteuerfrequenzen die Verstärkung der Strecke erhöht, wodurch für die gleiche Scanamplitude ein signifikant kleineres Ansteuersignal ausreicht. Experimentell wird demonstriert, dass die Stromaufnahme der Lorentz-Aktuatoren des modifizierten Kippspiegelsystems um einen Faktor 10 reduziert werden kann, was einer 100-fachen Reduktion der in den Aktuatorspulen dissipierten Leistung entspricht. Im Umkehrschluss kann die maximale Scan-Amplitude um einen Faktor 7.7 erhöht werden, was einer Vergrößerung des Scan-Bereichs um das 60-fache entspricht.

## Literatur

- [1] D. J. Kluk, M. T. Boulet, and D. L. Trumper, A high-precision, two-axis steering mirror with moving iron actuator. *Mechatronics*, vol. 22, no. 3, pp. 257, 2012.
- [2] G. Schitter, Improving the Speed of AFM by Mechatronic Design and Modern Control Methods. *tm-Technisches Messen Plattform für Methoden, Systeme und Anwendungen der Messtechnik*, vol. 76, no. 5, pp. 266.
- [3] T. Tuma, J. Lygeros, V. Kartik, A. Sebastian and A. Pantazi, Highspeed multiresolution scanning probe microscopy based on Lissajous scan trajectories. *Nanotechnology*, vol. 23, no. 18, pp. 185501, 2012.
- [4] E. Csencsics, R. Saathof and G. Schitter, Design of a dual-tone controller for Lissajous-based scanning of fast steering mirrors. 2016 American Control Conference, Boston, MA, 2016

# Robust Control of a Hydraulic Cylinder using Observer-based Nonlinear Controllers: Theoretical Development and Experimental Validation

Fateme Bakhshande \*

\* Lehrstuhl Steuerung, Regelung und Systemdynamik  
Universität Duisburg-Essen  
Lotharstr. 1, 47057, Duisburg  
E-Mail: fateme.bakhshande@uni-due.de

Dirk Söffker \*\*

\*\* Lehrstuhl Steuerung, Regelung und Systemdynamik  
Universität Duisburg-Essen  
Lotharstr. 1, 47057, Duisburg  
E-Mail: soeffker@uni-due.de

**Schlüsselwörter:** Position control, Proportional-Integral-Observer, sliding mode control, backstepping control

Hydraulic cylinders are actuators with strongly nonlinear behavior. They are widely used in several industrial areas, such as heavy machines, cranes, robots, and so on. The dynamical behavior of hydraulic differential cylinders can be described by a coupled set of nonlinear differential equations. Motion control of power trains, drive trains, or even actuators has been in the focus of several scientific and industrial efforts of the last decade. Advanced control approaches are based on knowledge (models resp.) about the system to be controlled, realized by mathematical models (e. g. sets of differential equations).

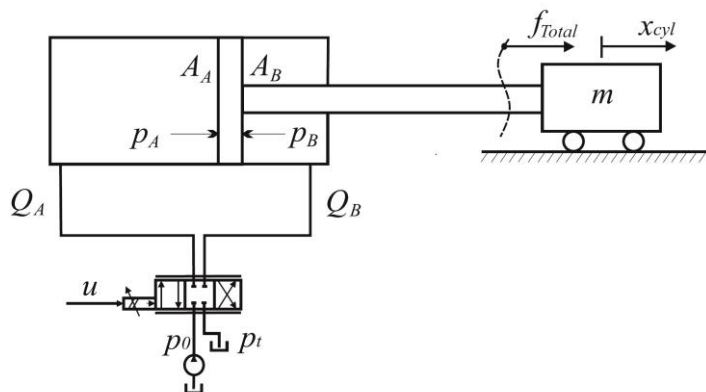


Figure 1: Sketch and test rig of hydraulic cylinder system

This contribution focuses on the design of an observer-based sliding mode controller as well as observer-based backstepping controller for systems with mismatched uncertainties to assure tracking performance and to improve robustness against unknown inputs.

The key property of the proposed approaches is that neither direct measurements of the disturbances are needed, nor measurements of the system states are used. Modeling errors and disturbances are estimated as unknown inputs together with the

system states using a high-gain Proportional-Integral-Observer [1,2]. Estimations achieved by PI-Observer scheme are integrated to an advanced design of robust nonlinear controllers (sliding mode and backstepping controllers) to improve the tracking error performance. Detailed examination shows the performance behavior with respect to practical aspects, represented by noisy measurements as well as unknown (dynamical) process forces acting to the motion system.

Evaluation of the proposed method is experimentally shown using a hydraulic differential cylinder test rig [3]. Experimental results validate the advantages of the introduced combined approaches in comparison to industrial standard approach (P-Controller). The introduced approaches show significant theoretical and practical advantages with respect to all criteria relevant for industrial applications like less sensitivity or improved robustness with respect to model uncertainties and/or noise. Comparison of observer-based sliding mode controller and observer-based backstepping controller in the sense of robustness against disturbances and measurement noise has been also detailed based on experimental results of the hydraulic differential cylinder test rig.

### **Literatur der Autoren zum Nachlesen:**

- [1] Bakhshande, F. and Söffker, D. "*Reconstruction of Nonlinear Characteristics by Means of Advanced Observer Design Approaches.*" ASME 2015 Dynamic Systems and Control Conference. American Society of Mechanical Engineers, 2015.
- [2] Bakhshande, F.; Söffker, D. "*Proportional-Integral-Observer: A brief survey with special attention to the actual methods using ACC Benchmark.*" IFAC-PapersOnLine, Vol. 48(1), 2015, pp. 532-537.
- [3] Bakhshande, F. and Söffker, D. "*Robust Control Approach of a Hydraulic Differential Cylinder System using a Proportional-Integral-Observer-based Backstepping Control.*" American Control Conference (ACC), Seattle, WA, USA, May 24-26, 2017, submitted.

# Vorausschauende Störgrößenaufschaltung für die Schwingungsdämpfung am Viertelfahrzeug

Johannes Strohm \*

\* Lehrstuhl für Regelungstechnik  
Technische Universität München  
Boltzmannstraße 15, Garching  
Telefon: +49 89 289 15659  
Fax: +49 89 289 15653  
E-Mail: johannes.strohm@tum.de

Boris Lohmann \*\*

\*\* Lehrstuhl für Regelungstechnik  
Technische Universität München  
Boltzmannstraße 15, Garching  
Telefon: +49 89 289 15610  
Fax: +49 89 289 15653  
E-Mail: lohmann@tum.de

**Schlüsselwörter:** Aktive Fahrwerksdämpfung, vorausschauende Steuerung, optimale Steuerung, FIR-Filter

Im Zuge der Entwicklung hin zum autonomen Fahren wandeln sich auch die Ansprüche der Kunden an die Fahrzeuge: Da dem Fahrer immer mehr Fahraufgaben abgenommen werden, wird zukünftig immer weniger der Fahrspaß in Form von sportlichem Fahrverhalten im Fokus stehen, sondern vielmehr ein möglichst komfortables Reisen, sodass die Insassen wie auf einem „fliegendem Teppich“ während der Fahrt arbeiten oder das Entertainmentsystem genießen können [1]. Bei herkömmlichen passiven Fahrwerken, bestehend aus einer Feder und einem Dämpfer, erfordert die Maximierung des Komforts eine weiche Feder und eine niedrige Dämpfungskonstante. Dies verschlechtert jedoch den Rad-Boden-Kontakt, sodass Quer- und Längskräfte unzureichend übertragen werden und die Fahrsicherheit leidet. Bei der Auslegung passiver Fahrwerke muss daher immer ein Kompromiss zwischen Fahrkomfort und Fahrsicherheit eingegangen werden. Um diesen Zielkonflikt etwas zu entschärfen und die steigenden Komfortansprüche decken zu können, werden *aktive* und *semiaktive* Komponenten im Federbein verbaut. Durch eine geeignete Steuerung oder Regelung lässt sich so der Komfort, bei gleichbleibender oder sogar verbesserter Fahrsicherheit erhöhen.

Durch die für das autonome Fahren benötigte Umfeldsensorik, wird es in Zukunft auch immer genauere Daten über die Oberflächenbeschaffenheit der Straße vor dem Fahrzeug geben. Die Straßenanregung stellt im Falle der Vertikaldynamikregelung die Störgröße dar. Ist diese bekannt, so lässt sich eine *Störgrößenaufschaltung* umsetzen, welche – anders als eine Regelung – nicht erst reagiert, wenn das Fahrzeug bereits angeregt wurde, sondern im Vorfeld einer Störung beginnt, die Aktuatorik im Federbein zu betätigen. Solch eine vorausschauende Störgrößenaufschaltung wird in diesem Beitrag vorgestellt.



Abbildung 1: Viertelfahrzeugprüfstand



Hierfür wird zunächst eine *optimale vorausschauende Steuerung über FIR-Filter* eingeführt. Diese basiert auf einem Impulsantwortmodell der Systemdynamik und wird ähnlich wie in Dynamic Matrix Control (siehe [2]) über die Minimierung eines quadratischen Gütemaßes erstellt. Im nächsten Schritt wird vorgestellt, wie diese Steuerung mit der klassischen „dynamischen Störgrößenaufschaltung“ für lineare SISO-Systeme (vgl. [3]) kombiniert werden kann, sodass eine *optimale vorausschauende Störgrößenaufschaltung* entsteht.

Für die Anwendung zur Schwingungsdämpfung wird daraufhin das verwendete lineare Modell des Viertelfahrzeug vorgestellt und auf einige frei vorgebbare Parameter eingegangen. Die Leistungsfähigkeit der Aufschaltung in Abhängigkeit der Parameter wird zuerst simulativ analysiert bevor die Ergebnisse der Validierung des Konzeptes am lehrstuhleigenen Viertelfahrzeugprüfstand (siehe Abbildung 1) für einige ausgewählte Parameterkonfigurationen präsentiert werden. Abschließend werden diese mit der Performance bekannter Regelansätze wie Skyhook-Regler oder LQR verglichen.

## **Literatur:**

- [1] J. Becker, „Auf der Suche nach dem perfekten Fahrwerk,“ *Süddeutsche Zeitung*, Nr. 18.06.2016, 2016.
- [2] C. R. Cutler und B. L. Ramaker, „Dynamic matrix control - A computer control algorithm,“ *Joint Automatic Control Conference*, 1980.
- [3] G. Ludyk, *Theoretische Regelungstechnik 1*, Berlin; Heidelberg: Springer, 1995.

# Plenoptische Bildaufnahme und –Auswertung zur automatischen Sichtprüfung transparenter Objekte

Johannes Meyer<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Lehrstuhl für Interaktive Echtzeitsysteme IES  
Karlsruher Institut für Technologie KIT  
Adenauerring 4, 76131 Karlsruhe  
Telefon: +49 (0) 721 6091-482  
johannes.meyer@kit.edu

Jürgen Beyerer<sup>2,1</sup>

<sup>2</sup> Fraunhofer Institut für Optronik,  
Systemtechnik und Bildauswertung IOSB  
Fraunhoferstraße 1, 76131 Karlsruhe  
Telefon: +49 (0) 721 6091-210  
juergen.beyerer@iosb.fraunhofer.de

**Schlüsselwörter:** Sichtprüfung transparenter Objekte; plenoptische Bildverarbeitung

Transparente Materialien kommen in diversen Produkten zum Einsatz und müssen zur korrekten Erfüllung ihres Zwecks oft hohen Qualitätsansprüchen genügen. Dazu müssen diese Materialien frei sein von absorbierenden und streuenden Einschlüssen wie opaken Partikeln oder Luftblasen, ihre Oberfläche muss intakt sein und darf keine Kratzer aufweisen und ihre geometrische Gestalt sowie die örtliche Verteilung des Brechungsindexes dürfen keine zu großen Abweichungen haben. Je nach Anwendungsgebiet können diese Fehler gravierende Folgen haben, weswegen eine Qualitätskontrolle in Form einer Sichtprüfung unabdingbar ist. Für Menschen ist diese Prüfaufgabe ermüdend und fehleranfällig, weshalb automatisierte Lösungen gefunden werden müssen.

Für einige der genannten Defekttypen existieren bereits ausgereifte automatisierte Inspektionsverfahren [1,2]. Die Detektion von streuenden Defekten ist ein schwieriges Problem, da sich diese Defekte nicht in einer Intensitätsänderung des transmittierten Lichts äußern, sondern in der Verteilung der Richtung ausgehender Lichtstrahlen (siehe Abb. 1).

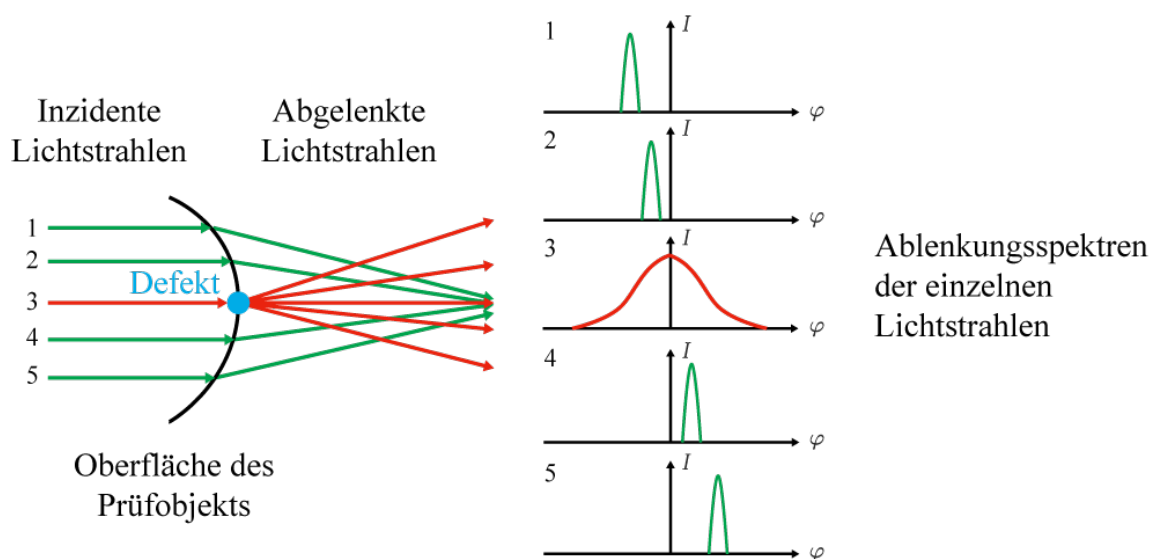
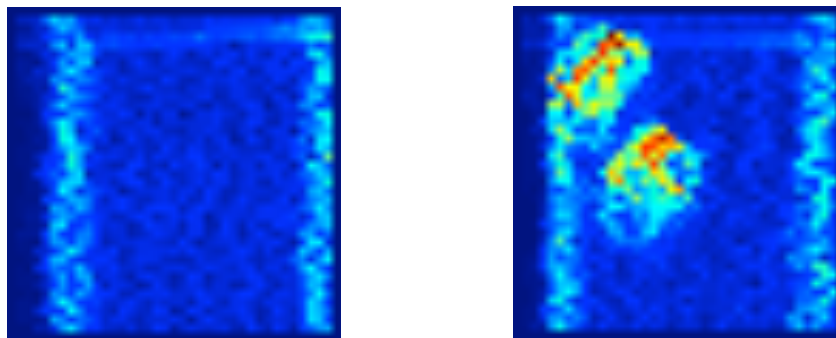


Abbildung 1: Einfluss streuender Defekte auf den örtlichen Verlauf der Ablenkungsspektren aus dem Prüfobjekt austretender Lichtstrahlen.

Herkömmliche Bildaufnahmesysteme erfassen hochaufgelöst den zweidimensionalen Ort und eher niedrig aufgelöst die spektrale Zusammensetzung scharf abgebildeter Lichtbündel. Plenoptische Systeme, wie beispielsweise Lichtfeldkameras, sind außerdem empfindlich für die Richtungskomponente eingefangener Lichtbündel. Diese zusätzliche Information kann für die Detektion streuender Defekte genutzt werden.

Mit plenoptischen Systemen können insbesondere die Verteilungen der Richtungen aus dem Prüfobjekt austretender Lichtstrahlen, sogenannte Ablenkungsspektren, erfasst werden. Treten zwischen benachbarten Ablenkungsspektren Unstetigkeiten auf, kann das ein Hinweis auf einen streuenden Defekt sein (siehe Abb. 1). Allerdings führt auch die Geometrie des Prüfobjekts selbst zu örtlichen Änderungen der Austrittsrichtung des eingestrahnten Lichts.

Dieser Beitrag beschreibt, wie zur Detektion der örtlichen Unstetigkeiten zwischen den zweidimensionalen Ablenkungsspektren Methoden der Vektoranalysis oder Verfahren zur Berechnung von Histogrammdistanzen verwendet werden können [3,4]. Des Weiteren wird ein Prototyp eines Laserscanners zur Erfassung von Ablenkungsspektren vorgestellt und die Eignung der angesprochenen Verfahren anhand erster Experimente gezeigt (siehe Abb. 2).



*Abbildung 2: Inspektionsergebnisse basierend auf den mit Hilfe eines Laserscanners erfassten und entsprechend verarbeiteten Ablenkungsspektren. Als Prüfobjekt wurde eine Zylinderlinse verwendet, die im defektfreien Zustand (links), sowie nach Einbringung zweier streuender Oberflächendefekte (rechts) geprüft wurde.*

## **Literatur:**

- [1] M. Hartrumpf und R. Heintz: "Device and method for the classification of transparent components in a material flow", Patent WO 2009/049594 A1, 2009.
- [2] J. Meyer: "Overview on Machine Vision Methods for Finding Defects in Transparent Objects", In "Proceedings of the 2015 Joint Workshop of Fraunhofer IOSB and Institute for Anthropomatics, Vision and Fusion Laboratory", S. 103-112, 2016.
- [3] J. Meyer, T. Längle und J. Beyerer "About the Acquisition and Processing of Ray Deflection Histograms for Transparent Object Inspection", In "Irish Machine Vision & Image Processing Conference Proceedings", S. 9-16, 2016
- [4] J. Meyer, T. Längle und J. Beyerer "Acquiring and Processing Light Deflection Maps for Transparent Object Inspection", In "2016 2nd International Conference on Frontiers of Signal Processing (ICFSP 2016)", S.104-109, 2016



# Registrierung stabiler Merkmale zur Regularisierung des optischen Flusses bei der erscheinungsbasierten Schätzung der 3D-Kopfpose

Sebastian Vater

Institut für Industrielle Informationstechnik  
Karlsruher Institut für Technologie  
Hertzstraße 16, 76187 Karlsruhe  
Tel. +49 721 608 44518  
Fax +49 721 608 44500  
sebastian.vater@kit.edu

Fernando Puente León

Institut für Industrielle Informationstechnik  
Karlsruher Institut für Technologie  
Hertzstraße 16, 76187 Karlsruhe  
Tel. +49 721 608 44521  
Fax +49 721 608 44500  
info@iit.kit.edu

**Schlüsselwörter:** Erscheinungsbasierte Kopfposenschätzung, optischer Fluss, Regularisierung, projektive Transformation, stabile Merkmale.

Die dreidimensionale Kopfposenschätzung stellt einen wichtigen Aspekt der Mensch-Maschine-Interaktion dar. Sie findet Anwendung in der Gesichtsdetektion sowie Gesichtserkennung, in der Emotionserkennung, der Bildregistrierung und ist notwendig für eine kopfposeninvariante Blickrichtungsschätzung. Um eine möglichst breite Anwendung zu ermöglichen, wurden im Rahmen dieser Arbeit Verfahren erforscht, die auf einfache Hardware, wie etwa Webcams, zurückgreifen.

Um aus 2D-Bilddaten die Kopfpose zu schätzen, ist die Berechnung des optischen Flusses [1] ein häufiger Ansatz [2, 3]. Bestehende Systeme basierend auf der Berechnung des optischen Flusses nutzen dabei parametrische Modelle zur Beschreibung der Geometrie des Kopfes sowie veränderlicher Beleuchtungsbedingungen [2, 4]. Zur Stabilisierung der Kopfposenberechnung durch Bildregistrierung wurde die Verwendung eines konstanten Regularisierungsterms vorgeschlagen [3].

Die durch das Aperturproblem entstehenden Ambiguitäten bei der Berechnung des optischen Flusses verursachen Ungenauigkeiten bei der Auflösung nach der Bewegung, die schließlich zu einer fehlerhaften Schätzung der Kopfpose führen [5].

Mathematisch drückt sich das Aperturproblem in einer schlecht konditionierten Hessematrix  $H$  bei der Berechnung der inkrementellen sechsdimensionalen Posenänderung, welche den Zustand des Kopfes im dreidimensionalen Raum durch drei Translationen und drei Rotationen beschreibt, aus.

Durch Hinzufügen eines konstant gewichteten Regularisierungsterms zur Hessematrix mit einem Skalar  $\lambda$  kann zwar die Konditionszahl gesenkt und die Stabilität erhöht werden [3]; die Kopfposenschätzung ist allerdings weiterhin unzureichend und führt insbesondere bei Drehbewegungen aus der Bildebene hinaus zu einem Abbruch des Trackings [5]. Der zur Regularisierung verwendete Term ist hierbei abhängig vom Bildgradienten sowie der Jacobimatrix der Warpingfunktion innerhalb des optischen Flusses, welche durch die *Steepest Descent Images (SD)* beschrieben wird.

Aufbauend auf einer bewegungsabhängigen Regularisierung [5] soll eine Möglichkeit zur adaptiven Bestimmung der Regularisierungsparameter

$$\lambda = (\lambda_{\text{roll}}, \lambda_{\text{yaw}}, \lambda_{\text{pitch}}, \lambda_x, \lambda_y, \lambda_z)^T$$

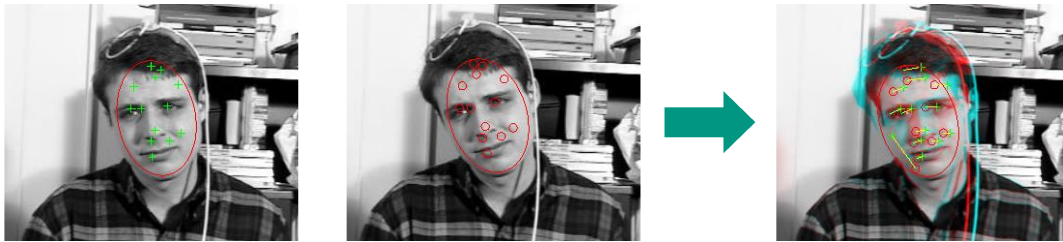
vorgestellt werden.

Mit  $L = I_{6 \times 6} \lambda$  lässt sich dann die neue Hessematrix als

$$H_{\text{Reg,konv}} = H + L S D^T L S D$$

schreiben.

Um  $L$  zu bestimmen, wird durch Registrierung stabiler Punkte in aufeinanderfolgenden Frames eine Homographiematrix bestimmt, welche eine perspektivische Transformation zugeordneter Punkte beschreibt. Abbildung 1 zeigt die Zuordnung von Merkmalspunkten beispielhaft über zwei Frames eines Videos.



*Abbildung 1: Zuordnung von Merkmalspunkten über zwei Frames.*

Durch Auflösen der Homographie wird eine Schätzung der einzelnen Bewegungen durchgeführt, welche dann mit Hilfe eines Modells auf die Regularisierungsparameter abgebildet werden.

## Literatur

- [1] B. D. Lucas und T. Kanade, An iterative image registration technique with an application to stereo vision, in Int. Joint Conf. Artificial Intelligence, vol. 81, 1981, S. 674–679.
- [2] G. D. Hager und P.N. Belhumeur, Efficient region tracking with parametric models of geometry and illumination, IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol. 20, no. 10, S. 1025–1039, 1998.
- [3] J. Xiao, T. Moriyama, T. Kanade und J. F. Cohn, Robust full-motion recovery of head by dynamic templates and re-registration techniques, Int. J. Imaging Systems and Technology, vol. 13, no. 1, S. 85–94, 2003.
- [4] M. La Cascia, S. Sclaroff und V. Athitsos, Fast, reliable head tracking under varying illumination: An approach based on registration of texture-mapped 3D models, IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol. 22, no. 4, S. 322–336, 2000.
- [5] S. Vater, G. Mann und F. Puente León, A novel regularization method for optical flow based head pose estimation, in Automated Visual Inspection and Machine Vision, J. Beyerer und F. Puente León (Hrsg.), vol. 9530 of Proceedings of SPIE, Bellingham, 2015.

# Regelung nicht-resonanter Mikrospiegel mit elektrostatischem Kammantrieb

Richard Schroedter \*

\*Aktive Mikrooptische Komponenten und Systeme (AMS)

Fraunhofer Institut für Photonische Mikrosysteme  
Maria-Reiche-Str. 2, 01109 Dresden  
Tel.: +49 351 8823 196  
Fax: +49 351 8823 266  
richard.schroedter@ipms.fraunhofer.de

Klaus Janschek \*\*

\*\* Fakultät Elektrotechnik und Informationstechnik /  
Institut für Automatisierungstechnik  
Technische Universität Dresden  
01062 Dresden  
Tel.: +49 351 463 34025  
Fax: +49-351 463-37039  
klaus.janschek@tu-dresden.de

**Schlüsselwörter:** Regelung quasi-statischer elektrostatischer Mikrospiegel, flachheitsbasierte Folgeregelung, Gleitzustandsregelung.

Mikrospiegel haben ein breites Anwendungsspektrum wie z.B. in der Medizintechnik, Automobiltechnik und Verpackungsindustrie. Aufgrund ihrer kleinen Baugröße lassen sich insbesondere für miniaturisierte Laserscanner und Projektoren in Spektrometern, an Faserenden von Endoskopen oder auch in Virtual Reality-Brillen und Head-up Displays einsetzen. Die am Fraunhofer Institut für Photonische Mikrosysteme (FhG-IPMS) entwickelten elektrostatischen Mikroscannerspiegel werden in einem CMOS-kompatiblen Fertigungsprozess hergestellt und erreichen große mechanische Auslenkungswinkel von über  $\pm 10^\circ$ . In einer neuartigen Technologie lassen sich mit vertikalen Kammantrieben sowohl resonante als auch quasi-statische (nicht-resonante) Scanbewegungen realisieren [1,2].

Für eine hochdynamische und präzise Positionierung und Trajektorienfolge muss das nur schwach gedämpfte Mikrospiegelsystem aktiv gesteuert bzw. geregelt werden (Abbildung 1). Zunächst wird ein physikalisches Modell für das Mikrospiegelsystem gebildet, welches die intrinsischen Nichtlinearitäten des elektrostatischen Kammantriebes und der mechanischen Torsionsfeder enthält. Anhand von FEM-Simulationen kann die Torsionsträgheit und die Federnichtlinearität abgeschätzt werden. Da eine direkte Messung der Kammkapazitäten aufgrund des unbekanntenen Widerstands- und Kapazitätsnetzwerkes nicht möglich ist, werden die Kapazitätsänderungen aus der statischen Auslenkungskennlinie zusammen mit der linearen Steifigkeit aus der Abklingkennlinie messtechnisch bestimmt. Das in Matlab/Simulink implementierte nichtlineare Modell dient als Grundlage für den weiteren Steuerungs- und Regelungsentwurf. Da das Mikrospiegelsystem differentiell flach ist, lässt sich die

flachheitsbasierte Regelungstheorie [3,4] anwenden. Darin werden für ein System 2. Grades Trajektorien mit 5. Polynomordnung vorgegeben. Im Gegensatz dazu wird in unserer Arbeit für die Folge von dreieck- und sägezahnförmigen

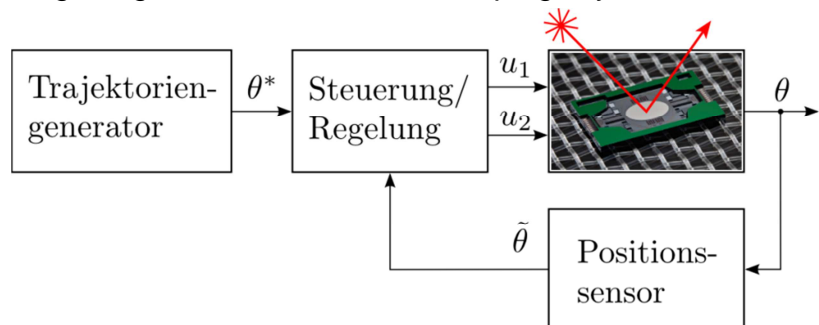


Abbildung 1: Regelkreis des quasi-statischen Mikrospiegels

Trajektorien mit linearen Segmenten ein ruckbegrenzter Entwurf mit Polynomen 3. Ordnung verfolgt, der sich insbesondere für die Berücksichtigung der Begrenzungen durch die Pull-In-Spannung eignet.

Im Hinblick auf schnelle Scannerspiegel mit großen Eigenfrequenzen von mehreren Kilohertz wird ein linearer robuster PID-Regler vorgestellt, der sich damit auch analog realisiert werden kann. Deutlich bessere Ergebnisse werden mit den nichtlinearen Regelungsmethoden erzielt, die die differentielle Flachheit des Systems ausnutzen und das nichtlineare System exakt linearisieren. Dahingehend wird eine flachheitsbasierte Folgeregelung, sowie eine Gleitzustandsregelung entworfen, die letztlich eine nur Erweiterung des flachheitsbasierten Reglers darstellt. Zur Zustandsrückführung wird sowohl ein Normalformbeobachter als auch ein High-Gain-Beobachter untersucht. Zuletzt wird eine Variante mit reduziertem Implementierungsaufwand gegenübergestellt, die sich für die Umsetzung in einem Mikrocontroller mit begrenzter Rechenleistung eignet. Zur Verifikation werden die Regelungsverfahren mit einem dSPACE-Echtzeitsystem an realen Mikrosiegeln getestet und verglichen. Die Spiegelposition wird optisch mit einem PSD gemessen. Schließlich werden die Ergebnisse aus dem simulativen und experimentellen Vergleich der entworfenen Regelungsverfahren zusammengefasst und ein Ausblick zu iterativen Verfahren gegeben.

## Literatur:

- [1] T. Sandner, D. Jung, D. Kallweit, T. Grasshoff and H. Schenk, "Microscanner with vertical out of plane combdrive," Optical MEMS and Nanophotonics (OMN), 2011 International Conference on, Istanbul, 2011, pp. 33-34
- [2] Jung, D.: Neuartiges Bauteilkonzept quasistatisch-resonanter 2D-Mikroscanner für die Zielanwendung ultrakompakter Laserprojektionsdisplays. Dissertation, Technischen Universität Dresden, 2012
- [3] Rothfuß, R.; Rudolph, J.; Zeitz, M.: Flachheit - Ein neuer Zugang zur Steuerung und Regelung nichtlinearer Systeme. *at-Automatisierungstechnik* 45 (1997), S. 517–524
- [4] Rouchon, P., Fliess, M., Lévine, J., & Martin, P. (1993, December). Flatness, motion planning and trailer systems. In *Decision and Control, 1993., Proceedings of the 32nd IEEE Conference on* (pp. 2700-2705). IEEE

# Cars and Smarter Cities: New Services, New Applications for Control

Prof. Robert Shorten

Prof. of Control Engineering and Decision Science

University College Dublin

Belfield, Dublin 4

Ireland

+353 1 716 1964

[robert.shorten@ucd.ie](mailto:robert.shorten@ucd.ie)

The automotive industry is probably experiencing its most disruptive period since the invention of the diesel engine. Driven by new technologies, advances in mathematics, increasingly stringent regulation, new and disruptive business models, changing consumer demands, as well as a desire to make our cities smarter, more efficient, and cleaner, automotive OEM's are searching for new ways to re-imagine and monetize their products. At the forefront of this innovation is the search for new Smart Mobility and Smart City services that can be delivered to and from vehicles, and the resulting partnerships between traditional automotive OEM's and other non-traditional automotive industries. Research questions arising in this context driving exciting new activities in a number of disciplines. Among these, Control Theory has much to offer, and much to gain as a discipline, by embracing some of the questions that are of concern as planners and municipalities re-imagine our cities. In this talk, I will discuss several such applications. Topics to be covered include: eco-driving in an IoT context; the design of car parks in the context of collaborative consumption (shared economy) models; and car enabled infrastructure concepts. New distributed control algorithms for IoT applications, will be presented and time permitting, several open challenges will be enunciated and the suitability of classical controllers discussed for smart city applications.

# Modellreduktion und Reglerentwurf für einen thermischen Festbettapeicher

Lorenz Pyta \*

Dirk Abel \*\*

\* Institut für Regelungstechnik  
RWTH Aachen  
Steinbachstraße 54, 52074 Aachen  
Tel. 0241 80 27539  
Fax 0241 80 22296  
L.Pyta@irt.rwth-aachen.de

\*\* Institut für Regelungstechnik  
RWTH Aachen  
Steinbachstraße 54, 52074 Aachen  
Tel. 0241 80 27501  
Fax 0241 80 22296  
D.Abel@irt.rwth-aachen.de

**Schlüsselwörter:** Modellreduktion, verteilt-parametrische Systeme, Wärmespeicher

Solarthermische Kraftwerke bieten gegenüber vielen anderen Formen der regenerativen Energieerzeugung wie z.B. Windkraftwerken den Vorteil der effizienten Speicherbarkeit von Wärmeenergie in thermischen Speichern. Dabei kann im laufenden Betrieb entschieden werden, ob die durch konzentrierte Solarstrahlung erzeugte Heißluft zur Energieerzeugung über den Wasserdampfkreis oder aber zur Speicherung in einen thermischen Speicher geleitet werden soll. Dies ermöglicht es in Zeiten niedriger Strompreise den thermischen Speicher zu beladen um in Zeiten höherer Strompreise mehr Energie bereitstellen können und so den Gewinn des Kraftwerks zu maximieren. Eine mögliche Betriebsstrategie beinhaltet daher eine überlagerte Gewinnoptimierung, die gewünschte Beladungsprofile des Speichers ermittelt und diese an einen unterlagerten Regler übermittelt, der diese Profile schnell und effizient durch das Anfordern eines in den Speicher zu leitenden Heißluftmassenstroms einstellt. Da die Temperaturprofile ortsabhängig sind, bieten sich für den Entwurf des unterlagerten Reglers verteilt-parametrische Methoden an. Diese werden exemplarisch für den thermischen Festbettapeicher innerhalb des Solarturmkraftwerks „Solarturm Jülich“ umgesetzt [1].

Für den Reglerentwurf wird dabei zunächst ein verteilt-parametrisches Modell des Speichers aufgestellt, das neben der dominanten Wärmekonvektion ebenfalls die Temperaturabhängigkeit der Luftdichte und der spezifischen Wärmekapazität des Speichers berücksichtigt und daher starke Nichtlinearitäten aufweist. Die Modellierung erfolgt eindimensional mit der Speicherhöhe als Ortskoordinate. Die Temperaturen des Modells werden mit ortsdiskret verfügbaren Temperaturmesswerten des Speichers verglichen.

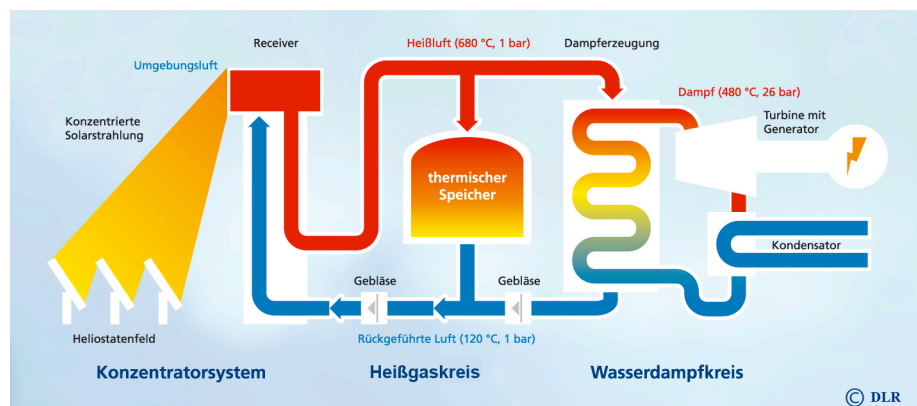


Abbildung 1: Schema des Solarturms Jülich

Anstelle der klassischen Vorgehensweisen eines direkten verteilt-parametrischen Reglerentwurfs oder einer Modellreduktion des Streckenmodells und dem anschließenden Entwerfen eines nicht verteilten Reglers, wird ein Zwischenweg gewählt, der die Ideen aus [2] auf den thermischen Festbettapeicher überträgt. Dabei wird als erstes die Lösung des verteilt-parametrischen Optimalsteuerungsproblems formuliert. Die dabei auftretenden adjungierten Gleichungen sind ebenfalls nichtlinear verteilt-parametrisch und können nicht in Echtzeit gelöst werden. Daher wird eine gemeinsame Modellreduktion des verteilt-parametrischen Modells und der adjungierten Gleichungen vorgenommen. Eine numerische Lösung der aus der Modellreduktion entstehenden gewöhnlichen Differentialgleichungen liefert dabei direkt den optimalen Stelleingriff. Durch die wiederholte Berechnung des Stelleingriffs auf Basis einer Schätzung der aktuellen Zustände durch einen Beobachter wird diese Steuerung dabei zu einer Regelung. Für die Modellreduktion wird der klassischen Kombination aus Proper Orthogonal Decomposition (POD) und Galerkin-Projektion eine alternative Methode zur Berechnung der Basisfunktion gegenübergestellt – die Laplacian Eigenmaps, die im Falle nichtlinearer Systeme bereits vielversprechende Ergebnisse gezeigt haben [3]. Die Ergebnisse der Modellreduktion werden an den Messdaten validiert und die Regelung in der Simulation mit dem verteilt-parametrischen Modell getestet.

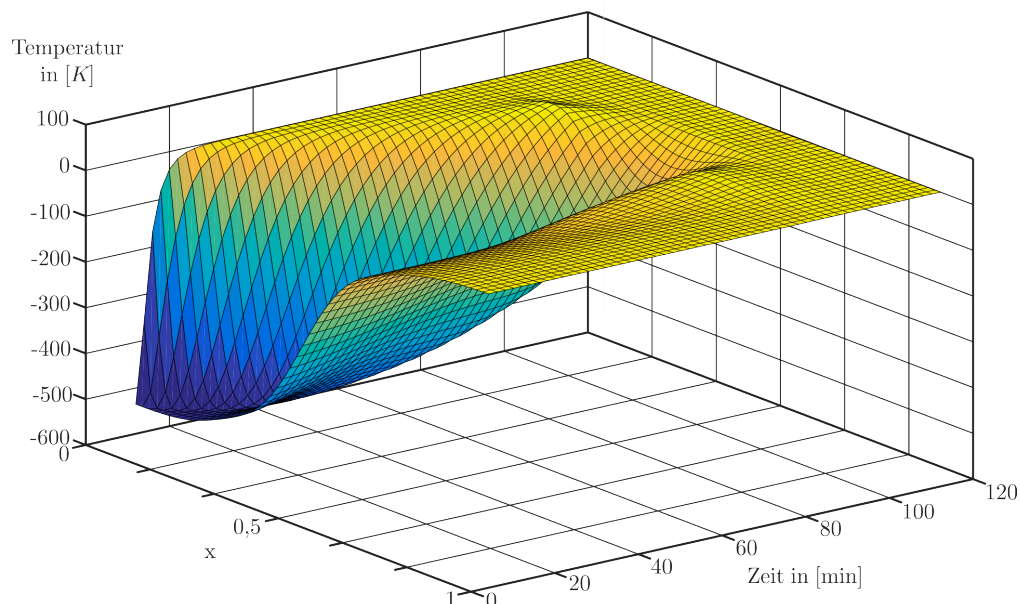


Abbildung 2: Verlauf des Regelfehlers im geschlossene Regelkreis

## Literatur:

- [1] Pyta, L., Nolteernsting, F. und Abel, D. „Verteiltparametrische Modellierung und Regelung eines thermischen Festbettapeichers“. In: at - Automatisierungstechnik
- [2] Pyta, Herty, M. und Abel, D. „Optimal Feedback Control of the Incompressible Navier-Stokes-Equations using Reduced Order Models“. In: Proceedings of the 2015 Conference on Decision and Control (CDC)
- [3] Pyta, und Abel, D. „Nonlinear Model Reduction of the Navier-Stokes-Equations“. In: Proceedings of the 2016 American Control Conference (ACC)



# Einsatz der „Modellbasierten prädiktiven Regelung“ für ein hybrides Energiesystem als Bestandteil eines virtuellen Kraftwerks

Ibrahim Skaff\*

\* Institut für Automatisierungstechnik  
TU Bergakademie Freiberg  
Bernhard-von-Cotta-Str. 4, 09596 Freiberg  
03731 - 39 2921  
03731 - 39 3481  
Ibrahim.Skaff@mailserver.tu-freiberg.de

Andreas Rehkopf\*\*

\*\* Institut für Automatisierungstechnik  
TU Bergakademie Freiberg  
Bernhard-von-Cotta-Str. 4, 09596 Freiberg  
03731 - 39 3291  
03731 - 39 3481  
Andreas.Rehkopf@aut.tu-freiberg.de

**Schlüsselwörter:** Modellbasierte prädiktive Regelung, Hybride Energiesysteme, Mehrgrößenregelung, Energy 4.0 Lab

Die „Modellbasierte prädiktive Regelung“ (**Model Predictive Control**) erfreut sich bei unterschiedlichsten Anwendern seit geraumer Zeit großer Beliebtheit aufgrund der erreichbaren guten Regelgüte [1] [2]. Am Institut für Automatisierungstechnik (IAT) der Bergakademie Freiberg konnten bereits wertvolle Erfahrungen beim Einsatz zur Kristallzüchtung in Multizonenöfen gesammelt werden [3].

In [4] wird der Einsatz bei hybriden Energiesystemen diskutiert. Aufbauend auf diesen Arbeiten soll das Verfahren in einem multifunktionalen hybriden Energieverbund zur Anwendung kommen, wie er als Basisanwendung in einem sog. regionalen virtuellen Kraftwerk eingesetzt wird und am IAT als modernes EnergyLab aufgebaut ist [5]. Der schematische Aufbau des bestehenden hybriden Energiesystems wird in Abbildung 1 gezeigt.

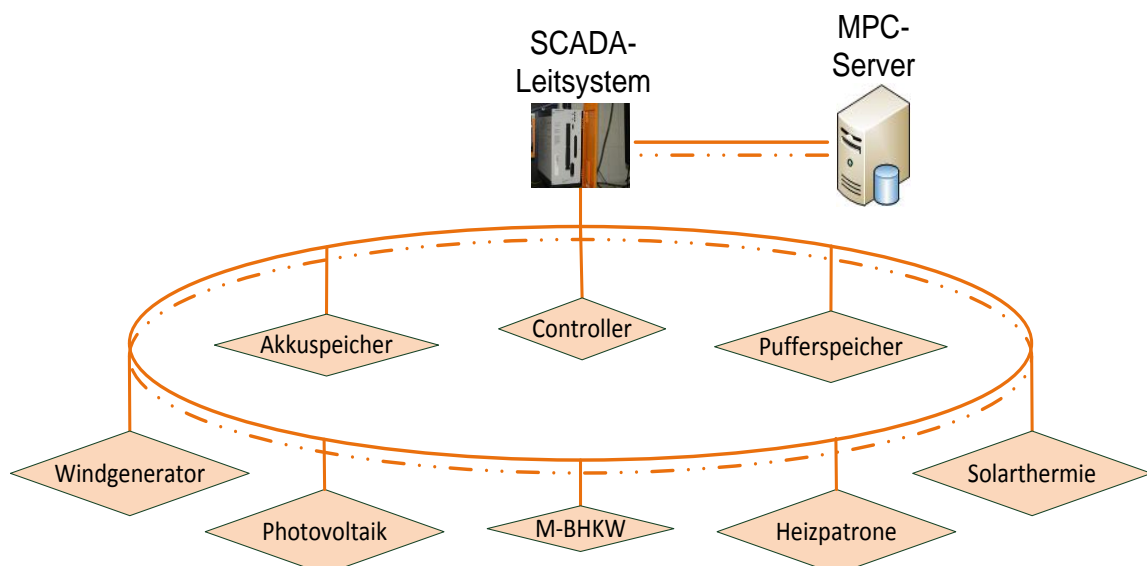


Abbildung 1: Schematischer Aufbau des hybriden Energiesystems



Die Abdeckung des thermischen und elektrischen Energiebedarfs unter Einsatz von derzeit 2 Blockheizkraftwerken, einer umfassenden Photovoltaikanlage, Solarthermie, 2 Windgeneratoren und einem intelligenten Batteriespeichersystem in der Wechselwirkung mit Netzvorgaben stehen im Fokus. Hierzu wurden bislang nur Verfahren der diskreten Optimierung eingesetzt, die bei diskreten Energiezuständen und einem diskreten Taktungsprinzip sinnvoll sind, aber schon bei einer noch überschaubaren Mengenkplexität an ihre Grenzen stoßen (NP-Problem) [6].

Im vorliegenden Beitrag wird ein Zustandsraummodell basierend auf den produzierten Leistungen der Anlagen vorgestellt. Angelehnt an [7] werden die Energiewerte der Speicher (thermisch / elektrisch) von  $n$ -Zellen als Zustandsvektor  $\underline{x}$  zusammengefasst und die produzierten Leistungen als Eingangsvektor  $\underline{u}$  im erweiterten Modell (Augmented Model, [8]) betrachtet. Damit lassen sich die Prädiktionsgleichungen für  $N$  zukünftige Schritte von  $u(k)$  nicht direkt aus  $\Delta u(k)$  aufstellen.

Darüber hinaus liefert der Beitrag die Ergebnisse einer MATLAB-Simulation des modellierten MPC-Systems.

## Literatur:

- [1] Adamy, Jürgen: Nichtlineare Regelungen, Springer 2009
- [2] Dittmar, Rainer; Pfeiffer, Bernd-Markus: Modellbasierte prädiktive Regelung in der industriellen Praxis. at -Automatisierungstechnik 54 , S. 590–601, 2006
- [3] Hermann, Konstantin: Untersuchungen zur optimalen Regelung von Mehrzonenrohröfen zur Einkristallzüchtung, TU Freiberg, Dissertation, 2011
- [4] Trifkovic, Milana; Sheikhzadeh, Mehdi; Nigim, Khaled; Dauotidis, Prodromos: Modeling and Control of a Renewable Hybrid Energy System With Hydrogen Storage. IEEE Transaction on control systems technology, Vol. 22, No. 1, S. 169-179, 2014
- [5] Skaff, Ibrahim; Müller, Christian; Rehkopf, Andreas: Kopplung von Energiemanagementsystemen Virtuelle Kraftwerke als cyber-physische Energiesysteme, atp edition - Automatisierungstechnische Praxis, S. 40-47, 2015
- [6] Müller, Christian; Rehkopf, Andreas: Einführung in das Verfahren des Bilevel Programming (Methoden der diskreten multikriteriellen Optimierung) für Anwendungen in der Automatisierungstechnik am Beispiel eines Virtuellen Kraftwerks auf Basis von Mikro-Blockheizkraftwerken, VDI-GMA, 2010, Salzburg
- [7] Zhu, Bing; Tazvinga, Henerica; Xia, Xiaohua: Model Predictive Control for Energy Dispatch of a Photovoltaic-Diesel-Battery Hybrid Power System. The International Federation of Automatic Control Cape Town, South Africa August, S. 11135-11140, 2014
- [8] Wang, Liuping: Model Predictive Control System Design and Implementation Using MATLAB, Springer 2009

# Aktive Schwingungsdämpfung einer Windkraftanlage mit hydrostatischem Getriebe und permanenterregtem Synchrongenerator

Julia Kersten \*

\* Lehrstuhl für Mechatronik  
Universität Rostock  
Justus-von-Liebig Weg 6  
0381 498-9218  
0381 498-9092

Julia.Kersten@uni-rostock.de

Harald Aschemann \*\*

\*\* Lehrstuhl für Mechatronik  
Universität Rostock  
Justus-von-Liebig Weg 6  
0381 498-9210  
0381 498-9092

Harald.Aschemann@uni-rostock.de

**Schlüsselwörter:** Schwingungsdämpfung, LMIs, Windkraftanlage mit hydrostatischem Getriebe, permanenterregter Synchrongenerator (PMSG)

Die Vorzüge eines hydrostatischen Getriebes (HSG) gegenüber dem im Bereich der Windkraftanlagen (WKA) weit verbreiteten mechanischen Getriebe sind vor allem die stufenlos veränderbare Übersetzung und eine Entkopplung der Rotordrehzahl von der Generator-drehzahl, wobei die Leistungsübertragung fluidisch erfolgt. Außerdem besitzt ein HSG vorteilhafte Dämpfungseigenschaften, die den negativen Einfluss von Windböen auf die Zuverlässigkeit und Lebensdauer des Gesamtsystems reduzieren. Die Blattwinkelverstellung wird wie bei herkömmlichen Anlagen dazu genutzt, um die generierte Leistung konstant zu halten. In dieser Arbeit dient diese zusätzlich zur aktiven Schwingungsdämpfung, wodurch der Betriebsbereich der WKA auf höhere Windgeschwindigkeiten – ohne signifikante Erhöhung der strukturellen Belastung – ausgeweitet werden kann.

Die mathematische Modellierung der WKA-Tragstruktur basiert auf einem elastischen MKS, das sowohl den Turm als auch die Blätter umfasst. Hierbei können auftretende Parameterunsicherheiten – primär durch nicht genau bekannte Dämpfungswerte – mittels Linearer Matrix-Ungleichungen (LMIs), siehe [3], behandelt werden. Die aktive Schwingungsdämpfung erfolgt durch Rückführungen der Zeitableitungen von Turm- und Blattauslenkungen, wobei die Turmposition mit Dehnmessstreifen oder Neigungssensoren gemessen werden kann. Ein reduzierter

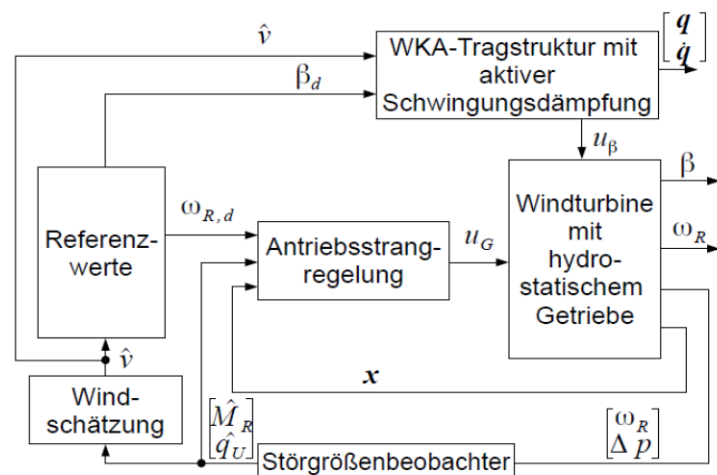


Abbildung 1: Implementierung der robusten beobachtergestützten Regelung

Beobachter schätzt die restlichen Zustände. Das Regelgesetz für die aktive Dämpfung beinhaltet den Korrekturterm für die aus der aktuellen Windgeschwindigkeit resultierende Kraft. Da dieser Korrekturterm den nominalen Blattverstellwinkel für die

unterlagerte Regelung modifizieren soll [5], muss die berechnete Kraft umgerechnet werden. Der korrigierte Wert des Blattverstellwinkels sorgt somit für eine leichte Änderung in der Horizontalkraft, woraus der aktive Dämpfungseffekt für die WKA-Tragstruktur resultiert [2]. Für den Antriebsstrang wird ein HSG betrachtet, bei dem eine hydraulische Pumpe und ein Motor durch einen geschlossenen Hydraulikkreislauf miteinander verbunden sind. Der Motor verfügt dabei über ein verstellbares Fördervolumen, sodass eine stufenlose Übersetzung innerhalb eines konstruktiv vorgegebenen Bereichs möglich ist. Für den Regelungsentwurf wird ein nichtlineares Systemmodell auf Basis einer physikalischen Modellbildung hergeleitet. Dieses bildet alle dominierenden dynamischen Eigenschaften des HSG ab, wobei unter anderem symbolische Kennfeldbeschreibungen für die Aerodynamik des Rotors verwendet werden, siehe [4]. Das Antriebsstrangmodell beinhaltet vier Zustandsvariablen: die Rotorwinkelgeschwindigkeit, den HSG-Differenzdruck, die Winkelgeschwindigkeit und den Polwinkel des PMSG. Die Antriebsstrangregelung erfolgt mittels Techniken der Erweiterten Linearisierung, wobei sowohl eine gesteuert adaptierte PI-Zustandsrückführung als auch eine dynamische Vorsteuerung sowie eine Störkompensation Anwendung finden. Unter der Annahme, dass alle Zustände messbar sind, wird ein reduzierter Störgrößenbeobachter [1] für die Schätzung unbekannter Größen – des Rotormoments und eines Leckage-Volumenstroms – vorgesehen, siehe Abbildung 1.

Mithilfe der dezentralen Regelungsstrategie kann die WKA im gesamten Betriebsbereich von niedrigen bis hohen Windgeschwindigkeiten betrieben werden. Durch den robusten Entwurf unter Einbeziehung der Parameterunsicherheiten mittels LMIs lassen sich sowohl Blatt- als auch Turmschwingungen aktiv dämpfen, siehe Abbildung 2.

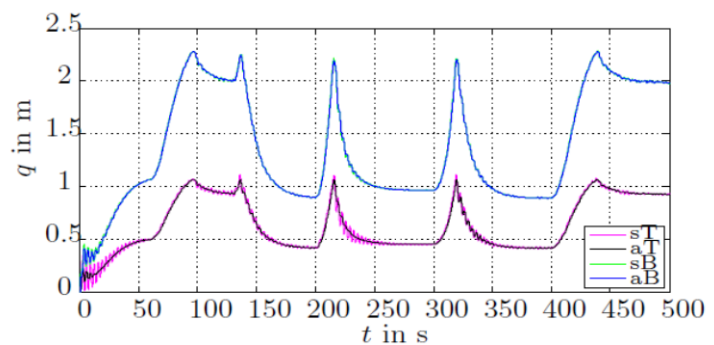


Abbildung 2: Turm- (T) und Blattschwingung (B), strukturell (s) und aktiv gedämpft (a)

## Literatur:

- [1] Aschemann, H. and Kersten, J. "Observer-Based Decentralised Control of a Wind Turbine with a Hydrostatic Transmission", Proc. of MMAR, 2015
- [2] Aschemann, H. and Kersten, J. "LMI Approaches for a Robust Control of a Wind Turbine With a Hydrostatic Transmission", Proc. of ECC, 2016
- [3] Boyd, S., Ghaoui, L.E., Feron, E., and Balakrishnan, V. "Linear Matrix Inequalities in System and Control Theory", SIAM, 1994
- [4] Georg, S., Schulte, H., and Aschemann, H. "Control-Oriented Modelling of Wind Turbines using a Takagi-Sugeno Model Structure", Proc. of FUZZ-IEEE, 2012
- [5] Suryanarayanan, S. and Dixit, A. "On Pitch Control of Horizontal-Axis Large Wind Turbines", Proc. of ACC, 2005

# Regler- und Beobachterentwurf für boolesche Netzwerke

Thomas Leifeld \*

Ping Zhang \*\*

\* Lehrstuhl für Automatisierungstechnik  
TU Kaiserslautern  
Erwin-Schrödinger Str. 12, 67663 Kaiserslautern  
Tel. 0631 2054457  
Fax 0631 2054462  
leifeld@eit.uni-kl.de

\*\* Lehrstuhl für Automatisierungstechnik  
TU Kaiserslautern  
Erwin-Schrödinger Str. 12, 67663 Kaiserslautern  
Tel. 0631 2055543  
Fax 0631 2054462  
pzhang@eit.uni-kl.de

**Schlüsselwörter:** Ereignisdiskrete Systeme, Boolesche Netzwerke, Optimalregelung, Beobachterentwurf

Boolesche Netzwerke (BN) bestehen aus Zuständen die boolesche Werte annehmen können und die dynamisch über logische Funktionen miteinander und mit Eingängen verknüpft sind. Zustände und externe Einflüsse eines modellierten Systems werden in BN zu „1“ und „0“ quantisiert und die Zeit wird diskretisiert, womit BN ereignisdiskrete Systeme sind. Für biologische Regulationsnetzwerke sind BN eine etablierte mathematische Beschreibungsform [1, 2]. Um unvollständige Kenntnis über den Wirkungsmechanismus, Rauschen und Ungenauigkeit durch die Quantisierung der Messwerte zu berücksichtigen wurden probabilistische boolesche Netzwerke (PBN) von Shmuleviech et. al. [3] eingeführt.

Mittels des neuen Matrixkalküls des Semi-Tensorproduktes können BN äquivalent in der kompakten Form

$$\begin{cases} x(k+1) = L \bowtie u(k) \bowtie x(k) \\ y(k) = H \bowtie u(k) \bowtie x(k) \end{cases} \quad (1)$$

beschrieben werden [4], wobei  $x$  Zustände,  $y$  Ausgänge,  $u$  Eingänge sowie  $L$  und  $H$  Systemmatrizen darstellen. Diese Form eröffnet die Möglichkeit mit neuen Methoden regelungstechnische Problemstellungen dieser Modellklasse zu behandeln.

Ein neuer Ansatz zur Trajektorienfolgeregulation in BN unter Berücksichtigung von Zustands- und Transitionsbeschränkungen wird in diesem Beitrag präsentiert. Wenn ein exaktes Folgen möglich ist, wird eine entsprechende Eingangsfolge berechnet. Andernfalls wird in einer Optimierung ein Regler entworfen, welcher den Regelfehler minimiert [5].

Da häufig nicht alle Zustände direkt messbar sind oder einzelne Messwerte fehlen, ist die Schätzung des aktuellen Zustandes im Kontext von BN ein wichtiges Thema. Hierzu wird der Entwurf eines Beobachters für BN mit garantierter Konvergenz präsentiert [6]. Darauf aufbauend wird ein Beobachter für PBN eingeführt. Basierend auf dem Beobachter wird ein Residuum definiert, welches zur Fehlerdiagnose eingesetzt wird. Sowohl Konsistenz als auch Schwellwert basierte Detektion und Diagnose ist möglich [7]. Die präsentierten Verfahren werden an biologischen und technischen Beispielen demonstriert.

## Literatur:

- [1] S. Bornholdt: Less is more in modeling large genetic networks. *Science*, Vol. 310, Nr. 5747, S. 449–451, 2005
- [2] G. Karlebach, R. Shamir: Modelling and analysis of gene regulatory networks. *Nature Reviews Molecular Cell Biology*, Vol. 9, Nr. 10, S. 770–780, 2008
- [3] I. Shmulevich, E.R. Dougherty, W. Zhang: From boolean to probabilistic boolean networks as models of genetic regulatory networks. *Proceedings of the IEEE*, Vol. 90, Nr. 11, S. 1778–1792, 2002
- [4] D. Cheng, H. Qi: A linear representation of dynamics of boolean networks. *IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol. 55, Nr. 10, S. 2251–2258, 2010
- [5] Z. Zhang, T. Leifeld, P. Zhang: Finite horizon tracking control of boolean control networks. *Proceedings of the 2016 American Control Conference*, S. 6965–6970, Boston, USA, 2016
- [6] Z. Zhang, T. Leifeld, P. Zhang: Observer design for boolean control networks. *Proceedings of the 55<sup>th</sup> IEEE Conference on Decision and Control*, Las Vegas, USA, 2016
- [7] T. Leifeld, Z. Zhang, P. Zhang: Fault detection for probabilistic boolean networks. *Proceedings of the 2016 European Control Conference*, S. 740–745, Aalborg, Denmark, 2016

# A Characterisation of Consistency for Abstraction-Based Control of Sequential Behaviours

Xiaoying Bai

Lehrstuhl für Regelungstechnik  
Friedrich-Alexander Universität Erlangen-Nürnberg  
Wetterkreuz 15, 91058 Erlangen  
Telefon: 09131-8527462  
Fax: 09131-8528715  
E-Mail: Xiaoying.Bai@fau.de

A common approach to controller design for large scale discrete-event systems or hybrid systems is to apply synthesis procedures on an abstraction that is realized on a significantly smaller state set. However, for every abstraction-based controller design, an inherent problem is to guarantee that the controller is also admissible to the actual plant.

Abstraction-based supervisory control has been intensively studied in the context of hierarchical control of regular  $\ast$ -languages. There, the so called *observer property* is developed in [1] as a sufficient condition that guarantees that any non-conflicting control exercised on the abstraction will also be non-conflicting for the actual plant.

This presentation addresses supervisory control for not necessarily topologically closed  $\omega$ -languages and upper-bound language-inclusion specifications, as developed in [2]. In this context, we refer to an abstraction as *consistent for the purpose of controller design*, if any controller obtained for the abstraction is also  $\omega$ -controllable w.r.t. the actual plant. The main results of our study are sufficient and necessary conditions to characterise for consistency.

**Keywords:**  $\omega$ -language, supervisory control, abstraction-based synthesis, liveness properties, non-conflicting.

## Literatur:

- [1] Wong, K.C. and Wonham, W.M. (1996). Hierarchical control of discrete-event systems. *Discrete Event Dynamic Systems*, 6(3), 241–273.
- [2] Thistle, J. and Wonham, W. (1994b). Supervision of infinite behavior of discrete-event systems. *SIAM Journal on Control and Optimization*, 32 (4), 1098–1113..

# Von der Analyse zur fehlertoleranten Regelung am Beispiel von Multikoptern

Daniel Vey \*

Jan Lunze \*\*

\* Lehrstuhl für Automatisierungstechnik und  
Prozessinformatik (ATP)  
Ruhr-Universität Bochum  
Universitätsstr. 150, 44801 Bochum  
0234 32-24096  
0234 32-14101  
vey@atp.rub.de

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

**Schlüsselwörter:** Fehlertolerante Regelung, Diagnose, Rekonfiguration, Strukturelle Analyse, Multikopter, UAV

Die fehlertolerante Regelung hat das Ziel, die Verfügbarkeit technischer Prozesse zu erhöhen, indem sie verhindert, dass der Ausfall einer Komponente den Ausfall des gesamten Systems zur Folge hat. Die aktive fehlertolerante Regelung (Abbildung 1, [1]) besteht grundsätzlich aus zwei Schritten: Zunächst muss der Fehler mittels einer Diagnoseeinheit detektiert, isoliert (lokalisiert) und seine Auswirkung identifiziert werden. Anschließend erfolgt die Anpassung des Reglers an das fehlerbehaftete Verhalten der Regelstrecke. Vor dem Entwurf entsprechender Diagnose- und Rekonfigurationseinheiten muss analysiert werden, in welchem Maße die Regelstrecke überhaupt Fehlertoleranz erlaubt.

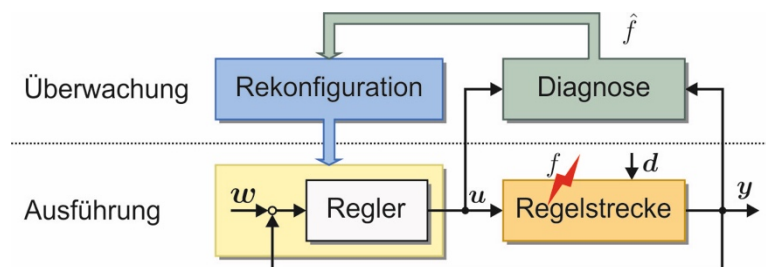


Abbildung 1: Schema der aktiven fehlertoleranten Regelung

In diesem Vortrag wird ein vollständiges Konzept zur fehlertoleranten Regelung nach Sensor- und Aktorfehlern vorgestellt. Vollständig bedeutet, dass der gesamte Prozess von der Analyse der Fehlertoleranz der Regelstrecke über den Entwurf der Diagnoseeinheit bis zur Rekonfiguration des Reglers betrachtet wird. Zudem wird die Anwendung der beschriebenen Methoden fortlaufend am Beispiel des Rotorausfalls an einem Multikopter demonstriert. Abschließend erfolgt eine Evaluation der entworfenen Einheiten in Experimenten.

Der Vortrag beginnt mit der Präsentation von Methoden zur Analyse der Diagnostizierbarkeit und der Rekonfigurierbarkeit von Systemen (vgl. [1,2]). Die graphentheoretische Analyse anhand eines strukturellen Modells des Systems eignet sich hier besonders gut, da Fehlertoleranz von Redundanzen abhängig ist, deren Existenz sich vorrangig in der Struktur des Systems äußert. Zudem wird dadurch eine Analyse der Fehlertoleranz in einem frühen Entwicklungsstadium ermöglicht, da lediglich ein nicht-parametrisches Modell des Systems erforderlich ist. Das Analyseergebnis ist außerdem unabhängig von numerischen Effekten.



Die Analyse verschiedener Multikopter (Abbildung 2) beantwortet die Frage, warum manche Multikopter nach dem Verlust eines Rotors abstürzen und andere nicht. Es zeigt sich, dass nicht allein die Anzahl der Rotoren, sondern vor allem die Geometrie und die Rotorkonfiguration entscheidend sind, wohingegen die Parameter des Systems eine untergeordnete Rolle für die Fehlertoleranz spielen (vgl. [2]).

Für die fehlertolerante Regelung wird eine beobachterbasierte Diagnoseeinheit mit den Konzepten des virtuellen Sensors und des virtuellen Aktors zur Rekonfiguration kombiniert. Dieses Konzept ist universell, da immer dann, wenn die Regelstrecke Fehlertoleranz erlaubt, auch eine Lösung des Diagnose- und Rekonfigurationsproblems in der beschriebenen Form möglich ist. Es ist zudem methodisch einheitlich, da die Konzepte zur Rekonfiguration ebenfalls auf Beobachtern bzw. dualen Beobachtersystemen basieren und die benötigten Modelle und Entwurfsverfahren für Diagnose und Rekonfiguration identisch sind.

Der Entwurf der Diagnoseeinheit erfolgt aufbauend auf dem Ergebnis der strukturellen Analyse. Es wird gezeigt, wie sich die Vorteile der strukturellen Analyse (Entkopplung) mit den Vorteilen beobachterbasierter Residuengeneratoren (Robustheit) vereinen lassen. Zudem wird sichergestellt, dass ein Diagnoseergebnis entsteht, welches in jedem Fall von der Rekonfigurationseinheit verwendet werden kann.

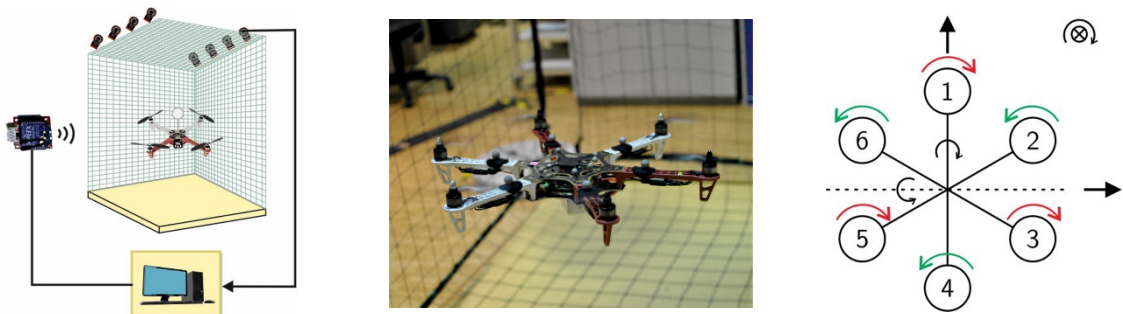


Abbildung 2: Schema des Multikopter-Versuchsstandes, Foto und Struktur des Multikopters (hier: Hexakopter)

Das Konzept zur fehlertoleranten Regelung wird in Experimenten (Abbildung 2) am Beispiel des Ausfalls eines oder mehrerer Rotoren an Multikoptern erprobt (vgl. [3]). Die Evaluation der experimentellen Ergebnisse bestätigt die Robustheit der Methoden bzgl. Modellunsicherheiten, Messrauschen und Prozessstörungen. Die Rekonfiguration erfolgt zur Laufzeit auf Basis des aktuellen Diagnoseergebnisses. Dies zeigt, dass das vorgestellte Konzept zur fehlertoleranten Regelung auch den Echtzeitanforderungen schneller Systeme wie Multikoptern gerecht wird.

## Literatur:

[1] M. Blanke, M. Kinnaert, J. Lunze, M. Staroswiecki: *Diagnosis and Fault-Tolerant Control*, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2016.

[2] D. Vey, J. Lunze: *Structural Reconfigurability Analysis of Multirotor UAVs after Actuator Failures*. In Proc. of 54th Conference on Decision and Control (CDC'15), Osaka, Japan, 2015, pp. 5097 - 5104.

[3] D. Vey, J. Lunze: *Experimental evaluation of an active fault-tolerant control scheme for multirotor UAVs*. In Proc. of 3rd International Conference on Control and Fault-Tolerant Systems (SysTol'16), Barcelona, Spain, 2016, pp. 119 - 126.

# Lineare optimale Regelung und Schätzung mittels Message Passing auf Faktorgraphen

Christian Hoffmann \*

Philipp Rostalski \*

\* Institut für Medizinische Elektrotechnik  
Universität zu Lübeck  
Ratzeburger Allee 160  
+49 451 3101 6200

[Philipp.Rostalski@uni-luebeck.de](mailto:Philipp.Rostalski@uni-luebeck.de)  
[Christian.Hoffmann@uni-luebeck.de](mailto:Christian.Hoffmann@uni-luebeck.de)

**Schlüsselwörter:** Message Passing, Probabilistische Modelle, LQG Regelung, Faktorgraphen, Kalman Filterung, Expectation Maximization, Iterativ Lernende Regelung

Faktorgraphen bilden eine Klasse probabilistischer graphischer Modelle, welche die Faktorisierung von Wahrscheinlichkeitsdichteverteilungen als bipartite Graphen abbilden [1, 2]. Eine solche Zerlegung kann genutzt werden, um Aussagen bedingter Unabhängigkeiten darzustellen und probabilistische Inferenzprobleme zu lösen. Dazu werden häufig sogenannte Max-Product und Sum-Product Algorithmen [3] verwendet, um Nachrichten auf den Kanten des Graphen zu berechnen, die eine effiziente Zusammenfassung aller vorangegangenen Nachrichten darstellen. So kann die Struktur des Graphen ausgenutzt werden, um Inferenzprobleme mittels der Übermittlung von Nachrichten zwischen den Knoten des Graphen effizient zu lösen bzw. zu approximieren.

Weitere bekannte graphische Darstellungen wie Bayes'sche Netze, Hidden Markov Modelle und Markov Random Fields sind Spezialfälle von Faktorgraphen [3]. Folglich lassen sich in diesem Framework viele Algorithmen aus sehr unterschiedlichen Forschungsfeldern wie der Statistik, der Kodierungstheorie, dem Maschinellen Lernen und der Signalverarbeitung darstellen [4]. Viele dieser Algorithmen – darunter der Viterbi Algorithmus, die iterative Dekodierung von Turbo Codes, Low-Density Parity-Check Codes, Expectation Maximization, sowie das Kalman Filter – sind wegweisend für ihre Forschungsfelder. Eine Hauptmotivation der Forschung an Faktorgraphen stellt daher das Potenzial dar, viele vermeintlich heterogene Algorithmen in einem vereinheitlichenden graphischen Modell kombinieren zu können, um so ganzheitliche Lösungen für komplexe Probleme zu finden. In einer Faktorgraphen-Darstellung bieten Algorithmen zudem meist einen intuitiven Zugang, weshalb das Framework auch aus didaktischen Gesichtspunkten interessant ist.

Der Vortrag zeigt daher zunächst, wie das Kalman Filter mittels Faktorgraphen dargestellt werden kann [1]. Der entsprechende Faktorgraph ist in Abbildung 1 dargestellt. Kombiniert mit der Darstellung des Expectation Maximization Algorithmus' mittels Faktorgraphen [5] lässt sich das Kalman Filter zu einem Ansatz für die Identifikation nicht-linearer Systeme in Form affin linear parameter-veränderlicher Darstellungen [6] erweitern. Die graphische Formulierung macht dabei eine rekursive Implementierung des Algorithmus' offensichtlich, die es erlaubt sowohl bekannte Parameterabhängigkeiten zu berücksichtigen, als auch langsamere unbekanntere Veränderungen von Parametern zu verfolgen [7].

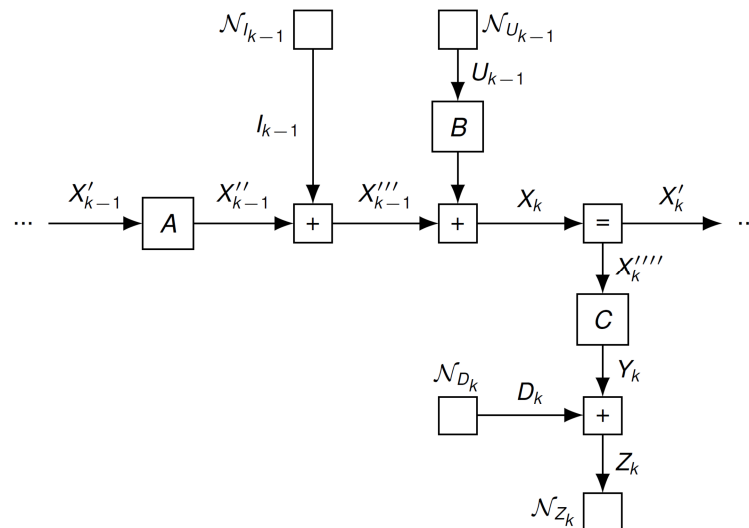


Abbildung 1 - Darstellung des Kalman Filters/Smoothers als Faktorgraph.

Weiterhin zeigt dieser Vortrag auf, inwiefern graphische Modelle in der Form von Faktorgraphen auch im Zusammenhang mit der Regelung nützlich sein können. So wird eine stochastische Interpretation optimaler Regelung [8] mittels Faktorgraphen präsentiert, auf Basis derer eine Reihe klassischer Ergebnisse hergeleitet werden können. Unter anderem, erlaubt es der probabilistische Ansatz hier zudem, die Varianz des durch einen Kalman Filter geschätzten Zustandes in der Regelung zu berücksichtigen. Weiterhin bietet eine einfache Reinterpretation der Faktorgraphen-Darstellung die Möglichkeit zur Implementierung iterativ lernender Regelungskonzepte. Beispielhaft werden zudem Erweiterungen auf Basis einer Faktorgraphen-Darstellung des Expectation Maximization Algorithmus' erläutert, die es erlauben, die Sequenz optimaler Stellgrößen zu regularisieren [9].

Der zugrundeliegende Message Passing Ansatz verspricht neben zahlreichen Optionen zur Kombination von Algorithmen vor allem die Möglichkeit, Algorithmen auf natürliche Weise in separate Recheneinheiten zu modularisieren, um so neue Ansätze für Algorithmen zur verteilten Schätzung und Regelungen zu finden.

#### Literatur:

- [1] H.-A. Loeliger, "An Introduction to factor graphs," (en), *IEEE Signal Process. Mag.*, vol. 21, no. 1, pp. 28–41, 2004.
- [2] G. D. Forney, "Codes on graphs: Normal realizations," (en), *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. 47, no. 2, pp. 520–548, 2001.
- [3] F. R. Kschischang, B. J. Frey, and H.-A. Loeliger, "Factor graphs and the sum-product algorithm," (en), *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. 47, no. 2, pp. 498–519, 2001.
- [4] H.-A. Loeliger, "An Introduction to Factor Graphs," 2008.
- [5] J. Dauwels, A. W. Eckford, S. Korl, and H.-A. Loeliger, "Expectation Maximization as Message Passing - Part I: Principles and Gaussian Messages," *arXiv*, arXiv:0910.2832, 2009.
- [6] F. Wu, "Control of Linear Parameter Varying Systems," Ph.D. Thesis, Mechanical Engineering, University of Berkeley, California, USA, 1995.
- [7] C. Hoffmann, A. Isler, and P. Rostalski, "A Factor Graph Approach to Parameter Identification for Affine LPV Systems," *American Control Conference*, 2017 (submitted).
- [8] M. Kárný, "Towards fully probabilistic control design," *Automatica*, vol. 32, no. 12, pp. 1719–1722, 1996.
- [9] C. Hoffmann and P. Rostalski, "Linear Optimal Control on Factor Graphs - A Message Passing Perspective," in *20th IFAC World Congress*, 2017 (submitted).

# Ganzzahlige iterativ lernende Regelung zur Treibstoffschichtung

Jan-Simon Schäpel \*

\* Fachgebiet Mess- und Regelungstechnik  
Institut für Prozess- und Verfahrenstechnik  
TU Berlin  
Hardenbergstr. 36A  
10623 Berlin  
030-314-79574  
030-314-21129  
jan-simon.schaepel@tu-berlin.de

Rudibert King \*\*

\*\* Fachgebiet Mess- und Regelungstechnik  
Institut für Prozess- und Verfahrenstechnik  
TU Berlin  
Hardenbergstr. 36A  
10623 Berlin  
030-314-24100  
030-314-21129  
rudibert.king@tu-berlin.de

**Schlüsselwörter:** Iterativ lernende Regelung, ganzzahlige Regelung

Zur signifikanten Steigerung der Effizienz von Gasturbinen wird im SFB 1029 die Realisierung einer schocklosen Explosion untersucht. Hierbei muss Brennstoff so in ein Verbrennungsrohr eingespritzt werden, dass eine gleichzeitige Selbstzündung des Treibstoffs im gesamten Rohr erfolgt. Durch die homogene Zündung steigt der Druck während der Verbrennung an, wodurch eine höhere thermodynamische Effizienz erzielt wird. Da es sich aufgrund der Gasströmung um ein konvektives System handelt, kann die Regelung eine Verbesserung nur von Zündung zu Zündung, d.h. im Sinn einer iterativ lernenden Regelung bewirken.

Unter atmosphärischen Bedingungen ist in einem entsprechenden Versuchsstand bereits erfolgreich eine iterativ lernende Regelung (ILR) eingesetzt worden [1] um obigen Zielen näher zu kommen. Mithilfe eines simplen physikalischen Modells ist die ILR dabei in der Lage, die Stelltrajektorie eines Proportionalventils von Füllvorgang zu Füllvorgang so zu verbessern, dass eine homogenere Zündung und ein höherer Druckanstieg erfolgen.

Betrachtet man den Verbrennungsprozess bei Verwendung eines vorkomprimierten Luftstroms, wie in einer realen Gasturbine, so ergeben sich geringere Selbstzündzeiten und somit auch geringere Füllzeiten. Dies macht die Verwendung von Schnellschaltventilen statt des Proportionalventils erforderlich. Um näherungsweise immer noch Einfüllprofile realisieren zu können, kommen nun mehrere Schaltventile in einem Array zum Einsatz.

Als Regelkonzept wird in diesem Beitrag eine Kombination aus ILR und ganzzahliger Optimierung vorgestellt, siehe Abb. 1. Sie ermöglicht, den repetitiven Charakter des Versuchsstands zu nutzen und zugleich die Beschränkung der Stellgröße auf natürliche Zahlen einzuhalten. Hierbei wird für die Regelung das Gütefunktional einer normoptimalen ILR [2] verwendet. Dies führt bei der gegebenen Stellgrößenbeschränkung auf eine ganzzahlige Optimierungsaufgabe. Diese kann beispielsweise durch das "Branch-and-Bound"-Verfahren [3] gelöst werden. Eine besondere Beachtung ist bei diesem Regelungskonzept der Gewichtung  $W_{\Delta u}$  der Änderung der Stellgröße von einer zur nächsten Iteration zuzumessen. Bei ungenauen Modellen kann eine zu geringe Wichtung zu Überschwingen oder sogar instabilem Verhalten führen. Eine zu starke Bestrafung der Änderung der Stellgröße birgt bei dem Integer-Problem das Risiko, dass die Stellgröße nicht mehr verändert wird, obwohl die optimale Stelltrajektorie noch nicht erreicht worden ist. Abhilfe kann

hier erreicht werden, indem  $W_{\Delta u}$  dynamisch bezüglich des Abstands zum Optimum angepasst wird.

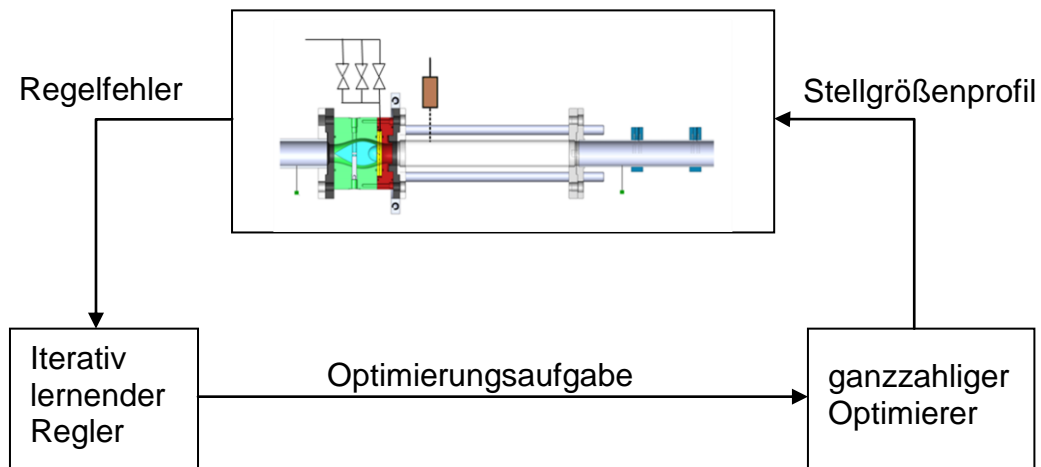


Abbildung 1: Schematischer Aufbau des verwendeten Reglers

Die Güte des Regelungskonzepts wird an einem nichtreaktiven Verbrennungsrohr untersucht, siehe Abb. 2. Dabei wird ein Treibstoffprofil über der Zeit als Führungsgröße vorgegeben und der tatsächliche Verlauf anhand der Absorption eines Laserstrahls detektiert. Für weiterführende Anwendungen unter reaktiven Bedingungen wird außerdem die Verwendung des Treibstoffdrucks stromab des Schaltventilarrays betrachtet.

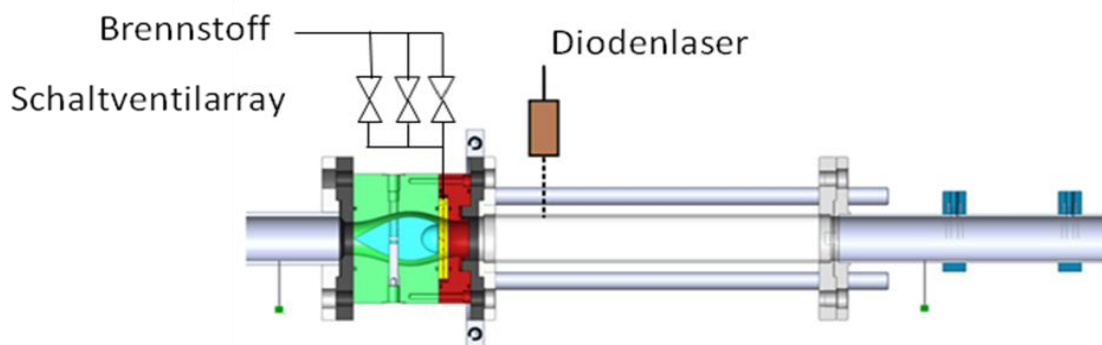


Abbildung 2: Nichtreaktiver Versuchsstand

## Literatur:

- [1] Reichel, T., Schäpel, J.-S., Bobusch, B., Klein, R., King, R. und Paschereit, C.O.: "Shockless Explosion Combustion: Experimental Investigation of a New Approximate Constant Volume Combustion Process", Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, Vol. 139(2), 21504-21510, 2016
- [2] Amann, N., Owens, D. H. und Rogers, E.: "Iterative learning control using optimal feedback and feed forward actions". International Journal of Control, Vol. 65(2), 277-293, 1996
- [3] Lawler, E. L. und Wood, D. E.: "Branch-and-Bound Methods: A Survey", INFORMS, Vol. 14, 699-719, 1966

# Nichtlineare modellprädiktive Regelung eines Großdieselmotors mit Emissionszielen

Karsten Harder

Michael Buchholz

Knut Graichen

Institut für Mess-, Regel- und Mikrotechnik, Universität Ulm  
Albert-Einstein-Allee 41, D-89081 Ulm

Tel.: 49 (0)731 50-26336  
karsten.harder@uni-ulm.de

Tel.: +49 (0)731 50-26334  
michael.buchholz@uni-ulm.de

Tel.: +49 (0)731 50-26304  
knut.graichen@uni-ulm.de

**Schlüsselwörter:** Dieselmotor, nichtlineare modellprädiktive Regelung, Emissionen, Echtzeitfähigkeit, Prüfstandserprobung

Moderne Dieselmotoren besitzen durch stetige Weiterentwicklungen eine Vielzahl von Stellgrößen und eine zunehmende Komplexität, die nur unter großem Aufwand durch klassische Verfahren der Regelungstechnik zu bewältigen ist. Daher gewinnt die modellbasierte Regelung von Verbrennungsmotoren zunehmend an Bedeutung (siehe z.B. [1] – [3]). Insbesondere modellprädiktive Regler (MPC) sind hierzu vielversprechende Ansätze, da sich typische Regelziele intuitiv als beschränktes Optimierungsproblem formulieren lassen. Die hohe Komplexität des Regelproblems und die Echtzeitanforderungen im realen Betrieb beschränken allerdings derzeit den Einsatz von MPC auf simulative Untersuchungen (z. B. [4]) oder Teilkomponenten des Motors (z. B. [5] – [7]). Vorrangig finden dabei lineare MPC-Verfahren Anwendung (z. B. [6] – [8]), um den restriktiven Echtzeitanforderungen von Motorsteuergeräten gerecht zu werden. Allerdings werden für eine präzise Beschreibung insbesondere der Emissionen im Allgemeinen hochgenaue, nichtlineare Modelle benötigt.

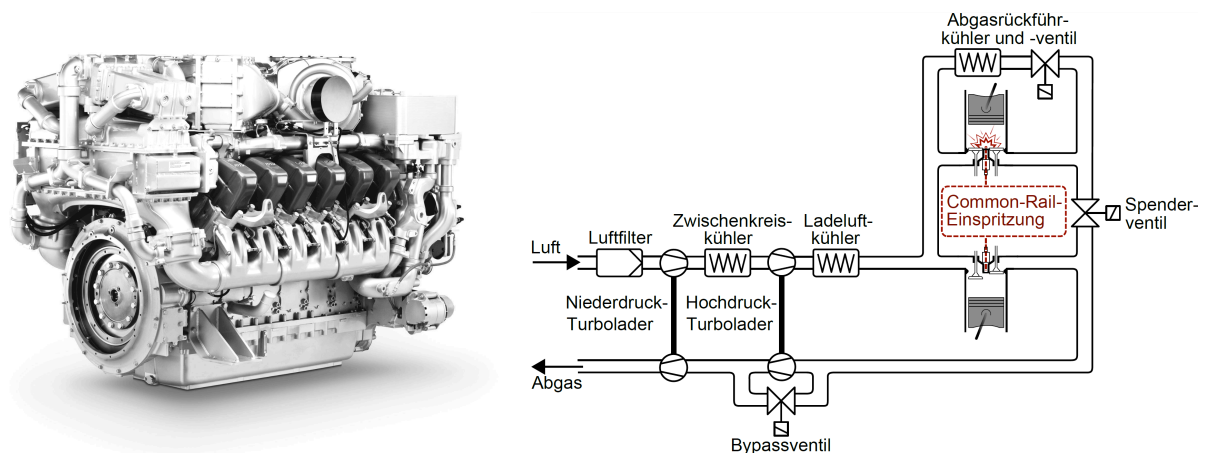


Abbildung 1: V12-Großdieselmotor (Quelle: MTU Friedrichshafen GmbH) und schematischer Motoraufbau.

In diesem Vortrag wird ein Ansatz zur echtzeitfähigen nichtlinearen modellprädiktiven Regelung (NMPC) eines Großdieselmotors vorgestellt [9], vgl. Abb. 1. Das beschränkte Optimierungsproblem des modellprädiktiven Reglers berücksichtigt dabei sowohl die (nichtlineare) Verbrennung als auch die Dynamik des geregelten Gaspfades. Die Optimierungsziele umfassen den minimalen Kraftstoffverbrauch und die Regelung des Motormoments sowie der Stickoxid- und Rußemissionen. Die Vorgabe der Emissionsziele ist dabei so gewählt, dass aktuelle Abgasnormen (z. B. EURO VI)



eingehalten werden. Zudem werden Stellgrößenbeschränkungen und der maximale Zylinderdruck berücksichtigt, um den sicheren Betrieb des Motors zu gewährleisten. Der NMPC-Ansatz ermöglicht des Weiteren das gezielte Aufheizen eines Abgasnachbehandlungssystems, z. B. zur Regeneration eines Dieselpartikelfilters. Um trotz der hohen Genauigkeit der verwendeten (nichtlinearen) Motormodelle eine numerisch effiziente und zugleich robuste Lösung des Optimierungsproblems zu ermöglichen, wird ein erweiterter Lagrange-Ansatz mit unterlagerter gradientenbasierter Optimierung verwendet [9].

Neben der Vorstellung des NMPC-Verfahrens werden im Vortrag Ergebnisse der experimentellen Validierung am Motorprüfstand präsentiert [10]. Die Messungen belegen, dass die vorgestellte nichtlineare modellprädiktive Regelung die o. g. Anforderungen auch unter hochdynamischen Randbedingungen und über den gesamten Lastbereich sehr gut erreicht. Die Rechenzeit von ca. 2 ms pro NMPC-Schritt auf dem verwendeten Rapid-Prototyping-System verdeutlicht im Hinblick auf die Abtastzeit von 10 ms sowohl die numerische und algorithmische Effizienz des Verfahrens als auch die zukünftige Umsetzbarkeit des NMPC-Verfahrens auf Steuergeräteebene.

## Literatur:

- [1] L. Eriksson, L. Nielsen. *Modeling and Control of Engines and Drivelines*. Wiley, 2014.
- [2] L. Guzzella, C. H. Onder. *Introduction to Modeling and Control of Internal Combustion Engine Systems*. Springer, 2010.
- [3] R. Isermann. *Engine Modeling and Control*. Springer, 2014.
- [4] C. Ericson. *Model Based Optimization of a Complete Diesel Engine/SCR System*. Dissertation, Lund University, 2009.
- [5] P. Fussey, D. Limebeer. Model predictive combustion control implementation using parallel computation on an FPGA. *SAE International Journal of Engines*, Bd. 9, S. 1163–1169, 2016.
- [6] H. J. Ferreau, P. Ortner, P. Langthaler, L. del Re, M. Diehl. Predictive control of a real-world diesel engine using an extended online active set strategy. *Annual Reviews in Control*, Bd. 31, S. 293–301, 2007.
- [7] P. Drews, K. Hoffmann, R. Beck, R. Gasper, A. Vanegas, C. Felsch, N. Peters, D. Abel. Fast model predictive control for the air path of a turbocharged diesel engine. *Proceedings European Control Conference (ECC)*, S. 3377–3382, 2009.
- [8] J. Sowman, D. Laila, A. Cruden, P. Fussey, and A. Truscott. A predictive control approach to diesel selective catalytic reduction. *Proceedings European Control Conference (ECC)*, S. 3073–3078, 2015.
- [9] K. Harder, M. Buchholz, J. Niemeyer, J. Remele, K. Graichen. A real-time nonlinear MPC scheme with emission constraints for heavy-duty diesel engines. Eingereicht: *American Control Conference (ACC)*, Seattle (USA), 2017.
- [10] K. Harder, M. Buchholz, J. Niemeyer, J. Remele, K. Graichen. Nonlinear MPC with emission control for a real-world heavy-duty diesel engine. Eingereicht: *IFAC World Congress*, Toulouse (Frankreich), 2017.



# Learning robot manipulation tasks from human demonstrations

Maria Kyrarini \*

\* Institut für Automatisierungstechnik (IAT)  
Fachbereich Elektrotechnik  
Universität Bremen  
Otto-Hahn-Allee 1, 28359 Bremen  
Tel: +49 421 218 62461  
[mkyrar@iat.uni-bremen.de](mailto:mkyrar@iat.uni-bremen.de)

Axel Gräser \*\*

\*\* Institut für Automatisierungstechnik (IAT)  
Fachbereich Elektrotechnik  
Universität Bremen  
Otto-Hahn-Allee 1, 28359 Bremen  
Tel: +49 421 218 62444  
[ag@iat.uni-bremen.de](mailto:ag@iat.uni-bremen.de)

**Schlüsselwörter:** Robot learning, Human Robot Cooperation, Machine learning.

Traditionally, robots are caged off from humans; however, improvements in robotic technology enable human-robot collaboration [1]. The human and the robot work together as a team in the same workspace, where each member can contribute towards solving a task based on their capabilities. In this work, a framework is presented which enables robots: **A.** to learn new tasks by human demonstrations without the need of programming and, **B.** to reproduce the learned task even if there are environmental changes due to the human robot collaboration without the need of additional teaching from the human.

The human-“teacher” guides the robot’s end effector through the manipulation task via kinesthetic teaching. From those demonstrations the robot learns offline the sequence of actions (high-level learning), the demonstrated paths in order to achieve those actions (low-level learning) and reproduces successfully the task in real-time, even if the pose of involved objects change with respect to the pose during the teaching. The robot learning framework is illustrated in fig. 1 and it contains two major phases: learning (offline) phase and working (online) phase. The industrial dual-arm *Pi4 Workerbot 3* is used as robotic platform and a Vacuum gripper is connected in each arm as end-effector in the presented work.

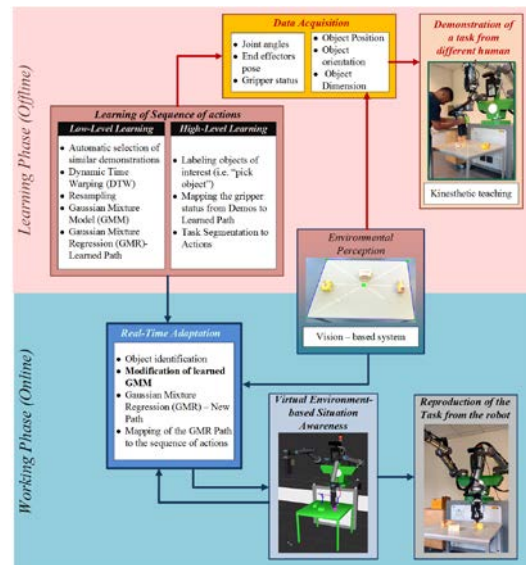


Figure 1: Overview of the Robot Learning Framework

The *offline learning phase* consists of the “*Data Acquisition*” and the “*Learning of Sequence of Actions*” modules. The “*Data Acquisition*” module stores in database the joint angles, the end effector pose (position: X, Y, Z and orientation: in quaternions) of the robotic arms and the gripper actuation status (On/Off) during the human demonstrations of the task. Moreover, the “*Data Acquisition*” module stores the following data from the “*Environmental Perception*” module: the position,

orientation and dimensions of every object in the view of the vision-based system. In the presented work, a table with the objects placed on it is in the view of the vision-based system using the *Kinect for Xbox One* camera. The “*Learning of Sequence of Actions*” module uses as input the end effector pose  $ee.pose = \{X, Y, Z, qx, qy, qz, qw\}$  of both robotic arms during demonstrations and consists of the following steps for *low-level learning*: the automatic selection of similar demonstrations [2] based on similarity measurement, the Dynamic Time Warping (DTW) [3] for alignment of the selected demonstrations, the unsupervised machine learning technique Gaussian Mixture Model (GMM) [4] which provides the mean ( $\mu$ ) and covariance ( $\Sigma$ ) matrix of the Gaussians for the 7-dimensions, Gaussian Mixture Regression (GMR) [4] which provides the learned path  $\zeta^N$  (where  $N=7$  dimensions) and for *high-level learning*: the labelling of the involved objects in a generic matter, the mapping of the gripper status to the learned path and the Task Segmentation to Actions ( $A$ ). The output of this module includes the demonstrated task presented as the mean ( $\mu$ ) and covariance ( $\Sigma$ ) matrix from Gaussian Mixture Model (GMM), the actions ( $A$ ) of moving, grasping and releasing objects and also the description of the involved objects ( $obj$ ).

In the online working phase, a novel real-time robust algorithm for modification of the learned GMM is developed, giving the ability to the robot to adapt the learned sequence of actions to the new positions and orientations of the identified objects within the workspace of the robot, to avoid obstacles that did not exist during the teaching phase and to successfully perform the task without programming or additional teaching. The input of the proposed algorithm is the  $\mu$  matrix from the learned Gaussian Mixture Model (GMM), the actions ( $A$ ) and the description of the involved objects ( $obj$ ) during the learning phase. The algorithm first identifies the objects of interest in order to perform the learned task. All other objects are treated as obstacles. Second, the proposed algorithm modifies the  $\mu$  values of the learned GMM based on the new poses of the involved objects and obstacles. At last, the Gaussian Mixture Regression (GMR) method is used to produce the new path  $\zeta^{N'}$  for the current environment. The new path  $\zeta^{N'}$  is mapped to the learned actions ( $A$ ) for the reproduction of the task by the robot.

The proposed framework has been tested with the *Pi4 Workerbot 3* in two different manipulation tasks and the results are presented.

## Literatur:

- [1] Teiwes J., Bányiger T., Kunz A., Wegener K., “Identifying the potential of human-robot collaboration in automotive assembly lines using a standardised work description”. In: *2016 22<sup>nd</sup> International Conference on Automation and Computing (ICAC)*, Essex, UK, 2016
- [2] Kyrarini M., Leu A., Ristić-Durrant D., Gräser A., “Robot Learning of Basic Skills from Human Demonstrations”. In: *XIII International SAUM Conference on Systems, Automatic Control and Measurements*, Niš, Serbia, 2016
- [3] Muller, M., “Information Retrieval for Music and Motion”, Chapter 4, *Springer*, 2007
- [4] Calinon, S. and Billard, A., “A Probabilistic Programming by Demonstration Framework Handling Constraints in Joint Space and Task Space”. In: *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pp. 367-372, 2008

# Regelung für sichere Mensch-Roboter-Interaktion

Melanie Kimmel \*

Sandra Hirche \*\*

\* Lehrstuhl für Informationstechnische Regelung  
Technische Universität München  
Barer Straße 21  
089 289 25739  
089 289 25724  
melanie.kimmel@tum.de

\*\* Lehrstuhl für Informationstechnische Regelung  
Technische Universität München  
Barer Straße 21  
089 289 25722  
089 289 25724  
hirche@tum.de

**Schlüsselwörter:** nichtlineare Regelung, beschränkte Regelung, Eingangs-Ausgangslinearisierung, Invarianz

Die direkte Interaktion von Mensch und Maschine stellt höchste Sicherheitsanforderungen. Die Anwendungen für Mensch-Maschine-Interaktion sind vielfältig und finden sich unter anderem in modernen (teil-)autonomen Fahrzeugen oder in der Mensch-Roboter-Kooperation im industriellen und häuslichen Umfeld. Derartige regelungstechnische Anwendungen erfordern die künstliche Beschränkung des nichtlinearen Systemverhaltens auf eine beschränkte, "sichere" Untermenge des Zustands- oder Ausgangsraumes.

Die beschränkte Regelung liefert geeignete Methoden, die Einhaltung von sicherheitsrelevanten Limits zu garantieren. Unter anderem bieten sich die modellprädiktive Regelung [1], Ansätze basierend auf Barrierefunktionen [2] oder die Invarianzregelung [3] an. Vorteilhafterweise kann die Invarianzregelung in ein bestehendes Regelungskonzept eingefügt werden, ohne dass das Nominalverhalten innerhalb des zulässigen Gebiets zu beeinflusst wird. Die Invarianzregelung bestimmt mit Hilfe von Eingangs-Ausgangslinearisierung ein effizient lösbares, konvexes Optimierungsproblem im Eingangsraum. Diese Optimierung liefert auch außerhalb der zulässigen Zustandsmenge eine eindeutige Lösung, die den Zustand auf die erlaubte Untermenge zurückführt. Auf Grund der vorgenannten Vorteile bietet sich die Invarianzregelung für die sichere Mensch-Maschine-Kooperation an.

Nichtlineare, steuerungsaffine Systeme mit einer existierenden Regelstruktur (Nominalregelung), die das Regelziel im unbeschränkten Fall forciert, werden mittels Invarianzregelung erweitert, um die Einhaltung der Schranken zu garantieren [4]. Dieses Grundkonzept der Invarianzregelung ist in Abb. 1 dargestellt. Der Regelungsentwurf basiert auf einer Definition der Schranken als ausreichend oft stetig ableitbare, analytische

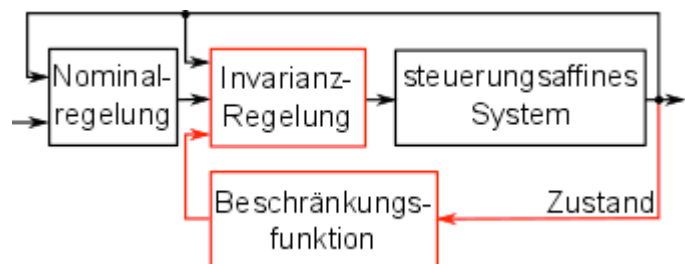


Abb. 1: Konzept der Invarianzregelung

Beschränkungsfunktionen, mit deren Hilfe sich die sogenannte Invarianzmenge bestimmen lässt. Diese bestimmt den Zeitpunkt für einen korrektiven Regeleingriff, vgl. Abb. 2. Während sich der Systemzustand innerhalb der Invarianzmenge befindet, wird der nominale Stelleingriff an den Systemeingang weitergegeben.

Befindet sich der Zustand allerdings am Rand oder außerhalb der Invarianzmenge, wird mittels Eingangs-Ausgangslinearisierung und konvexer Optimierung ein korrigierender Stelleingriff bestimmt, der eine Verletzung der Grenzen verhindert, bzw. den Zustand in die Invarianzmenge zurückführt.

Die Anwendungen für das Regelkonzept sind vielfältig, da es sowohl statische als auch dynamische Beschränkungen forciert [5,8]. Statische Grenzen können im Kontext der Mensch-Maschine-Kooperation zum Beispiel durch Gelenkwinkel- und Geschwindigkeitsbeschränkungen des Roboters oder auch durch die Umgebung gegeben sein. Menschen oder weitere Fahrzeuge/Maschinen in der näheren Umgebung werden durch dynamische Beschränkungen abgebildet. Zusätzlich zur reinen Einhaltung von Limits ist es durch Augmentation möglich, das dynamische Verhalten des Systemeingangs an die jeweilige Anwendung anzupassen [6]. Dies ist speziell bei der Kooperation mit Menschen interessant, da sich so das Systemverhalten an die menschlichen Erwartungen anpasst. Das Schnattern am Ausgang, das durch die reale Implementierung des schaltenden Regelkonzepts entsteht, kann außerdem durch geeignete Ansätze deutlich reduziert oder sogar vermieden werden [7]. Experimente an anthropomorphen Manipulatoren unterstützen die theoretischen Überlegungen und zeigen die Vorteile der Invarianzregelung für die sichere Mensch-Maschine-Kooperation.

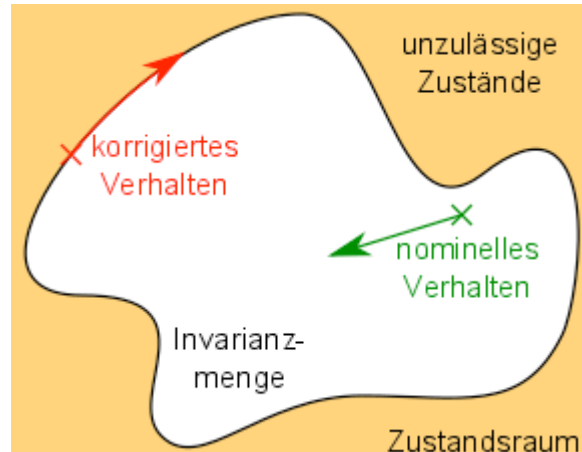


Abbildung 2: Invarianzmenge

## Literatur:

- [1] D. Mayne, J. Rawlings, C. Rao, P. Scokaert, "Constrained model predictive control: Stability and optimality," *Automatica*, 36(6):789–814, 2000.
- [2] A. Ames, J. Grizzle, P. Tabuada, "Control Barrier Function based Quadratic Programs with Application to Adaptive Cruise Control," in *IEEE Conference on Decision and Control*, 2014.
- [3] J. Mareczek, M. Buss, M.W. Spong, "Invariance Control for a Class of Cascade Nonlinear Systems," in *IEEE Transactions on Automatic Control*, 47(4):636-640, 2002.
- [4] J. Wolff, M. Buss, "Invariance Control Design for Nonlinear Control Affine Systems under Hard State Constraints," in *Symposium on Nonlinear Control Systems NOLCOS*, 2004.
- [5] M. Kimmel, S. Hirche, "Invariance Control with Time-varying Constraints," in *European Control Conference*, 2016.
- [6] M. Kimmel, C. Jähne, S. Hirche, "Augmented Invariance Control for Systems with Smoothness Constraints," in *IEEE Conference on Decision and Control*, 2016
- [7] M. Kimmel, S. Hirche, "Invariance Control with Chattering Reduction," in *IEEE Conference on Decision and Control*, 2014.
- [8] M. Kimmel, S. Hirche, "Active Safety Control for Dynamic Human-Robot Interaction," in *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2015

# Verbesserter Ansatz des kombinierten Mehrschießverfahrens mit Kollokation zur dynamischen Optimierung und Anwendung auf autonomes Fahren

Evgeny Lazutkin \*

Pu Li \*\*

\* Fachgebiet Simulation und Optimale Prozesse  
Technische Universität Ilmenau  
Postfach 10 05 65  
98684 Ilmenau  
Telefon: +49 3677 69-1427  
Fax: +49 3677 69-1434  
evgeny.lazutkin@tu-ilmenau.de

\*\* Fachgebiet Simulation und Optimale Prozesse  
Technische Universität Ilmenau  
Postfach 10 05 65  
98684 Ilmenau  
Telefon: +49 3677 69-1423  
Fax: +49 3677 69-1434  
pu.li@tu-ilmenau.de

**Schlüsselwörter:** Optimale Steuerung, Mehrschießverfahren, Kollokation, symbolische Berechnung, objektorientierte Modellierung, nichtlineare modellprädiktive Regelung, autonomes Fahren

Die Lösung großer dynamischer Optimierungsprobleme stellt vor allem für die Implementierung sowohl der nichtlinearen modellprädiktiven Regelung (NMPC) als auch der Echtzeitparameterschätzung noch eine große Herausforderung dar [1], [2]. Obwohl viele effiziente Ansätze entwickelt wurden [3] – [6], um komplexe dynamische Optimierungsprobleme zu lösen, sind weitere Untersuchungen erforderlich, um die Recheneffizienz für die Echtzeitanwendungen zu erhöhen.

In diesem Vortrag werden die Verbesserung und Erweiterung des kombinierten Mehrschießverfahrens mit Kollokation (CMSC) [7] vorgestellt. Dieses Verfahren vereinigt die Vorteile des Mehrschießverfahrens (z. B. eine leichte Realisierung paralleler Berechnungen) und des Kollokationsverfahrens (z. B. eine hohe Genauigkeit der Approximation der Zustände). Die Hauptidee besteht im Aufbau einer Optimierungswerkzeugkette (siehe Abbildung 1), die auf symbolischer Berechnung und automatischer Differentiation beruht. Diese Werkzeugkette verbindet die objektorientierten Modella-Modelle mit dem CMSC-Verfahren.

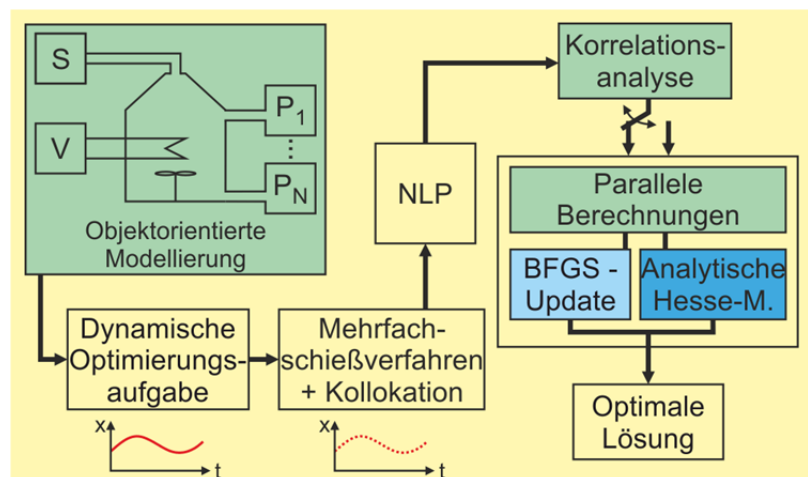


Abbildung 1: CMSC-Werkzeugkette

Die entwickelte Optimierungswerkzeugkette liefert eine verbesserte Lösung der Optimierungsprobleme im Sinne von Rechenzeit und besitzt darüber hinaus ein nutzerfreundliches Interface. Aufgrund der Eigenschaften des CMSC-Verfahrens wurde der Prototyp parallelisiert. Eine weitere Neuerung ist die symbolische Berechnung der zweiten analytischen Ableitungen. Die Notwendigkeit der Nutzung der zweiten analy-

tischen Ableitungen zur Reduzierung der Rechenzeit, um zu einer signifikanten Effizienzsteigerung beizutragen, kann durch eine modellbasierte Analyse der Korrelation der Steuergrößen a priori festgelegt werden. Die Auswirkung der Verwendung der analytischen Hesse-Matrix auf die Konvergenzgeschwindigkeit der Optimierungsrechnung wurde an stark nichtlinearen Modellen verifiziert [8].

Als eine praktische Anwendung dieses verbesserten Ansatzes wurde das autonome Fahren eines mobilen Roboters nach einer nichtlinearen modellprädiktiven Regelung realisiert. Die Realisierung besteht im Wesentlichen aus drei Teilen: (i) messtechnische Erfassung aktueller Fahrzustände durch die Odometrie und des befahrbaren, zulässigen Bereiches mittels eines Laserscanners, (ii) Prädiktion der Fahrdynamik für den zukünftigen Zeithorizont unter Berücksichtigung der Modellgleichungen, Parameter und Beschränkungen, (iii) Berechnung der Fahrstrategie in Echtzeit durch die Lösung eines dynamischen Optimierungsproblems. Die Echtzeitfähigkeit des Algorithmus wurde erfolgreich anhand unterschiedlicher Fahrsituationen (z. B. Spurhaltung und Hindernisvermeidung) getestet [9].

## Literatur:

- [1] A. Schäfer, P. Kühl, M. Diehl, J. Schlöder, and H. G. Bock, "Fast reduced multiple-shooting method for nonlinear model predictive control", *Chem. Eng. Process*, 2007, 46(11), pp. 1200–1214.
- [2] Y. Wang and S. Boyd, "Fast model predictive control using online optimization", *IEEE Trans. Control Syst. Technol.*, 2010, 18(2), pp. 267–278.
- [3] H. G. Bock and K. J. Plitt, "A multiple shooting algorithm for direct solution of optimal control problems", *Proceedings of the 9th IFAC World Congress*, Pergamon Press: New York, 1984; pp. 242–246.
- [4] L. T. Biegler, A. M. Cervantes, and A. Wächter, "Advances in simultaneous strategies for dynamic process optimization", *Chem. Eng. Sci.*, 2002, 57(4), pp. 575–593.
- [5] W. Hong, S. Wang, P. Li, G. Wozny, and L. T. Biegler, "A quasi-sequential approach to large-scale dynamic optimization problems," *AIChE J*, 52, 2006, pp. 255–268.
- [6] M. Bartl, P. Li, and L. T. Biegler, "Improvement of State Profile Accuracy in Nonlinear Dynamic Optimization with the Quasi-Sequential Approach", *AIChE J*, 57, 2011, pp. 2185–2197.
- [7] J. Tamimi and P. Li, "A combined approach to nonlinear model predictive control of fast systems", *J. Process Control*, 20(9), 2010, pp. 1092–1102.
- [8] E. Lazutkin, A. Geletu, S. Hopfgarten, and P. Li, "An analytical Hessian and parallel computing approach for efficient dynamic optimization based on control variable correlation analysis", *Ind. Eng. Chem. Res.*, 2015, pp. 12086–12095.
- [9] E. Drozdova, S. Hopfgarten, E. Lazutkin, and P. Li, "Autonomous driving of a mobile robot using a combined multiple-shooting and collocation method", *Prepr. 9th IFAC Symposium on Intelligent Autonomous Vehicles*, June 29 - July 1, 2016, Leipzig, pp. 193–198.