

21. – 23. Februar 2018

# Programm

Kurzfassungen zum Download unter:

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

## Mittwoch, 21. Februar 2018

nachmittags **Anreise**

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

## Donnerstag, 22. Februar 2018

**08:15 – 08:30** **Eröffnung und Begrüßung** (Stadthalle, Haupttagungsraum im EG)

*Prof. Georg Frey (Universität des Saarlandes)*

Haupttagungsraum im EG		Tagungsraum im 3. OG
<b>08:30 – 10:00</b>	<b>Robotik</b> Sitzungsleitung: Prof. Ferdinand Svaricek	<b>Optimale Regelung und Identifikation</b> Sitzungsleitung: Prof. Jürgen Adamy
08:30 – 09:00	Fehlertolerante Regelung mit einer parameterabhängigen Zustandsrückführung am Beispiel eines Hexacopters <i>Felix Goßmann (Institut für Steuer- und Regelungstechnik, Universität der Bundeswehr München, Prof. Dr.-Ing. Ferdinand Svaricek, Gr. 22)</i>	Ein einheitlicher Ansatz zur Trajektorienfolge- regelung von quadratischen, unter- und über- aktuerten linearen Systemen <i>Sebastian Bernhard (Institut für Automatisierungstechnik, Fachgebiet Regelungsmethoden und Robotik, Technische Universität Darmstadt, Prof. Dr.-Ing. Jürgen Adamy, Gr. 7)</i>
09:00 – 09:30	VSLAM basierte Positionsschätzung von Multicoptern <i>Mirko Franke (Institut für Regelungs- und Steuerungstheorie, Technische Universität Dresden, Prof. Dr.-Ing. habil. Klaus Röbenack, Gr. 9)</i>	Identifikation in Differentialspielen basierend auf inverser Optimalsteuerung <i>Juan Jairo Inge Charaja (Institut für Regelungs- und Steuerungssysteme IRS, Karlsruher Institut für Technologie KIT, Prof. Dr.-Ing. Sören Hohmann, Gr. 17)</i>
09:30 – 10:00	Bewegungsplanung für Zweiarroboter mit offener und geschlossener Kinematik <i>Andreas Völz (Institut für Mess-, Regel- und Mikrotechnik, Universität Ulm, Prof. Dr.-Ing. Knut Graichen, Gr. 28)</i>	Verteilte Optimierung und Regelung über gerichtete Graphen: Ein neuer Ansatz mittels Lie Klammern <i>Simon Michalowsky (Institut für Systemtheorie und Regelungstechnik, Universität Stuttgart, Prof. Dr.-Ing. Christian Ebenbauer, Gr. 28)</i>

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

10:30 – 12:00	<b>Autonome Fahrzeuge</b> Sitzungsleitung: Prof. Ulrich Konigorski	<b>Statistische Methoden / Signalverarbeitung</b> Sitzungsleitung: Prof. Andreas Kroll
10:30 – 11:00	Modellbasierte Trajektorienplanung für automatisiertes Fahren im Grenzbereich <i>Ingmar Gundlach (Institut für Automatisierungstechnik und Mechatronik, FG Regelungstechnik und Mechatronik, Technische Universität Darmstadt Prof. Dr.-Ing. Ulrich Konigorski, Gr. 7)</i>	Zur Strukturelektion bei dynamischen lokal-affinen Multi-Modellen mittels statistischer Methoden <i>Matthias Kahl (Fachgebiet Mess- und Regelungstechnik, Universität Kassel, Prof. Dr.-Ing. Andreas Kroll, Gr. 19)</i>
11:00 – 11:30	Chassisregelung für überaktuierte planetare Explorationsrover in weichem Sand <i>Stefan Barthelmes (Institut für Systemdynamik und Regelungstechnik, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Dr.-Ing. Johann Bals, Gr. 12)</i>	Statistische Verfahren zur Vorhersage der Produktqualität auf Basis industrieller Prozessdaten <i>Iris Weiß (Lehrstuhl Automatisierung und Informationssysteme, Technische Universität München, Prof. Dr.-Ing. Birgit Vogel-Heuser, Gr. 22)</i>
11:30 – 12:00	A nonlinear model of two-wheeled vehicles for control and observer design <i>Alen Turnwald (Lehrstuhl für Regelungssysteme, Technische Universität Kaiserslautern, FB EIT, Prof. Dr.-Ing. Steven Liu, Gr. 16)</i>	Nutzsignalformung zur blinden Quellentrennung <i>Sebastian Bauer (Institut für Industrielle Informationstechnik, Karlsruher Institut für Technologie KIT, Prof. Dr.-Ing. Fernando Puente León, Gr. 30)</i>

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

14:30 – 16:00	<b>Antriebe</b> Sitzungsleitung: Prof. Walter Schumacher	<b>Algorithmen</b> Sitzungsleitung: Prof. Moritz Diehl
14:30 – 15:00	$\Delta\Sigma$ -Signalverarbeitung in der Antriebsregelung <i>Axel Klein (Institut für Regelungstechnik, Technische Universität Braunschweig, Prof. Dr.-Ing. Walter Schumacher, Gr. 4)</i>	Efficient Linear Algebra for Model Predictive Control on Embedded Systems <i>Dr. Gianluca Frison (Institut für Mikrosystemtechnik (IMTEK), Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, Prof. Dr. Moritz Diehl, Gr. 10)</i>
15:00 – 15:30	Optimierung einer kennfeldbasierten Regelung mittels Reinforcement Learning am Beispiel einer Verbrennungskraftmaschine <i>Tim Daszenies (Fak. Ingenieurwissenschaften, Automatisierungstechnik und komplexe Systeme, Universität Duisburg-Essen, Prof. Dr.-Ing. Steven X. Ding, Gr. 11)</i>	Verschlüsselte prädiktive Regelung für lineare Systeme mit Beschränkungen <i>Dr. Moritz Schulze Darup (Lehrstuhl für Regelungs- und Automatisierungstechnik, Universität Paderborn, Prof. Dr. Daniel Quevedo, Gr. 23)</i>
15:30 – 16:00	Optimierung und Geräuschreduzierung eines geregelten Linearhybridschrittmotors <i>Heiko Weiß (Fakultät IA, Fachgebiet Automatisierungstechnik, Technische Universität Ilmenau, Prof. Dr.-Ing. Yuri Shardt Gr. 15)</i>	Nutzenpropagation zur verteilten Lösung partiell beobachtbarer Markow-Entscheidungsprobleme <i>Julius Pfrommer (Institut für Anthropomatik, LS Interaktive Echtzeitsysteme, Karlsruher Institut für Technologie KIT, Prof. Dr. Jürgen Beyerer, Gr. 18)</i>

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

**16:30 – 17:30 Plenarvortrag** im Haupttagungsraum EG

**KÜNSTLICHE INTELLIGENZ ... wird sie so sein wie wir?**

*Prof. Dr. Jörg Siekmann  
(Universität des Saarlandes/DFKI)*

**17:30 – 17:45 Vergabe der at-Preise** im Haupttagungsraum EG

Auszeichnung herausragender Beiträge der Zeitschrift at-Automatisierungstechnik durch den Herausgeber

**18:30 Abendessen** im Rheinhotel Bellevue

## Freitag, 23. Februar 2018

Haupttagungsraum im EG		Tagungsraum im 3. OG
<b>08:30 – 10:00</b>	<b>Anwendungen von MPC</b> Sitzungsleitung: Prof. Rolf Findeisen	<b>Regelungen</b> Sitzungsleitung: Prof. Torsten Jeansch
08:30 – 09:00	Regelungsstrategien für einen Thermoformprozess <i>Johannes Stempin (Bremer Institut für Messtechnik, Automatisierung und Qualitätswissenschaft (BIMAQ), Universität Bremen, Prof. Dr.-Ing. habil. Andreas Fischer Gr. 5)</i>	Adaptives Model Recovery Anti-Windup <i>Manus Thiel (Institut für Automatisierungstechnik Universität Rostock, Prof. Dr.-Ing. Torsten Jeansch, Gr. 24)</i>
09:00 – 09:30	Fühlende und Lernende Roboter – Prädiktive Regelung in unsicheren Umgebungen <i>Janine Matschek (Institut für Automatisierungstechnik (IFAT), Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Prof. Dr.-Ing. Rolf Findeisen, Gr. 20)</i>	Einbettung von Regelzielen in virtuelle Energietanks in der passivitätsbasierten Regelung <i>Erfan Shahriari (Institut für Regelungstechnik, Leibniz Universität Hannover, Prof. Dr.-Ing. Sami Haddadin, Gr. 14)</i>
09:30 – 10:00	Robuste dynamische Echtzeitoptimierung einer Umesterung in einer Pilotanlage für Reaktivrektifikation <i>Daniel Haßkerl (Lehrstuhl für Systemdynamik und Prozessführung, Technische Universität Dortmund, Prof. Dr.-Ing. Sebastian Engell, Gr. 8)</i>	Regelungstechnik in der Synthetischen Biologie: Konzeptionelle und experimentelle Realisierung von PID Reglern im Inneren von Zellen <i>Wolfgang Halter (Institut für Systemtheorie und Regelungstechnik, Universität Stuttgart Prof. Dr.-Ing. Frank Allgöwer, Gr. 27)</i>

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

<b>10:30 – 12:00</b>	<b>Regelungsanwendungen</b> Sitzungsleitung: Prof. Jan Lunze	<b>Verteilte Systeme / Kommunikation</b> Sitzungsleitung: Prof. Jörg Raisch
10:30 – 11:00	Stabilisierung reaktiver Sputterprozesse: Modellbildung - Reglerentwurf - Experimentelle Erprobung <i>Christian Wölfel (Lehrstuhl für Automatisierungstechnik und Prozessinformatik, Ruhr-Universität Bochum, Prof. Dr.-Ing. Jan Lunze, Gr. 3)</i>	Exploiting the Superposition Property of Wireless Communication for Average Consensus Problems in Multi-Agent Systems <i>Fabio Molinari (Fachgebiet Regelungssysteme, Technische Universität Berlin, Prof. Dr.-Ing. Jörg Raisch, Gr. 2)</i>
11:00 – 11:30	Real-Time Power Balancing in Photovoltaic-Integrated Smart Micro-Grid <i>Daud Mustafa Minhas (Lehrstuhl für Automatisierungs- und Energiesysteme, Universität des Saarlandes, Prof. Dr.-Ing. Georg Frey Gr. 25)</i>	Compositional abstraction for interconnected stochastic hybrid systems <i>Asad Awan (Lehrstuhl für Hybride Regelungssysteme, Technische Universität München, Prof. Dr. Majid Zamani, Gr. 21)</i>
11:30 – 12:00	Robuste physiologische Regelung von Herzunterstützungssystemen <i>Daniel Rüschen (Lehrstuhl für medizinische Informationstechnik, Helmholtz-Institut, RWTH Aachen, Prof. Dr.-Ing. Dr. med. Klaus Steffen Leonhardt, Gr. 1)</i>	Synthese einer Regelgröße zur Sicherung der Quality of Service industrieller Kommunikationssysteme <i>Sarah Willmann (Institut für Automatisierungstechnik (IFAT), Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Prof. Dr.-Ing. Christian Diedrich, Gr. 20)</i>

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

**Prämierung des besten Vortrags**

Vorurteile – Regelungs- und Automatisierungstechnik in der Chemie-Industrie  
*Prof. Dr.-Ing Joachim Birk und Dr.-Ing. Matthias Roth (BASF SE)*

**Aufruf für Boppard 2018**

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

**13:45 Ende des Kolloquiums**

# Robuste physiologische Regelung von Herzunterstützungssystemen

Daniel Rüschen, Marian Walter, Steffen Leonhardt

Lehrstuhl für Medizinische Informationstechnik  
RWTH Aachen  
Pauwelsstr. 20, 52074 Aachen  
0241 / 80-23211  
0241 / 80-623211  
{rueschen,walter,leonhardt}@hia.rwth-aachen.de

**Schlüsselwörter:** Herzunterstützung, Physiologische Modellierung, Physiologische Regelung, Robuste Regelung, Rotatorische Blutpumpen

Die Therapie der fortgeschrittenen Herzinsuffizienz mit Linksherzunterstützungssystemen (LVADs) hat sich in den letzten Jahren zu einer echten Alternative zur Herztransplantation entwickelt. Dies ist zum einen auf die technischen Verbesserungen der LVADs und die damit einhergehenden höheren Therapieerfolge zurückzuführen, ist aber vor allem eine Folge des zunehmenden Mangels an Spenderherzen [1]. Inzwischen werden überwiegend rotatorische Blutpumpen als LVADs eingesetzt, deren Zweck es ist das geschwächte natürliche Herz zu entlasten und das Herzzeitvolumen zu erhöhen. Dies wird erreicht, in dem Blut aus dem linken Ventrikel in die Aorta gepumpt wird.

In der klinischen Praxis werden Blutpumpen mit konstanter Drehzahl betrieben, es findet demnach keine aktive Anpassung an den Blutflussbedarf des Patienten statt. Unerwünschte Betriebsbedingungen wie das Ansaugen der Pumpe an die Herzwand oder die ungenügende Entlastung des Ventrikels können so nicht verhindert werden. Es existieren zahlreiche Ansätze zum bedarfsgesteuerten Betrieb von LVADs, einen umfassenden Überblick über sogenannte physiologische Regler bietet [2]. Trotz der vielen publizierten Ansätze sind zwei aus regelungstechnischer Sicht zentrale Fragen unbeantwortet: Was ist die Regelgröße und was ist deren Sollwert?

In diesem Beitrag wird ein robustes Regelungskonzept vorgestellt, das eine definierte Verteilung der Last zwischen dem Herzen und der Blutpumpe sicherstellt. Dafür wird eine relative Größe, der sogenannte Unterstützungsgrad, als Regelgröße verwendet [3]. Dieser ist als das zeitgemittelte Verhältnis von Pumpenfluss und gesamtem Blutfluss definiert. Durch die Nutzung einer auf den gesamten Blutfluss bezogenen relativen Größe als Sollwert werden die verbleibenden physiologischen Regelkreise des Patienten verstärkt, die

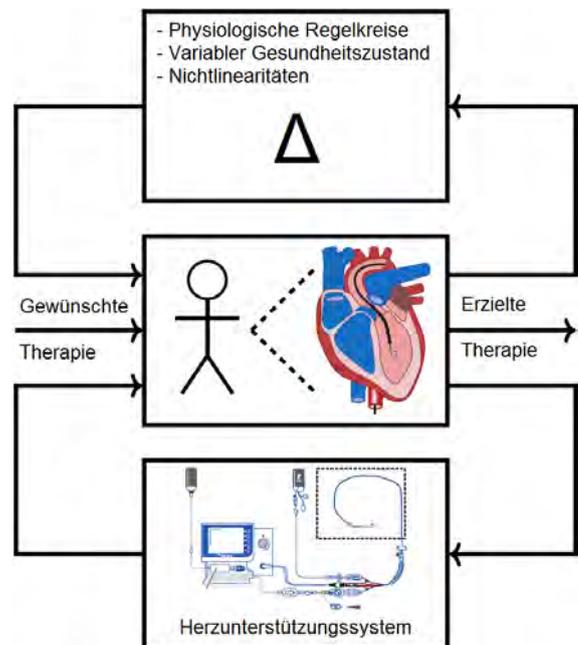


Abbildung 1: Herzunterstützung als generalisierte Strecke zur Auslegung eines  $H^\infty$ -Reglers

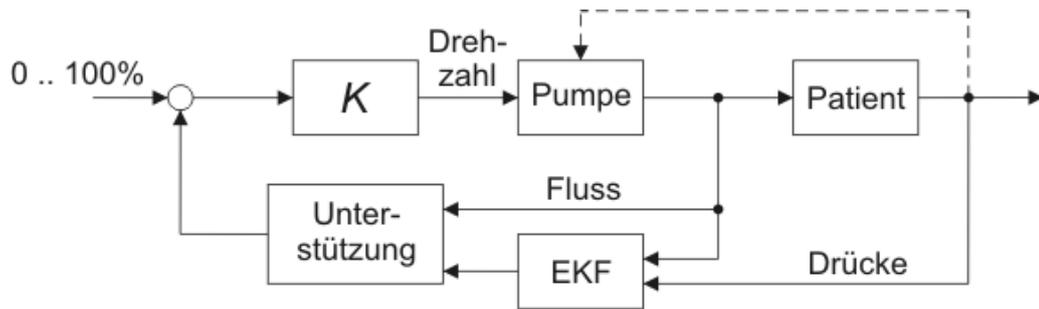


Abbildung 2: Blockschaltbild des Gesamtsystems

Blutpumpe erzeugt so einen zur Auswurfleistung des Herzens proportionalen Fluss. Zu diesem Zweck wurde ein  $H^\infty$ -Regler entworfen, der als Strecke ein detailliertes Modell des kardiovaskulären Systems [4] und der Blutpumpe (Impella CP, Abiomed Inc.) enthält (siehe Abb. 1). Ersteres wurde in ein lineares Modell mit parametrischen Unsicherheiten transformiert, das sowohl den physiologischen („gesunden“) als auch den pathologischen („kranken“) Fall sowie die Nichtlinearitäten des Patienten beschreibt. Eine  $\mu$ -Analyse belegt, dass der resultierende Regler robust stabil ist. Abbildung 2 zeigt ein Blockdiagramm des Gesamtsystems, der robuste Regler  $K$  stellt die Soll-drehzahl der Blutpumpe auf Basis der Abweichung vom gewünschten Unterstützungsgrad. Diese wird aus dem Pumpenfluss und dem mit einem Extended Kalman Filter [5] geschätzten gesamten Blutfluss berechnet.

Das Gesamtsystem wurde in Simulink (The MathWorks Inc.) implementiert und auf einem Echtzeitrechner (MicroAutoBox II, dSPACE GmbH) ausgeführt. Die Regelungsstrategie wurde sowohl in einem Hardware in the Loop Prüfstand als auch im Tierversuch mit herzinsuffizienten Schafen erfolgreich getestet. Der Unterstützungsgrad-Regler erhält einen ausreichenden Blutkreislauf aufrecht, wenn die natürlichen physiologischen Regelkreise, die den gesamten Blutfluss beeinflussen, noch intakt sind. Dies ermöglicht die zukünftige Definition von Therapieprotokollen mit Zielen wie zum Beispiel Herzerholung oder Entwöhnung unabhängig von einer bestimmten Blutpumpe oder einem speziellen Patienten.

## Literatur:

- [1] A. Prinzing, U. Herold, A. Berkefeld, M. Krane, R. Lange, B. Voss, „Left ventricular assist devices - current state and perspectives“, *Journal of Thoracic Disease* 8(8), pp. E660-E666, 2016.
- [2] S. Bozkurt, „Physiologic outcome of varying speed rotary blood pump support algorithms: a review study“, *Australasian Physical & Engineering Sciences in Medicine* 39(1), pp. 13-28, 2016.
- [3] D. Rüschen, S. Opitz, L. Korn, S. Leonhardt, M. Walter, „Robust assistance control of left ventricular assist devices“, *Proc. of EMBECE & NBC '17*, Tampere, Finland, pp. 294-297, 2017.
- [4] F. M. Colacino, F. Moscato, F. Piedimonte, M. Arabia, G. A. Danieli, „Left ventricle load impedance control by apical VAD can help heart recovery and patient perfusion: a numerical study“, *ASAIO Journal* 53(3), pp. 263-277, 2007.
- [5] D. Rüschen, M. Rimke, J. Gesenhues, S. Leonhardt, M. Walter, „Online cardiac output estimation during transvalvular left ventricular assistance“, *Computer Methods and Programs in Biomedicine* (epub ahead of print), 2016.

# Exploiting the Superposition Property of Wireless Communication for Consensus Problems in Multi-Agent Systems \*

Fabio Molinari

Fachgebiet Regelungssysteme

Fakultät für Elektrotechnik und Informatik

TU Berlin

Einsteinufer 17, Sekr. EN11, 10587 Berlin

[molinari@tu-berlin.de](mailto:molinari@tu-berlin.de)

**Keywords:** Consensus-based Control, Wireless Communication, Multi-Agent Systems, Cooperative Control.

Achieving consensus is an essential task in many distributed control scenarios where a number of control units (“agents”) interact to achieve a common aim. Consensus problems in multi-agent systems require the agents to reach an agreement over a certain real-valued scalar or vector, e.g., [1–3]. Each agent has a local guess of this entity, called the agent’s information state, which has to be updated according to some rule, typically a function of the information states of neighbouring agents. Consensus is achieved if all the information states converge to the same value.

Classical approaches consider communication and computation as two distinct aspects. Communication strategies are usually designed to reliably deliver the agents’ information states to neighbouring agents by creating independent communication channels. Each agent can therefore be assumed to have knowledge of all its neighbours’ information states. In general, however, each agent is only interested in a function of those information states. The latter clearly carries less information (in an information-theoretic sense) than the knowledge of the individual information states. This potentially allows significant performance gains by shifting some computational tasks from of the individual agents to the underlying wireless communication system, thus merging communication and computation.

In their representation (or superposition) theorem, Kolmogorov and Arnol’d [4, 5] solved a generalised version of Hilbert’s 13th problem regarding the possibility of representing a multivariate function by functions of fewer variables, e.g., [6]. Based on this, Buck [7] proved that every real-valued multivariate function is representable in its nomographic form, as a function of a finite sum of univariate functions. Inspired by this result, [8] concluded that the superposition property of the wireless channel can be harnessed to approximate an arbitrary function of the transmitted signals. According to this, each agent simultaneously broadcasts a suitably chosen function of its information state. Then, each agent postprocesses the received signal, which is a noisy superposition of the locally preprocessed information states transmitted by its neighbours, to estimate the desired function value.

---

\* Joint work with Sławomir Stańczak (Fachgebiet Netzwerk-Informationstheorie) and Jörg Raisch (Fachgebiet Regelungssysteme), TU Berlin

If the goal is to achieve average consensus, the employed consensus function is typically linear in the neighbouring agents' information states. In this case, the consensus function is already expressed in its nomographic representation with both pre- and postprocessing functions continuous in the set of real numbers [8]. Using the superposition property of wireless channels then allows for significantly faster convergence when compared to standard communication protocols, but introduces distortions (namely, the unknown channel coefficients) proportional to the transmitted signals, which, if not properly addressed, will cause undesired behaviour. How to appropriately handle unknown and possibly time-varying channel coefficients in the described context is one of the topics in the project "Cooperative Consensus-based Control of Multiagent Systems over Wireless Channels" [Stańczak, Raisch] funded by DFG within their priority programme 1914 ("Cyber-Physical Networking"). First results on this issue [9] will be presented in this talk.

## References

- [1] M. H. DeGroot, "Reaching a consensus," *Journal of the American Statistical Association*, vol. 69, no. 345, pp. 118–121, 1974.
- [2] W. Ren, R. W. Beard, and E. M. Atkins, "Information consensus in multivehicle cooperative control," *IEEE Control Systems*, vol. 27, no. 2, pp. 71–82, 2007.
- [3] R. Olfati-Saber, J. A. Fax, and R. M. Murray, "Consensus and cooperation in networked multi-agent systems," *Proceedings of the IEEE*, vol. 95, no. 1, pp. 215–233, 2007.
- [4] A. N. Kolmogorov, "On the representation of continuous functions of many variables by superposition of continuous functions of one variable and addition," *Translations American Mathematical Society*, vol. 2, no. 28, pp. 55–59, 1963.
- [5] V. I. Arnol'd, "On the representation of continuous functions of three variables by superpositions of continuous functions of two variables," *Matematicheskii Sbornik*, vol. 90, no. 1, pp. 3–74, 1959.
- [6] G. G. Lorentz, "The 13th problem of hilbert," in *Proceedings of Symposia in Pure Mathematics*, vol. 28, pp. 419–430, 1976.
- [7] R. C. Buck, "Approximate complexity and functional representation," *Journal of Mathematical Analysis and Applications*, vol. 70, no. 1, pp. 280–298, 1979.
- [8] M. Goldenbaum, H. Boche, and S. Stańczak, "Nomographic gossiping for f-consensus," in *Modeling and Optimization in Mobile, Ad Hoc and Wireless Networks (WiOpt), 2012 10th International Symposium on*, pp. 130–137, IEEE, 2012.
- [9] F. Molinari, S. Stańczak, and J. Raisch, "Exploiting the superposition property of wireless communication for average consensus problems in multi-agent systems," 2017. Submitted for publication.

# Stabilisierung reaktiver Sputterprozesse: Modellbildung – Reglerentwurf – Experimentelle Erprobung

Christian Wölfel \*

\* Lehrstuhl für  
Automatisierungstechnik und Prozessinformatik  
Ruhr-Universität Bochum  
Universitätsstr. 150  
0234 32 24091  
woelfel@atp.rub.de

Jan Lunze \*\*

\*\* Lehrstuhl für  
Automatisierungstechnik und Prozessinformatik  
Ruhr-Universität Bochum  
Universitätsstr. 150  
0234 32 24071  
lunze@atp.rub.de

**Schlüsselwörter:** Systemanalyse, Modellreduktion, Prozessstabilisierung

Reaktive Zerstäubungsprozesse erlauben die plasmabasierte Veredelung von mechanischen Werkzeugen, Halbleitern und Optiken. Bei diesen Verfahren werden nanostrukturierte Dünnschichten unter Nutzung von Niederdruckplasmen, Festkörpern und reaktiven Gasen auf Substratmaterialien (Abb. 1) abgeschieden.

Obwohl sich diese Verfahren in der industriellen Nutzung etabliert haben, sind die Prozesse aus regelungstechnischer Sicht noch weitgehend unerforscht. In diesem Vortrag soll daher ausgehend von der physikalischen Modellierung reaktiver Zerstäubungsprozesse eine Brücke hin zu deren systematischer Regelung gespannt werden. Hierbei ist ein wesentliches Regelungsziel die Stabilisierung instabiler Arbeitspunkte (Abb. 1 (P3)), welche eine hohe Prozessgeschwindigkeit und gute Dünnschichteigenschaften aufweisen.

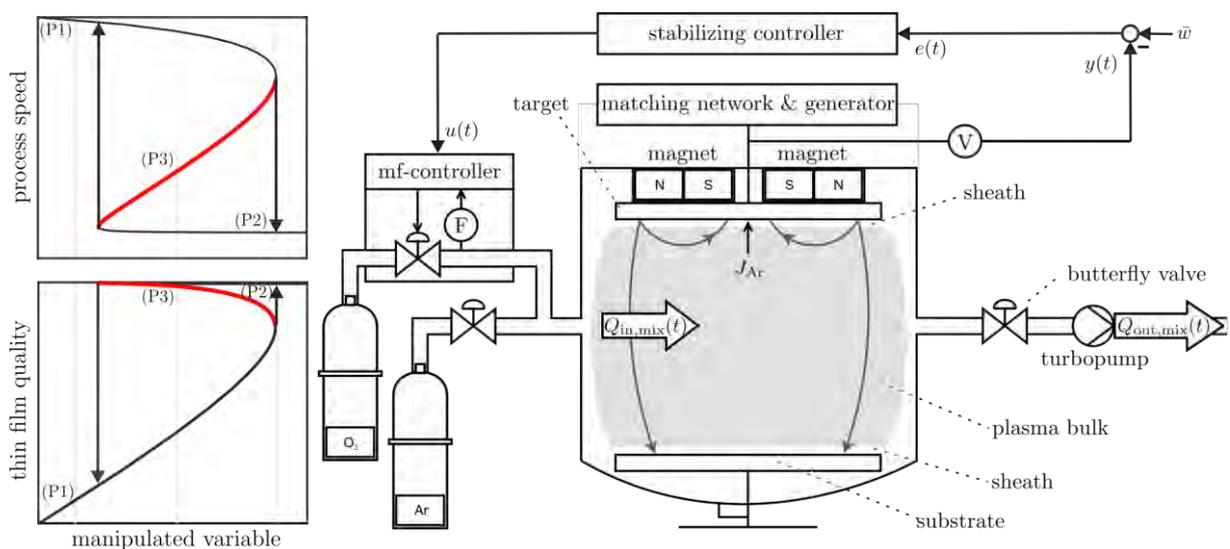


Abbildung 1: Plasmareaktor und Prozesskennlinien

Im Fokus des ersten Vortragsteils steht die Modellbildung des nichtlinearen Prozesses. Mittels einer systemtheoretischen Analyse wird die Systemklasse des Prozesses identifiziert und ein reduziertes Modell aufgestellt [1]. Das regelungstechnisch orientierte Modell in Form einer Abelschen Differentialgleichung beschreibt das Eingangs-/Ausgangsverhalten des Prozesses und berücksichtigt insbesondere die Prozessinstabilitäten für einen Reglerentwurf.

Im zweiten Teil des Vortrags wird die systematische Stabilisierung des Prozesses unter Nutzung einer elektrischen Spannung als Regelgröße, welche die Prozessgeschwindigkeit charakterisiert, und einem Reaktivgasfluss als Stellgröße diskutiert (Abb. 1). Mittels Lyapunovs Direkter Methode können Reglerparameterintervalle bestimmt werden, welche die Formulierung von Einstellregeln [2] und eines High-Gain-Ansatzes [3] zur robusten Parametrierung eines Reglers niedriger Ordnung erlauben. Experimentelle Untersuchungen an einem Plasmareaktor unterstreichen die Anwendbarkeit des vorgestellten Modelles und der Reglerentwurfsmethoden.

Der Vortrag schließt mit einem Ausblick auf die plasmabasierte Mehrgrößenregelung nichtlinearer reaktiver Zerstäubungsprozesse, welche eine Zusammenarbeit zwischen Plasma-, Material- und Regelungstechnikern notwendig macht und die erreichbare Qualität abgeschiedener Dünnschichten verbessern soll.

## **Literatur:**

- [1] C. Wölfel, P. Awakowicz, J. Lunze: *Model reduction and identification of nonlinear reactive sputter processes*. In Proc. of the 20<sup>th</sup> IFAC World Congress, Toulouse, France, 2017, pp. 14292-14298.
- [2] C. Wölfel, P. Awakowicz, J. Lunze: *Tuning rule for linear control of nonlinear reactive sputter processes*. In Proc. of the 21<sup>st</sup> International Conference on Process Control, Štrbské Pleso, Slovakia, 2017, pp. 109-114.
- [3] C. Wölfel, P. Awakowicz, J. Lunze: *Robust high-gain control of nonlinear reactive sputter processes*. In Proc. of the 1<sup>st</sup> IEEE Conference on Control Technology and Applications, Hawai'i, USA, 2017, pp. 25-30.

# $\Delta\Sigma$ -Signalverarbeitung in der Antriebsregelung

Axel Klein, M. Sc.

Institut für Regelungstechnik  
TU Braunschweig  
Hans-Sommer-Str. 66  
0531/391-3834  
0531/391-5194  
klein@ifr.ing.tu-bs.de

**Schlüsselwörter:** Kurzfassung des Vortrags,  $\Delta\Sigma$ -Signalverarbeitung, Regelung elektrischer Antriebe, Raumzeiger Modulation

Delta-Sigma Analog-Digital-Umsetzer, bestehend aus Modulator und digitalem Tiefpassfilter, werden zunehmend in der Antriebstechnik eingesetzt. Ein neuer Ansatz ist die direkte, hochfrequente ( $\geq 10\text{MHz}$ ) Signalverarbeitung des Bitstroms. Die Vorteile sind eine hohe Bandbreite und einfache Synchronisation verschiedener Taktebenen. In dieser Veröffentlichung werden Verfahren der  $\Delta\Sigma$ -Signalverarbeitung ( $\Delta\Sigma$ -SV) vorgestellt [1–3]. Dabei wird insbesondere auf die Kleinsignalbandbreite und

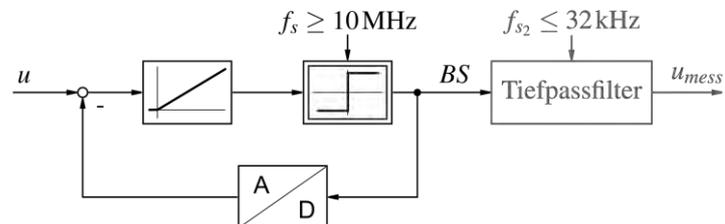


Abbildung 1:  $\Delta\Sigma$ -Modulator mit Tiefpassfilter (in grau)

Abbildungsqualität der Verfahren eingegangen. Weiterhin wird betrachtet, welche Effekte bei einer Kaskadierung von Operationen auftreten [4]. Anschließend wird ein drei phasiger  $\Delta\Sigma$ -PWM-Modulator vorgestellt [5], der die hohe Frequenz der  $\Delta\Sigma$ -Bitströme auf eine Halbleiter kompatible mittlere Schaltfrequenz umsetzt. Am Beispiel der Regelung einer permanenterrregten Synchronmaschine werden die unterschiedlichen Betriebsmodi des Modulators [6] vorgestellt.

Aufgrund der Eigenheit, dass ein Bitstrom, der nur aus Nullen und Einsen besteht, keinen aussagekräftigen Augenblickswert besitzt, wird zur Bewertung der Laufzeit und der Signalqualität ein Sinc-Filter mit bekannten Eigenschaften eingesetzt [7]. Als Merkmal der Signalqualität wird der Signal zu Rauschabstand und Klirrfaktor (SNDR) der gefilterten Bitströme verwendet. Die Abwesenheit von aussagekräftigen Augenblickswerten führt zu der Kombination analoger und digitaler Systemeigenschaften. Die Parameter der Operationen sind digital und unterliegen somit keinem Drift und keiner Temperaturabhängigkeit. Bedingt durch die hohe Abtastrate sind Laufzeiten in der Größenordnung von analogen Operationen erzielbar [4]. Eine weitere aus dem Analogen bekannte Eigenschaft ist das Hinzufügen von Rauschen mit jeder Operation. Besonders bei der Realisierung von Modellfolgeregelungen oder Kaskadenregelungen ist die Signalqualität hinter einer Kaskade von Operationen zu betrachten.

Der auf der  $\Delta\Sigma$ -SV basierende  $\Delta\Sigma$ -PWM-Modulator wird zur Stromregelung einer PMSM, wie in Abbildung 2 dargestellt, verwendet. Das zentrale Element bildet ein zwei dimensionales Hystereseelement, das abhängig vom integrierten Regelfehler schaltet. Dabei werden sowohl Betrags- wie Phasenhysterese ausgewertet. Der  $\Delta\Sigma$ -PWM-Modulator hat in Abhängigkeit der Spannungsausnutzung des Zwischenkreises mehrere Betriebszustände: Raumzeiger Modulation, Auslassen von einzelnen Nullvektoren, Übermodulation und Übermodulation mit

Überlaufbegrenzung. Zwischen diesen Betriebszuständen wechselt der  $\Delta\Sigma$ -PWM-Modulator bei Bedarf nahtlos, um den angeforderten Strom in den Motor einzuprägen.

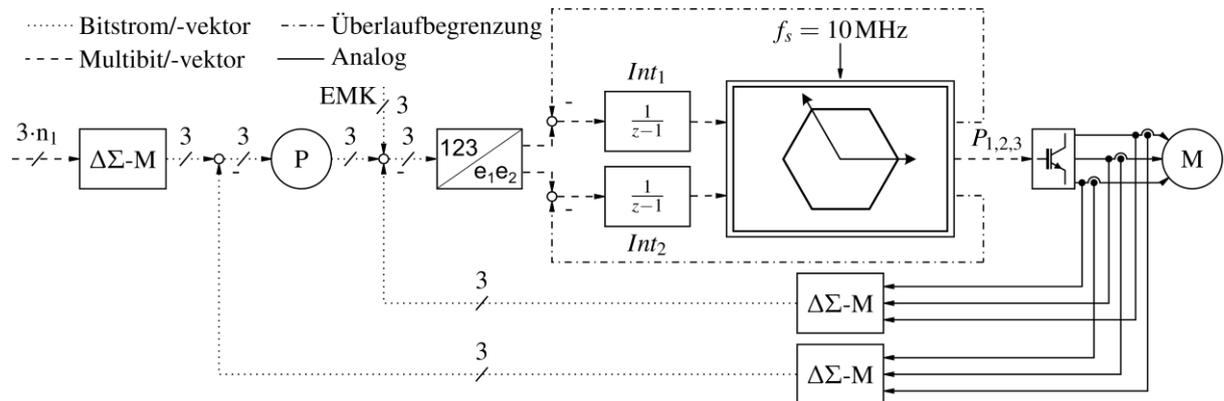


Abbildung 2:  $\Delta\Sigma$ -PWM-Modulator mit Stromregelung

Die Implementierung der dreiphasigen Motorregelung wird am Prüfstand erprobt.

## Literatur:

- [1] M. Homann, "Hochdynamische Strom- und Spannungsregelung von permanenterregten Synchronmaschinen auf Basis von Delta-Sigma Bitströmen," Dissertation, TU Braunschweig, Braunschweig, 2016.
- [2] N. Patel, "Bit-streams: Applications in Control," Dissertation, University of Auckland, Electrical and Computer Engineering, University of Auckland, 2006.
- [3] A. Pneumatikakis and T. Deliyannis, "Direct processing of Sigma-Delta signals," in *Electronics, Circuits, and Systems, 1996. ICECS '96., Proceedings of the Third IEEE International Conference on*, 1996, pp. 13–16.
- [4] M. Homann, A. Klein, and W. Schumacher, "Direct Delta Sigma Signal Processing for Control of Power Electronics," in *International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management (PCIM)*, 2016.
- [5] M. Homann and W. Schumacher, "Stromrichter und Computerprogramm," DE 102014108667 A1.
- [6] A. Klein, M. Thielmann, M. Homann and W. Schumacher, "Operation Modes of a High Bandwidth Three Phase Hysteresis Modulator based on Delta Sigma Bitstreams," pp. 1–10.
- [7] M. Homann, A. Klein, R. Kirchner, and W. Schumacher, "Quasi-kontinuierliche Signalverarbeitung mit Delta Sigma Bitströmen in der Antriebstechnik - Ein Überblick," in *Fortschritte in der Antriebs- und Automatisierungstechnik*, 2016, pp. 215–227.

# Regelungsstrategien für einen Thermoformprozess

Johannes Stempin\*

\* BIMAQ  
Universität Bremen  
Linzer Str. 13  
0421/218-64622  
0421/218-64670  
j.stempin@bimaq.de

Prof. Dr.-Ing. habil. Andreas Fischer\*\*

\*\* BIMAQ  
Universität Bremen  
Linzer Str. 13  
0421/218-64600  
0421/218-64670  
andreas.fischer@bimaq.de

**Schlüsselwörter:** Qualitätsregelung, Mehrgrößenregelung, nichtlineare modellbasierte Regelung

Der Einsatz von polymeren Faserverbundwerkstoffen (Organoblechen) bietet Vorteile in der Fahrzeug- und Flugzeugindustrie, da sie Leichtbaupotential und eine Korrosionsbeständigkeit besitzen. Bei der Produktion kommt es im Gegensatz zu den etablierten Metallbauteilen zu Qualitätsabweichungen, z.B. in Form der Bauteildicke oder des Bauteilverzuges. Diese resultieren aus einer bisher defizitären Prozessbeherrschung. Um die Produktivität zu erhöhen und eine Wirtschaftlichkeit der Werkstoffe zu erreichen, ist eine Regelung des Fertigungsprozesses notwendig.

Der Prozess besteht aus vier unterlagerten Teilprozessen, welche einen Einfluss auf das gefertigte Bauteil besitzen (Abbildung 1). Zu Beginn erfolgt die Erwärmung des Halbzeuges, bis zum Aufschmelzen der thermoplastischen Matrix. Danach wird das Halbzeug in einer Presse platziert. Im folgenden Pressvorgang findet die Umformung statt, hierbei sind sowohl der Pressdruck als auch die Werkzeugtemperatur der Presse vorzugebene Prozessparameter. Nach einer variablen Pressdauer findet abschließend das Entformen des Bauteils statt, nach welchem es seine aufgeprägte Geometrie behält.

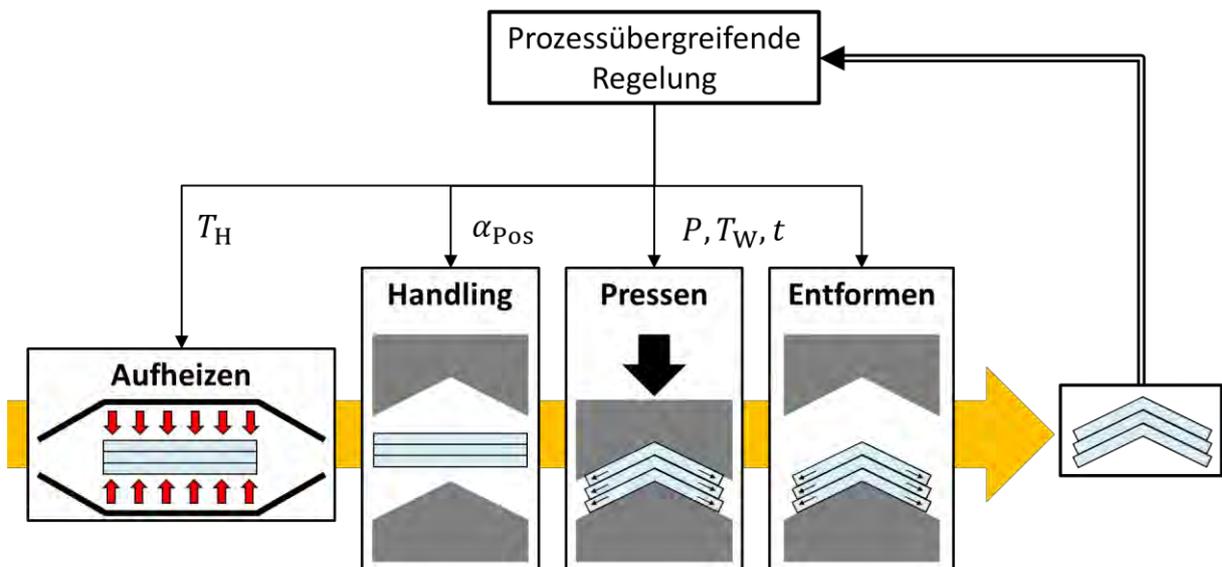


Abbildung 1: Teilprozesse des Thermoformprozesses

Ziel ist die Realisierung einer prozessübergreifenden Regelung. Diese steuert die vier Teilprozesse so, dass das resultierende Organoblech gegebenen Qualitätsanforderungen entspricht, wie z.B. das die Faserorientierung in festgelegten Toleranzen liegt. Da sowohl mehrere Stell- als auch Regelgrößen vorhanden sind, handelt es sich um ein Mehrgrößenproblem.

Eine Problematik bei der Qualitätsregelung ist der fehlende bzw. schwierig zu ermittelnde, im Allgemeinen nichtlineare Zusammenhang zwischen den Stell- und Regelgrößen. Aus diesem Grund wird eine Approximation des Prozessverhaltens durchgeführt [1]. Weiterhin kann eine Messung am Organoblech wegen fehlender In-Prozess-Sensorik erst nach dem Prozess erfolgen. Somit wird der Regelkreis zeitdiskret ausgeführt.

Der Regelungsansatz basiert auf einem Kompensationsregler [2]. Hierbei wird die Dynamik der Regelstrecke durch ein vorgeschaltetes inverses Streckenmodell kompensiert, sodass die Dynamik des Regelkreises durch den Regler festgelegt wird. Zur Invertierung wird zunächst ein lineares Modell verwendet, welches aus Vorversuchen generiert wurde.

Darüber hinaus erfolgt die Anwendung einer nichtlinearen modellprädiktiven Regelung. Die Modellbildung zur Beschreibung der Regelstrecke erfolgt in diesem Fall mittels Radialer-Basisfunktionen-Netze, welchen ebenfalls mittels der genannten Vorversuche trainiert wurden. Dies stellt einen universellen, heuristischen Ansatz zur approximativen Beschreibung des Übertragungsverhaltens der Regelstrecke dar [3]. Die Streckeninvertierung erfolgt numerisch, wobei eine Vorwärtssimulation des Streckenmodells und eine Iteration der Stellgrößen solange durchgeführt wird, bis die vorliegende Regelgröße erreicht ist.

Im Ergebnis wird basierend auf Simulationen und ersten Experimenten am realen Prozess gezeigt, dass der Prozess mittels beider prozessübergreifender Regelungsansätze beherrschbar ist. Dabei erfolgt ein Vergleich zwischen dem linearen und dem nichtlinearen Regelungsansatz z.B. bezüglich der erreichbaren Ausregelzeit und des Störverhaltens beim Thermoformprozess.

„Das IGF-Vorhaben 19336N der Forschungsvereinigung Forschungsgemeinschaft Qualität e.V. (FQS), August-Schanz-Straße 21A, 60433 Frankfurt am Main wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.“

## **Literatur:**

- [1] Ament, C.: Direkte Regelung der Werkstückqualität in der Fertigung. *Habilitation*, Universität Bremen; 2005
- [2] Lunze J.: Regelungstechnik 1, *Springer-Lehrbuch*. 10., aktual. Aufl. Berlin, Springer Vieweg, 2014
- [3] Park, J. Sandberg, I.: Universal approximation using radial-basis-funktion networks. *Neural computation* 3 (1991) 246-257

# Modellbasierte Trajektorienplanung für automatisiertes Fahren im Grenzbereich

Dipl.-Ing. Ingmar Gundlach\*

\* Institut für Automatisierungstechnik  
TU Darmstadt  
Landgraf-Georg-Str. 4, 64283 Darmstadt  
(06151) 16-25189  
(06151) 16-25172  
igundlach@iat.tu-darmstadt.de

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

\*\* Institut für Automatisierungstechnik  
TU Darmstadt  
Landgraf-Georg-Str. 4, 64283 Darmstadt  
(06151) 16-25200  
(06151) 16-25172  
ukonigorski@iat.tu-darmstadt.de

**Schlüsselwörter:** Automatisiertes Fahren, zeitoptimale Trajektorienplanung, fahrdynamischer Grenzbereich

Um automatisiert fahren zu können, ist neben der Regelung des Fahrzeugs die Berechnung der optimalen Trajektorie von entscheidender Bedeutung. Diese Trajektorie muss die Modellgleichungen erfüllen und Beschränkungen wie Fahrbahnränder einhalten. Zudem ist ein Gütemaß zu formulieren, das die Qualität einer Trajektorie beurteilt. Hierdurch entsteht ein komplexes nichtlineares dynamisches Optimierungsproblem.

In diesem Beitrag wird speziell die zeitoptimale Trajektorienplanung betrachtet, die das Ziel hat, einen vorgegebenen Streckenverlauf in möglichst kurzer Zeit zu durchfahren. Die Berechnung solcher Rennlinien ist zum einen im Rennsport von Interesse, um die Ideallinie in Abhängigkeit von Fahrzeugparametern zu bestimmen. Zum anderen können die Ergebnisse genutzt werden, um Fahrzeuge zu entwickeln und zu testen, die automatisiert am physikalischen Limit fahren können. Ein mögliches Einsatzgebiet dieser Technik sind automatische Ausweichmanöver, die es aufgrund äußerer Einflüsse (plötzliche Hindernisse oder niedrige Reibwerte) erfordern, den Kraftschluss vollständig auszunutzen.

Viele Ansätze zur Berechnung einer Ideallinie ermitteln für jeden Kurvenapex stationär die maximale Geschwindigkeit und simulieren dann die Strecke vor- und rückwärts, um die maximalen Beschleunigungen an allen Punkten zu finden [1]. Alle quasistatischen Methoden sind zwar rechenzeiteffizient, jedoch berücksichtigen sie weder Einflüsse von Fahrzeugparametern noch transiente Effekte, sodass i. A. kein Optimum garantiert wird [2, 3]. Gerade im Grenzbereich wirken sich diese Effekte aber aus und sollen hier berücksichtigt werden.

Neben dem Fahrzeugmodell ist die Wahl des Koordinatensystems wichtig für die Formulierung eines geeigneten Gütemaßes. Ein ideales Gütemaß minimiert die reine Fahrzeit. Ist die Zeit, wie üblich, unabhängiger Parameter, entsteht ein Optimierungsproblem mit freier Endzeit. Da der Streckenverlauf aber im Vorfeld bekannt ist, bietet es sich an, die Wegkoordinate  $s$  einer Referenzlinie als unabhängigen Parameter zu verwenden und die zu optimierende Zeit als abhängige Zustandsgröße zu modellieren. So wird die Problematik der freien Endzeit im Gütefunktional umgangen und alle Größen sind wegbezogen. Hierfür muss ein analytischer Zusammenhang zwischen dem Weginkrement  $ds$  auf einer Referenzlinie und dem Zeitinkrement  $dt$  ermittelt werden [2]. Es zeigt sich, dass der Zusammenhang  $ds/dt$  alleine auf Basis geometrischer und kinematischer

Beziehungen angegeben werden kann und für eine Geschwindigkeit  $v_s > 0$  in  $s$ -Richtung auch invertierbar ist. Die Referenzlinie wird hierfür durch ihre Krümmung  $\kappa(s)$  und ihre Orientierung beschrieben, die relative Fahrzeugposition und -ausrichtung durch den orthogonalen Abstand und den Winkel zur Tangente der Referenzlinie.

Das Gütemaß ist also Zeit- pro Weginkrement über die gesamte Strecke integriert und somit die Rundenzeit selbst. Das Fahrzeugmodell ist ein nichtlineares Einspurmodell mit Pacejka-Reifenmodell unter Berücksichtigung einer dynamischen Bremskraftverteilung sowie der dynamischen Radlastverteilung aufgrund von Fahrzeuglängsbeschleunigung und Fahrbahnneigung. So kann der Einfluss von Fahrzeugparametern auf die Ideallinie untersucht werden.

Neben der Offline-Trajektorienplanung für die gesamte Strecke ist eine Online-Planung erforderlich, die im Falle eines Hindernisses eine näherungsweise zeitoptimale Ausweichtrajektorie berechnet. Sie muss in kurzer Zeit eine Trajektorie für einen Streckenabschnitt planen und dabei sicherstellen, dass eine physikalisch mögliche Anschlusstrajektorie gefunden werden kann. Dafür kann sie auf die Ergebnisse der Vorausplanung zugreifen.

Es wurde eine modellbasierte Optimierung der Fahrzeit durchgeführt, anhand derer die Auswirkung von Fahrzeugparametern gezeigt werden kann. Hierfür wurde das zeitabhängige Problem in ein wegabhängiges Problem transformiert. Außerdem können statische Hindernisse bei der Planung berücksichtigt werden. Hierfür wurde eine besonders rechenzeiteffiziente Implementierung entwickelt.

## Literatur:

- [1] Kapania, N. R.: Trajectory planning and control for an autonomous race vehicle, Stanford University Diss. Stanford 2016
- [2] Casanova, D.: On Minimum Time Vehicle Manoeuvring. The Theoretical Optimal Lap, Cranfield University PhD Thesis. Cranfield 2000
- [3] Timings, J. P. u. Cole, D. J.: Minimum Maneuver Time Calculation Using Convex Optimization. Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control 135 (2013) 3

# Ein einheitlicher Ansatz zur Trajektorienfolgeregelung von quadratischen, unter- und überaktuierten linearen Systemen

Sebastian Bernhard \*

Jürgen Adamy \*\*

\* Fachgebiet Regelungsmethoden und Robotik  
Technische Universität Darmstadt  
Landgraf-Georg Straße 4  
Telefon +49 6151/16 - 25031  
Fax +49 6151/16 - 25058  
bernhard@rmr.tu-darmstadt.de

\*\* Fachgebiet Regelungsmethoden und Robotik  
Technische Universität Darmstadt  
Landgraf-Georg Straße 4  
- 25050  
- 25058  
adamy@rmr.tu-darmstadt.de

**Schlüsselwörter:** Optimale Folgeregelung auf unendlichen Horizonten, Unter-/Überaktuierung, lineare Systeme, Output Regulation

Eine der Kernaufgaben der Regelungstechnik ist das Folgen vorgegebener Solltrajektorien durch den Ausgang eines geregelten dynamischen Systems. Hier wird angenommen, dass diese Solltrajektorien durch ein lineares autonomes System erzeugt werden und das zu regelnde System linear ist. Folglich kann diese Aufgabe genau dann mittels eines linearen Regelgesetzes erfüllt werden, wenn es aus der Lösung der sogenannten Regulator Gleichungen berechnet werden kann (siehe [6]).

Weist das System mehr Eingänge als Ausgänge auf, ist dementsprechend also *überaktuiert*, dann ist die Lösung der Regulator Gleichungen in der Regel nicht eindeutig. Wünschenswert wäre es, die Folgeregelung mit möglichst geringer Stellenergie zu realisieren. Hierfür wird oft ein numerisches Optimierungsproblem aus [7] herangezogen, wie z.B. in [8]. Es wurde allerdings in [3] gezeigt, dass dies zu einem unbefriedigend hohen Stellenergiebedarf führen kann.

Übersteigt die Zahl der Ausgänge hingegen die der verfügbaren Stellgrößen, so existiert im Allgemeinen keine Lösung und ein exaktes Folgen der Solltrajektorie wird unmöglich. Für eine solche *Unteraktuierung* bleibt nichts anderes übrig, als der Solltrajektorie so genau wie möglich zu folgen. Bekannte Ansätze beschränken sich aber auf die Betrachtung konstanter Sollwerte (z.B. [5]) oder auf Systeme spezieller Struktur, wie Single-Input-Multiple-Output Systeme (z.B. [4]).

Bisher werden diese Problemstellungen nur getrennt voneinander betrachtet und ein konsistentes Vorgehen ist nicht etabliert. In diesem Vortrag wird dahin gehend ein *neuer einheitlicher Ansatz* präsentiert, der den Entwurf einer Folgeregelung sowohl für quadratische als auch für unter- und überaktuierte Systeme ermöglicht. Im Gegensatz zu den obigen Verfahren werden die gestellten Anforderungen immer erfüllt und unnötige Einschränkungen werden vermieden. Der Ansatz basiert auf der Lösung eines optimalen Folgeregelungsproblems auf einem unendlichen Horizont, bei dem der Folgefehler und die Stellenergie in einem quadratischen Gütemaß berücksichtigt werden. Mithilfe der Ergebnisse aus [2] und [3] wird ein ebenfalls lineares, zeitinvariantes Regelgesetz hergeleitet und dessen Eigenschaften werden erörtert. Letzteres erfordert eine sorgfältige Analyse, da, unter anderem, das Gütemaße für das vorliegende Problem im Allgemeinen unbeschränkt ist (siehe [1]).

## Literatur:

- [1] Brian D. O. Anderson und John B. Moore: *Optimal Control: Linear Quadratic Methods*. Dover Publications, Inc., 2007.
- [2] Sebastian Bernhard: Time-Invariant Control in LQ Optimal Tracking: An Alternative to Output Regulation. In: *IFAC-PapersOnLine*, 50(1):4912-4919, 2017.
- [3] Sebastian Bernhard und Jürgen Adamy: Static Optimal Decoupling Control for Linear Over-Actuated Systems Regarding Time-Varying References. In: *2017 American Control Conference*, S. 1049–1055, 2017.
- [4] Dario Corona, Andrea Cristofaro und Maria L. Coorandini: Optimal Output Regulation for Underactuated Systems with Quasiperiodic References. In: *IFAC-PapersOnLine*, 50(1):3654-3659, 2017.
- [5] Dan E. Davison und Edward J. Davison: Optimal Servomechanism Control of Plants with Fewer Inputs Than Outputs. In: *18th IFAC World Congress*, S. 11332–11337, 2011.
- [6] Bruce A. Francis: The Linear Multivariable Regulator Problem. *SIAM Journal on Control and Optimization*. 15(3):486–505, 1977.
- [7] Arthur J. Krener: The Construction of Optimal Linear and Nonlinear Regulators. In: *Systems, Models and Feedback: Theory and Applications. Progress in Systems and Control Theory*, 12:301–322, 1992.
- [8] Andrea Serrani: Output Regulation for Over-Actuated Linear Systems via Inverse Model Allocation. In: *51st IEEE Conf. on Decision and Control*, S. 4871–4876, 2012.

# Robuste dynamische Echtzeitoptimierung einer Umesterung in einer Pilotanlage für Reaktivrektifikation

Daniel Haßkerl \*

Clemens Lindscheid \*

Sebastian Engell \*

\*Lehrstuhl für Systemdynamik und Prozessführung

Fakultät Bio- und Chemieingenieurwesen, Technische Universität Dortmund,  
Emil-Figge Str. 70, Geschossbau 2

R. 330

R. 509a

R. 525

+49 (231)/755-3419

+49 (231)/755-7378

+49 (231)/755-5127

+49 (231)/755-5129

+49 (231)/755-5129

+49 (231)/755-5129

{Daniel.Hasskerl, Clemens.Lindscheid, Sebastian.Engell}@tu-dortmund.de

**Schlüsselwörter:** Dynamische ökonomische Optimierung, robuste modell-prädiktive Regelung, Reaktivrektifikation

Chemische Produktionsprozesse unterliegen heutzutage immer höheren Anforderungen an die Produktqualität, die Umweltverträglichkeit und die Ressourceneffizienz und müssen außerdem natürlich wirtschaftlich betrieben werden. Einen wichtigen Beitrag zum wirtschaftlichen Betrieb von verfahrenstechnischen Produktionsprozessen kann die dynamische ökonomische Echtzeitoptimierung, also ein modell-prädiktiver Regler (MPC), der eine ökonomische Kostenfunktion im Regelungsalgorithmus über einen gewissen Vorausschauhorizont optimiert, leisten. Dieses Regelungskonzept besitzt eine Reihe von Vorteilen gegenüber dem herkömmlichen Verfahren der Einregelung vorgegebener Sollwerte (siehe [1]), findet jedoch bislang noch kaum Anwendung für Anlagen mit sehr komplexem Verhalten, das durch große nichtlineare Modelle (Differenzial-Algebra-Systeme) beschrieben werden muss.

Für die Realisierung einer Echtzeitoptimierung auch solch komplexer Systeme stehen aus der jüngsten Forschung effiziente Lösungs- und Optimierungsalgorithmen sowie entsprechende Software zur Verfügung, so dass eine online optimierende nichtlineare modellprädiktive Regelung in Echtzeit möglich ist. Die Regelgüte und die Einhaltung der Beschränkungen hängen allerdings von der Genauigkeit des benutzten Prozessmodells ab, welches immer eine Approximation des Verhaltens des realen Systems darstellt. Eine vor kurzem vorgeschlagene effiziente Methode

zur systematischen Berücksichtigung von Modellunsicherheiten ist die mehrstufige Optimierung [2], bei der berücksichtigt wird, dass in der Zukunft liegende Stellgrößen an die beobachtete Realisierung der Unsicherheit angepasst werden können.

Als Anwendungsfall für die robuste dynamische Echtzeitoptimierung eines sehr komplexen Prozesses wird hier die zweistufige, homogenkatalysierte Umesterung von Dimethylkarbonat mit Ethanol durch Reaktivrektifikation (Integration von Reaktion und Destillation) in einer Pilotanlage betrachtet. Hierbei sind sowohl das Zwischenprodukt Ethylmethylkarbonat als auch das Endprodukt Diethylkarbonat mögliche Zielprodukte. Durch Variation der Betriebsparameter kann das eine oder das andere Produkt in der gewünschten Konzentration in derselben Anlage hergestellt werden [3].

Der Vortrag zeigt, wie für diese Anlage eine ökonomisch optimierende robuste Regelung entworfen, implementiert und experimentell erprobt wurde, die auch den Wechsel zwischen den Zielprodukten optimal steuert.

#### **Danksagung:**

Die vorgestellten Arbeiten wurden von der Europäischen Union durch das ERC Advanced Investigator Grant Project “Model-based Optimizing Control – From a Vision to Industrial Reality (MOBOCON)”, Grant No. 291458, gefördert.

#### **Literatur:**

- [1] S. Engell: Feedback control for optimal process operation. *Journal of Process Control* 17, 2007, 203-219.
- [2] S. Lucia, J.A.E. Andersson, H. Brandt, M. Diehl, S. Engell: Handling uncertainty in economic nonlinear model predictive control: A comparative case study. *Journal of Process Control* 24, 2014, 1247-1259.
- [3] T. Keller, B. Dreisewerd, A. Górak: Reactive Distillation for Multiple-Reaction Systems: Optimisation Study Using an Evolutionary Algorithm. *Chemical and Process Engineering* 34 (2013).

# VSLAM basierte Positionsschätzung von Multicoptern

Mirko Franke \*

Geoffrey Fink \*\*

Alan Lynch \*\*

Klaus Röbenack \*

\* Institut für Regelungs- und Steuerungstheorie  
Technische Universität Dresden  
01062 Dresden  
Tel: ++49(0)351/463-33940  
Fax: ++49(0)351/463-37281  
{mirko.franke, klaus.roebenack}@tu-dresden.de

\*\* Department of Electrical and Computer  
Engineering  
University of Alberta  
Edmonton, Kanada, T6G 2R3  
{gfink, alan.lynch}@ualberta.ca

**Schlüsselwörter:** VSLAM, Beobachtbarkeitsanalyse, Beobachterentwurf, Positionsschätzung

Die Nutzung von GPS ist für die Positionsbestimmung von unbemannten Multicoptern weit verbreitet. Beim Manövrieren durch Tunnel oder tiefe Schluchten ist der GPS-Empfang jedoch oft eingeschränkt und eine autonome Navigation ohne Nutzung weiterer Sensoren nicht möglich. Gleiches trifft auf geschlossene Räume zu. Als Ersatz für GPS können dort Multi-Kamera basierte Bewegungserfassungssysteme (Motion Capture Systems) eingesetzt werden. Derartige Systeme sind jedoch mit hohem Investitionsaufwand verbunden und grenzen den Bewegungsraum sehr stark ein.

Diese Nachteile führten zur Entwicklung alternativer Sensor Technologien wie Sonar, Lidar und Verfahren zur Bilderkennung (Computer Vision). In Anlehnung an die Arbeiten von Klein und Murray [4] bzw. Weiss [6] nutzen wir das Verfahren der visuellen simultanen Lokalisierung und Kartierung (Visual Simultaneous Localization and Mapping (VSLAM)) [3]. Solch ein System, welches eine am Fluggerät angebrachte Kamera voraussetzt, ist verhältnismäßig leicht und kostengünstig und liefert neben Informationen zu Position und Orientierung auch eine Karte der Umgebung. Selbst wenn die erstellte Karte nicht direkt genutzt wird, kann diese dazu dienen Drifteffekte zu reduzieren. Auf VSLAM basierende Verfahren zur Rekonstruktion der Position können sowohl innerhalb als auch außerhalb von geschlossenen Räumen eingesetzt werden. Mittels Sensorfusion mit einem vorhandenen GPS System kann die Genauigkeit der Positionsbestimmung erhöht und GPS-Aussetzer überbrückt werden.

Der Einsatz von lediglich einer Kamera resultiert darin, dass die vom VSLAM System bereitgestellte Positionsinformation eine Skalierung nicht bekannter Größe aufweist. Außerdem stellt diese skalierte Position nicht die des Fluggeräts  $\mathcal{B}$  im für die Navigation verwendeten inertialen Bezugssystem  $\mathcal{N}$ , sondern die der Kamera  $\mathcal{C}$  in einem ortsfesten lokalen Koordinatensystem  $\mathcal{V}$  dar. In Abbildung 1 sind diese vier Referenzsysteme beispielhaft für einen Quadrocopter mit Onboard-Kamera dargestellt.

Für die Bestimmung der Lage wird ein Attitude Heading Reference System (AHRS) eingesetzt. Die Rekonstruktion der Position  $p_{nb}^n$  des Fluggeräts  $\mathcal{B}$  im Inertialsystem  $\mathcal{N}$  einzig auf Basis der Daten des VSLAM-Systems ist aufgrund der unbekanntenen Skalierung nicht möglich. Es wird gezeigt, dass unter bestimmten Voraussetzungen die Einbeziehung der Messwerte eines Beschleunigungssensors die Beobachtbarkeit sichern kann. Zur Vereinfachung der Beobachtbarkeitsanalyse wird eine Koordinatentransformation vorgenommen, welche die nichtlineare Dynamik eines Quadrocopters in eine lineare zeitvariante (LTV) Darstellung überführt. Der vorgestellte Entwurf grenzt sich somit

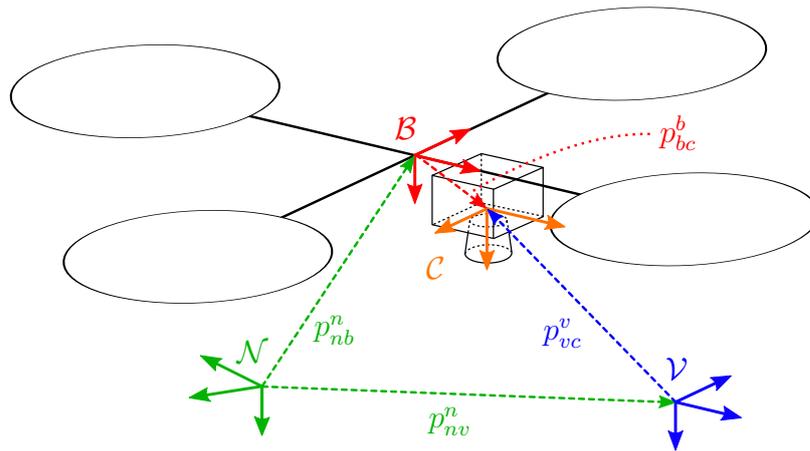


Abbildung 1: Koordinatensysteme:  $\mathcal{B}$ ,  $\mathcal{C}$ ,  $\mathcal{N}$  und  $\mathcal{V}$  repräsentieren qualitativ die vier Referenzsysteme. Gestrichelte Pfeile verdeutlichen den Versatz der Koordinatenursprünge. Die Notation  $p_{xy}^z$  steht dabei für die Position von  $\mathcal{Y}$  relativ zu  $\mathcal{X}$ , dargestellt in  $\mathcal{Z}$ .

von dem in der Literatur oft anzutreffenden Einsatz eines erweiterten Kalmanfilters [6] ab. Durch die Transformation in ein LTV System ist keinerlei Linearisierung notwendig. Neben der Verwendung eines Kalmanfilters kann auch ein adaptiver Beobachter [5] eingesetzt werden [1, 2]. Bei diesem Ansatz wird der unbekannte Skalierungsfaktor nicht als Zustandsgröße sondern als zu identifizierender Parameter betrachtet. Für die Konvergenz des Beobachters kann eine hinreichende Bedingung angegeben werden.

Der vorgestellte Ansatz zur Rekonstruktion der Position von Multicoptern basierend auf dem Einsatz eines VSLAM Systems wird im Vortrag näher erläutert. Es werden sowohl die Beobachtbarkeit untersucht als auch ein Beobachterentwurf durchgeführt.

## Literatur:

- [1] G. Fink, M. Franke, A. F. Lynch, K. Röbenack und B. Godbolt. "Observer design for visual inertial SLAM scale on a quadrotor UAV". In: *2017 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*. Juni 2017, S. 830–839.
- [2] G. Fink, M. Franke, A. F. Lynch, K. Röbenack und B. Godbolt. "Visual Inertial SLAM: Application to Unmanned Aerial Vehicles". In: *IFAC-PapersOnLine* 50.1 (Juli 2017), S. 1965–1970.
- [3] J. Fuentes-Pacheco, J. Ruiz-Ascencio und J. M. Rendón-Mancha. "Visual Simultaneous Localization and Mapping: A Survey". In: *Artif. Intell. Rev.* 43.1 (Jan. 2015), S. 55–81.
- [4] G. Klein und D. Murray. "Parallel Tracking and Mapping for Small AR Workspaces". In: *6th IEEE and ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality, 2007. ISMAR 2007*. Nara, Japan, Nov. 2007, S. 225–234.
- [5] X. Li, Q. Zhang und H. Su. "An adaptive observer for joint estimation of states and parameters in both state and output equations". In: *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing* 25.9 (2011), S. 831–842.
- [6] S. M. Weiss. "Vision Based Navigation for Micro Helicopters". Diss. ETH Zürich, 2012.

# Efficient Linear Algebra for Model Predictive Control on Embedded Systems

Gianluca Frison\*

\* IMTEK  
University of Freiburg  
Georges-Koehler-Allee 102, 79110 Freiburg  
+49-761-203-73278  
+49-761-203-67885  
gianluca.frison@imtek.uni-freiburg.de

Moritz Diehl\*\*

\*\* IMTEK  
University of Freiburg  
Georges-Koehler-Allee 102, 79110 Freiburg  
+49-761-203-67852  
+49-761-203-67885  
moritz.diehl@imtek.uni-freiburg.de

## Abstract:

Model predictive control (MPC) is a widely-used advanced control technique. It can deal with linear as well as nonlinear models, and it computes a control trajectory optimal with respect to both a performance index and a set of constraints. The advantages of this control technique come at the cost of a high computational cost, that has traditionally limited its use to applications with slow dynamic and long sampling times.

Thanks to improvements to control software and computer hardware, MPC has been successfully used in application with faster sampling times.

However, on the software side, the research effort has mainly focused on optimization algorithms, often neglecting the computational efficiency of the solvers. In this talk, we want to present BLASFEO, a library of BLAS- and LAPACK-like linear algebra routines, performance-optimized for use in MPC, and more in general in embedded optimization applications.

BLASFEO has been developed to provide the best computational performance for matrices of small to medium size (in the orders of tens and up to a couple hundreds), as typical in embedded optimization.

BLASFEO employs a custom matrix format storage and hand-optimized assembly linear algebra kernels, and therefore it outperforms generic compiler-optimized linear algebra routines, with speed ups of up to 10x.

Furthermore, the target matrix sizes have been traditionally disregarded by high-performance implementations of BLAS and especially LAPACK; compared to them, BLASFEO provides speed ups of up to 3x.

BLASFEO provides a powerful and flexible framework that can be employed for the efficient implementation of optimization algorithms on embedded devices.

As an example, it is at the core of HPMPC, a high-performance interior point method for MPC, that has computational times up to 10x faster than other solvers targeting the same class of problems.

# Optimierung einer kennfeldbasierten Regelung mittels Reinforcement Learning am Beispiel einer Verbrennungskraftmaschine

M. Sc. Tim Daszenies \*

Prof. Dr.-Ing. Steven X. Ding \*\*

\* Fakultät Ingenieurwissenschaften/Institut für Automatisierungstechnik und komplexe System  
Universität Duisburg-Essen  
Bismarckstraße 81, 47057 Duisburg  
+49 (0)203 379 3388  
+49 (0)203 379 2928  
tim.daszenies@uni-due.de

\*\* Fakultät Ingenieurwissenschaften/Institut für Automatisierungstechnik und komplexe System  
Universität Duisburg-Essen  
Bismarckstraße 81, 47057 Duisburg  
+49 (0)203 379 3388  
+49 (0)203 379 2928  
steven.ding@uni-due.de

**Schlüsselwörter:** Reinforcement Learning, Optimierung, Kennfeld-Adaption, Verbrennungskraftmaschine

Zur Koordination verschiedenster Funktionalitäten, welche das Drehmoment eines Kraftfahrzeugantriebsstrang es beeinflussen, werden seit Mitte der 1990er drehmomentbasierte Softwarefunktionsstrukturen im Rahmen des Motormanagements eingesetzt ([1]). Diese Strukturen sorgen für eine passende Koordination der anfallenden Drehmomentanforderungen. Diese Anforderungen können prinzipiell in externe und interne Anforderungen unterteilt werden. Zu den internen Anforderungen zählt unter anderem die Leerlaufregelung, welche in dieser Arbeit betrachtet wird. Nach entsprechender Momentenkoordination stehen im Allgemeinen zwei Stellpfade zur Beeinflussung der Leerlaufdrehzahl durch den Leerlaufregler zur Verfügung, welche Umgangssprachlich mit „Luft“- und „Zündpfad“ bezeichnet werden. Hierbei bezeichnet ersterer den trägen Stellpfad, welcher über die Zylinderfrischluftfüllung die einzuspritzende Kraftstoffmenge und letztlich das verfügbare Drehmoment bestimmt. Der Zündpfad hingegen, stellt mit der Verstellung des Zündwinkels eine Möglichkeit dar, unmittelbar Einfluss auf das Drehmoment zu nehmen.

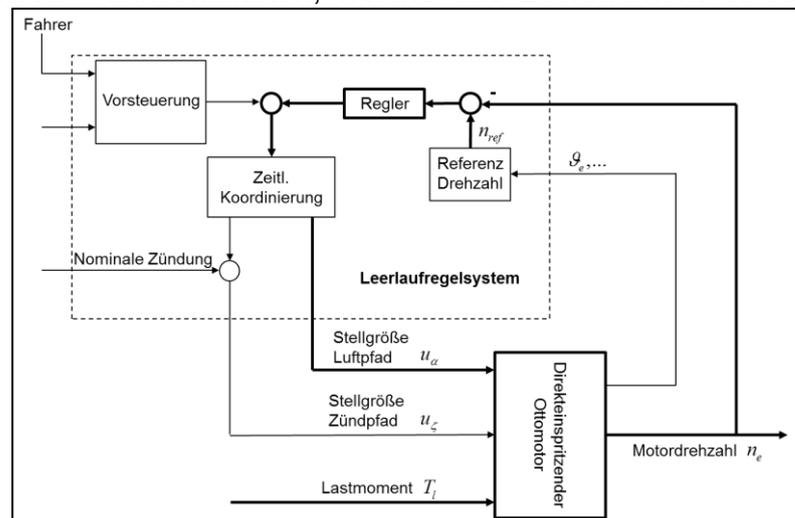


Abbildung 1: Leerlaufregelsystem [2]

Nach entsprechender Momentenkoordination stehen im Allgemeinen zwei Stellpfade zur Beeinflussung der Leerlaufdrehzahl durch den Leerlaufregler zur Verfügung, welche Umgangssprachlich mit „Luft“- und „Zündpfad“ bezeichnet werden. Hierbei bezeichnet ersterer den trägen Stellpfad, welcher über die Zylinderfrischluftfüllung die einzuspritzende Kraftstoffmenge und letztlich das verfügbare Drehmoment bestimmt. Der Zündpfad hingegen, stellt mit der Verstellung des Zündwinkels eine Möglichkeit dar, unmittelbar Einfluss auf das Drehmoment zu nehmen.

In diesem Beitrag wird eine neue Methode zur Optimierung eines PI basierten Reglers zur Anwendung im Bereich der Leerlaufregelung einer Verbrennungskraftmaschine (VKM) vorgestellt (vgl. Abbildung 1). Die neue Optimierungsstrategie umfasst einerseits eine passende regelungstechnische Beschreibung der VKM und zum anderen den Übergang von einer linearen PI Regelung zu einer kennfeldbasierten Regelung, sowie die Formulierung, Vereinfachung und Lösung eines zweckmäßigen Optimierungsproblems. Ziel ist es die

Anforderungen an eine Leerlaufregelung durch alleinige Nutzung des Luftpfades sicherzustellen, ohne dabei auf eine Momentenreserve zurückgreifen zu müssen. Dabei werden sowohl an das Konzept, als auch an die Optimierungsroutine harte Anforderungen gestellt. Eine der größten Herausforderungen dabei ist die Reduktion des Lösungsraumes welche sich durch den Übergang auf eine kennfeldbasierte Regelung ergibt. Dabei müssen einerseits eine genügend große Anzahl an Stützstellen zur Verfügung stehen, um eine Performanz Verbesserung erzielen zu können, andererseits sollte deren Anzahl so gering wie möglich gehalten werden. So kann eine zeitnahe Lösung des Optimierungsproblems gewährleistet werden. Dies ist Voraussetzung für die Optimierung direkt im Fahrzeug, als „Hardware in the Loop“ (HIL)- Optimierung, wie sie für diese Arbeit verwendet wurde. Die verwendete Strategie umfasst folgende Einzelschritte: Eine passende regelungstechnische Aufbereitung der VKM in Form eines Luftpfad Modells (vgl. [3]), die adäquate Repräsentierung von Kennfeldern zum Optimierungszweck, die mathematische Formulierung der Anforderungen an die Leerlaufregelung und eine Lösungsraumreduktion zur Realisierung einer HIL-Optimierung. Die eigentliche Optimierung wird anschließend mit einem Algorithmus aus dem Bereich des maschinellen Lernens durchgeführt, dem CARLA (continuous action reinforcement learning automata)-Algorithmus (siehe [4]). Abschließend wird die neue Optimierungsstrategie, auf Basis realer Messdaten, mit existierenden Verfahren verglichen und bewertet.

## **Literatur:**

- [1] W. Heß, „Drehmomentorientierte Struktur der Motorsteuerungen“. In: Modellgestützte Steuerung, Regelung und Diagnose von Verbrennungsmotoren. Hrsg. von R. Isermann. Springer Berlin, 2003, Heidelberg, S. 11-21.
- [2] L. Guzzella, C. H. Onder: Introduction to Modeling and Control of Internal Combustion Engine Systems Springer 2010
- [3] C. Kandler, Methoden zur modellbasierten Mehrgrößenleerlaufregelung eines Hybridantriebsstrangs, Universität Duisburg-Essen Diss., 2014.
- [4] G. P. Frost, Stochastic optimization of vehicle suspension control systems via learning automata, Loughborough University Diss., 1998.

# Chassisregelung für überaktuierte planetare Explorationsrover in weichem Sand

Stefan Barthelmes \*

\*Institut für Systemdynamik und  
Regelungstechnik  
Deutsches Zentrum für Luft und Raumfahrt (DLR)  
Münchner Straße 20, 82234 Weßling  
Tel.: 08153/28-4212  
Fax: 08153/28-1441  
E-Mail: Stefan.Barthelmes@dlr.de

Johann Bals \*\*

\*\* Institut für Systemdynamik und  
Regelungstechnik  
Deutsches Zentrum für Luft und Raumfahrt (DLR)  
Münchner Straße 20, 82234 Weßling  
Tel.: 08153/28-2433  
Fax: 08153/28-1441  
E-Mail: Johann.Bals@dlr.de

**Schlüsselwörter:** Mobile Roboter, Control Allocation, Chassisregelung



Abbildung 1: DLR Lightweight Rover Unit (LRU) in der ROBEX Mond-Analog Mission auf dem Ätna [dlr.de]

Der Einsatz von planetaren Explorationsrovern in schwierigem, unbekanntem Terrain erfordert eine robuste Lokomotion. Wie in *Abbildung 1* gezeigt, werden bei solchen Rovern daher meist alle Räder einzeln angetrieben und mehrere individuell gelenkt. In Pfadfolge- oder Autonomiealgorithmen wird eine Bewegungsvorgabe durch drei Größen beschrieben. Für die Bewegungsausführung durch einen Chassisregler ergibt sich daraus je nach Anzahl der Antriebs- und Lenkaktoren eine Überaktuierung des Systems.

In Missionen der planetaren Exploration wird das zusätzliche Optimierungspotential einer solchen Überaktuierung bisher kaum eingesetzt [1] [2]. In Forschungsarbeiten kann zwischen der Regelung der Raddrehzahlen und der Radmomente unterschieden werden. Drehzahlbasierte Ansätze wurden beispielsweise um ein Angleichen der Geschwindigkeiten für unebenen Boden und Hindernisse erweitert [3]. Um der entscheidenden Rolle der Bodenmechanik Rechnung zu tragen, wurde bei dieser Art der Ansteuerung auf rechenaufwändige modellprädiktive Regelung zurückgegriffen [4]. Zur Drehmomentregelung auf sandigen Böden wurden in [5] die erforderlichen Kräfte und Momente auf Gesamtsystemebene entsprechend der geschätzten Normalkräfte auf die Räder verteilt. Während die damit einhergehende Annahme konstanter Reibwerte für die betrachteten Böden nicht zulässig ist, fehlt eine Lösung für die Berechnung der Lenkwinkel gänzlich.

Die sich ergebende Fragestellung lautet daher: Kann eine Chassisregelung für die Lokomotion auf sandigen Böden entworfen werden, die bekannte Zusammenhänge und Störungen kompensiert und die Überaktuierung des Systems zur optimalen Verteilung der Kräfte nutzt? Um einen Einsatz in der planetaren Exploration zu ermöglichen, soll der Chassisregler ausschließlich auf in Missionen vorhandene Sensoren zurückgreifen und mit beschränkter Rechenleistung auskommen.

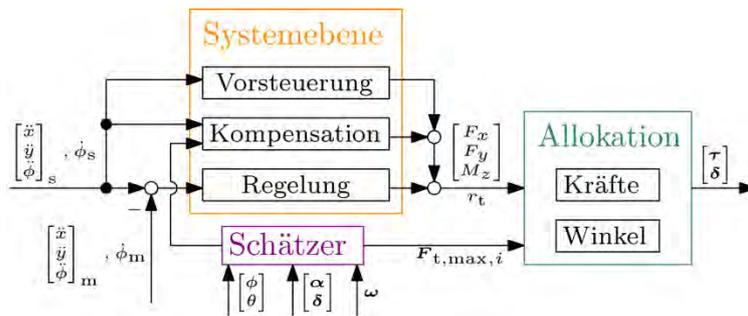


Abbildung 2: Übersicht des Chassisreglers ATC

Zur Erfüllung der genannten Anforderungen wird in diesem Beitrag ein All-Terrain-Controller (ATC) [6] vorgestellt, der aus drei Hauptkomponenten besteht (siehe *Abbildung 2*).

Die linearen Beschleunigungen  $\ddot{x}, \ddot{y}$  und die Gierrate  $\dot{\phi}$  werden in der Vorsteuerung in erforderliche Massenkräfte

übersetzt. Kompensiert werden Bodenwiderstandskräfte, Widerstandsmomente der Antriebe sowie Gravitationskräfte unter Berücksichtigung von lateralen Haltekräften an den Rädern. Unbekannte Störungen und Modellierungsfehler werden schließlich im Regler ausgeglichen.

In der Allokation der Kräfte und Momente wird durch einen neuartigen, hybriden Ansatz der Unterschiedlichkeit von Antriebsmoment und Lenkwinkel Rechnung getragen. Die Sollkräfte müssen im aktuellen Zeitschritt optimal auf die momentanen Radlängsrichtungen verteilt werden, da nur in diesen Richtungen Kräfte durch die Antriebseinheiten aufgebracht werden können. Dies geschieht unter Berücksichtigung der Gelenkwinkel und unter Minimierung der Ausnutzung des radindividuell geschätzten Traktionspotentials der Räder. Die verbleibenden Kräfte werden dann für die Berechnung eines Schwimmwinkels verwendet, welcher durch gleiches Einlenken aller Räder realisiert wird. Dieser Schrägbewegung wird schließlich ein gesondert aus der Soll-Gierrate berechneter Kurvenradius  $r_t$  dergestalt überlagert, dass sich ein Momentanpol ergibt.

Der Ansatz wurde in der Simulation und im Laborversuch verifiziert. Eingriffe der Regelung sind aufgrund der zusätzlichen Vorsteuerung und Kompensation nur in stark vermindertem Maße nötig. Während einer Kurven- und Schrägfahrt am Hang steuert der ATC sowohl mit unterschiedlichen Antriebsmomenten als auch durch Einstellen eines Vorhaltewinkels gegen die Hangabtriebskraft. Bei Blockierung oder Durchdrehen einzelner Räder verhindert die Traktionskraftschätzung ein Eingraben der Räder und damit ein Festfahren des Rovers. Für den ATC wurden dabei ausschließlich Messwerte aus IMU, Winkelsensoren und Motorencodern-/reglern verwendet.

## Literatur:

- [1] J. P. Grotzinger et al., „Mars Science Laboratory mission and science investigation,“ *Space science reviews*, 2012.
- [2] A. Ellery, *Planetary Rovers - Robotic Exploration of the Solar System*, Springer, 2016.
- [3] T. Peynot et al., „Enhanced locomotion control for a planetary rover,“ *IROS*, 2003.
- [4] R. Krenn et al., „Model predictive traction and steering control of planetary rovers,“ 2013.
- [5] K. Iagnemma et al., *Mobile Robots in Rough Terrain: Estimation, Motion Planning, and Control with Application to Planetary Rovers*, Springer, 2004.
- [6] S. Barthelmes, „An All-Terrain-Controller for Over-Actuated Wheeled Mobile Robots with Feedforward and Optimization-Based Control Allocation“, *CDC*, 2017.

# Einbestellung von Regelzielen in virtuelle Energietanks in der passivitätsbasierten Regelung

Passivity analysis as an intuitive way to analyze stability has drawn significant attention. One is able to tackle instability problems based on physical energy and power interpretations. Moreover, in case of instabilities it can be used to constructively design or modify controllers in order to ensure overall stability. One such approach is the augmentation via virtual energy tanks that provide the system with the demanded potentially passivity-violating energy up to a certain limit. However, in this work we show that the benefits of virtual tanks can even go beyond ensuring passivity. More specifically, energy tanks are designed such that they respect power related control objectives via scheduling energy rates. This is specially important when several potentially passivity violating tasks with different priorities exist. We present a well-structured approach for designing the new concept of valve-based virtual energy and introduce several interesting control policies. The methodology is validated experimentally with an impedance controlled robot.

# Optimierung und Geräuschreduzierung eines geregelten linearen Hybridschrittmotors

Heiko Weiß, Yuri A.W. Shardt  
Fakultät IA / Fachgebiet Automatisierungstechnik  
TU Ilmenau  
Tel: +49 3677 69-1467, +49 3677 69-2814  
{heiko.weiss, yuri.shardt}@tu-ilmenau.de

Christoph Ament  
Institut für Informatik / Lehrstuhl Regelungstechnik  
Universität Augsburg  
Tel: +49 821 598-3342  
christoph.ament@informatik.uni-augsburg.de

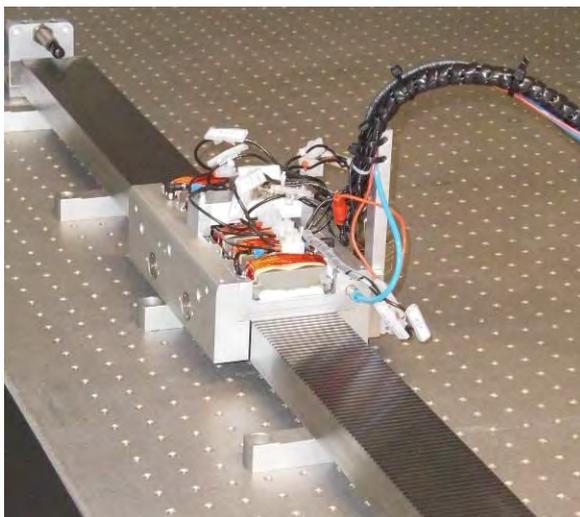
**Schlüsselwörter:** Lineardirektantrieb, variable Erregung, Optimierung, Geräuschreduzierung

## Kurzfassung

Gegenstand des Vortrags ist ein linearer Hybridschrittmotor (LHSM). Dieser zählt zu den Lineardirektantrieben, die u.a. in der Automatisierungstechnik für Prüfverfahren, Montageprozesse sowie in der Waferfertigung eingesetzt werden [1, 2].

Elektrische Antriebe erzeugen während des Betriebs Geräusche. Daher gibt es Normen, die den Menschen vor zu großem Lärm, v.a. in industrieller Umgebung schützen sollen. Bei der Produktentwicklung von Antrieben ist es nicht nur wichtig diese Normen einzuhalten, sondern den Lärmausstoß zu minimieren, um neue Anwendungsbereiche, z.B. in der Laborautomatisierung, zu erschließen [3].

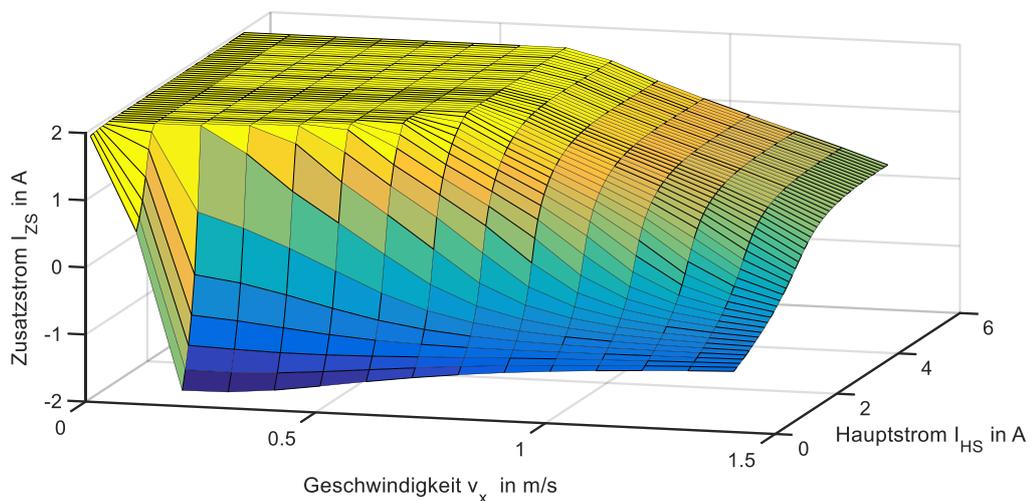
Die Krafterzeugung des LHSM bringt mit sich, dass neben der gewünschten Antriebskraft zusätzlich Kraftschwankungen entstehen. Dazu tragen großenteils Rastkräfte bei, die auch im stromlosen Zustand aufgrund der verbauten Permanentmagnete wirken [4, 5, 6]. Ausgehend von diesem Problem wurde von der Firma *Pasim Direktantriebe GmbH* ein LHSM (siehe Abbildung 1) entwickelt, der neben Permanentmagneten eine zusätzliche Spulenerregung besitzt [7]. Die Zusatzspulen des modifizierten LHSM können nun dazu genutzt werden, um den dynamischen Betrieb zu optimieren und die Geräuschentwicklung zu reduzieren.



**Abbildung 1:** LHSM mit Zusatzspulen

Dafür wird zunächst ein mathematisches Modell in Form von nichtlinearen Differentialgleichungen entwickelt. Das Modell ist durch die Teilbereiche Stromdynamik, Reibung und Krafterzeugung gekennzeichnet. Kraftschwankungen sind ein wesentlicher Bestandteil des Modells, da diese den LHSM zum Schwingen anregen und damit zur Schallabstrahlung beitragen. Zur Identifikation der Modellparameter, werden verschiedene Experimente durchgeführt. Basierend auf dem identifizierten Modell wird eine Optimierung durchgeführt, um eine ideale Ansteuerfunktion für den Strom der Zusatzspulen zu finden. Die Optimierung beinhaltet die Maximierung der dynamischen Kraft, sowie die Minimierung der Kraftschwankungen. Das Ergebnis der Optimierung ist eine nichtlineare Funktion für den Zusatzstrom, die in Abbil-

dung 2 dargestellt ist. Die von der Geschwindigkeit und dem Stellstrom abhängige Ansteuerfunktion wird als Look-Up Tabelle gespeichert und auf einer Echtzeithardware implementiert.



**Abbildung 2:** Look-Up Tabelle zur Ansteuerung der Zusatzspulen

Zur Validierung wird eine Positionstrajektorie im geregelten Betrieb gefahren. Um den optimierten LHSM mit einem permanent erregten Antrieb zu vergleichen, werden die Zusatzspulen auf einen konstanten Stromwert gesetzt. Die Messung der durchschnittlichen Lautstärke während der Trajektorie ergibt, dass eine Reduzierung des Schalldruckpegels um annähernd 10 dB erreicht wird, ohne dass Einbußen bei der Regelungsgenauigkeit hinzunehmen sind.

## Literatur:

- [1] Stölting, Hans D. ; Kallenbach, Eberhard ; Amrhein, Wolfgang: *Handbuch Elektrische Kleinantriebe*. 4. Auflage, München: Hanser Verlag, 2011.
- [2] Dreifke, Lars.: *Untersuchungen an planaren Hybridschrittmotoren mit Hallsensoren zur Magnetflussregelung und Positionsbestimmung*. Ilmenau, Technische Universität, Dissertation, 2003.
- [3] Bertolini, Thomas ; Fuchs, Thomas: *Schwingungen und Geräusche elektrischer Kleinantriebe*. München: Süddeutsche Verlag, 2011.
- [4] Röhrig, Christof: *Zur Lageregelung synchroner Linearmotoren für hochdynamische Anwendungen unter besonderer Berücksichtigung der Kraftwelligkeit*. Düsseldorf: VDI Verlag. 2003.
- [5] Brahms, Ulrich: *Regelung von Lineardirektantrieben für Werkzeugmaschinen*. Düsseldorf: VDI Verlag, 1998.
- [6] Joerges, Philipp: *Rastkräfte und ihre Auswirkungen auf die Positioniergenauigkeit und die Dynamik in Lineardirektantrieben*. Stuttgart, Universität, Dissertation, 2011.
- [7] Weiß, Heiko ; Meister, Andreas ; Ament, Christoph ; Dreifke Nils: *Modeling and System Identification of a Variable Excited Linear Direct Drive*. In: World Academy of Science, Engineering and Technology, International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial, Mechatronic and Manufacturing Engineering Vol:11 (2017), No:3.

# Ein nichtlineares Model von Zweiradfahrzeugen für Regler- und Beobachterentwurf

Alen Turnwald

Prof. Dr.-Ing. Steven Liu

Lehrstuhl für Regelungssysteme  
Technische Universität Kaiserslautern, Germany  
Erwin-Schrödinger-Straße 12, 67663 Kaiserslautern  
Tel.: 0631 - 205 4057  
Fax: 0631 - 205 4205  
turnwald@eit.uni-kl.de

Tel.: 0631 - 205 4535  
Fax: 0631 - 205 4205  
sliu@eit.uni-kl.de

**Schlüsselwörter:** Modellierung von Zweiradfahrzeugen, Autonome Zweiradfahrzeuge, Passivitätsbasierte Regelung

Mit Hinblick auf die Entwicklung in der heutigen Mobilität entstehen neue Aspekte und Herausforderungen in der Modellierung und Regelung von Zweiradfahrzeugen. In diesem Sinne sind neue fortgeschrittene mathematische Modelle sowie entsprechende modelbasierte Regelungsmethoden in zweierlei Hinsicht interessant: Zum einen zur Entwicklung moderner Fahrerassistenzsysteme für bestehende Fahrzeuge wie E-Bikes, Roller und Motorräder und zum anderen für die Entwicklung neuartiger Fahrzeuge für die Zukunft der Mobilität, insbesondere der Elektromobilität (Siehe beispielsweise C1: [www.litmotors.com/c1](http://www.litmotors.com/c1)).

In diesem Beitrag geht es um die Modellierung eines Zweiradfahrzeugs mit Hinblick auf Trajektorieplanung, Stabilisierung und Trajektoriefolgeregelung für autonomes Fahren. Eine schematische Darstellung des betrachteten Fahrzeugs ist Abbildung 1 zu entnehmen. Die Modellierung der Zweiradfahrzeuge ist im Allgemeinen herausfordernd. Es werden einerseits einfache, für die Regelung einsetzbare und andererseits genaue, umfassende Modelle benötigt, die die Effekte wie die Selbststabilisierung wiedergeben. In der verfügbaren Literatur werden hauptsächlich lineare Modelle verwendet, die das Verhalten des Fahrzeugs nur in einem beschränkten Bereich des Zustandsraums, beispielsweise für konstante Geschwindigkeiten, abbilden ([1]). Ein Teil eines an unserem Lehrstuhl laufenden Projekts beschäftigt sich daher mit der Herleitung und Verifizierung eines umfassenden Modells, das für den Beobachter- bzw. Reglerentwurf geeignet ist. Das Modell wird in Port-Hamiltonischer Struktur ([2]) gebildet, die sich für den Entwurf passivitätsbasierter Beobachter und Regler eignet, die bekanntermaßen inhärente Robustheit aufweisen. Zum Entwurf einer passivitätsbasierten Trajektoriefolgeregelung wird der Ansatz der *generalisierten kanonischen Transformation* ([3]) verwendet. Diese Methode ist für vollaktuierte mechanische Systeme entwickelt. Für das Zweiradfahrzeug muss die Methode angepasst werden, da dieses ein unteraktuiertes System darstellt. Das Modell ist durch gewöhnliche Differentialgleichungen gegeben, beinhaltet die nichtholonischen Beschränkungen und

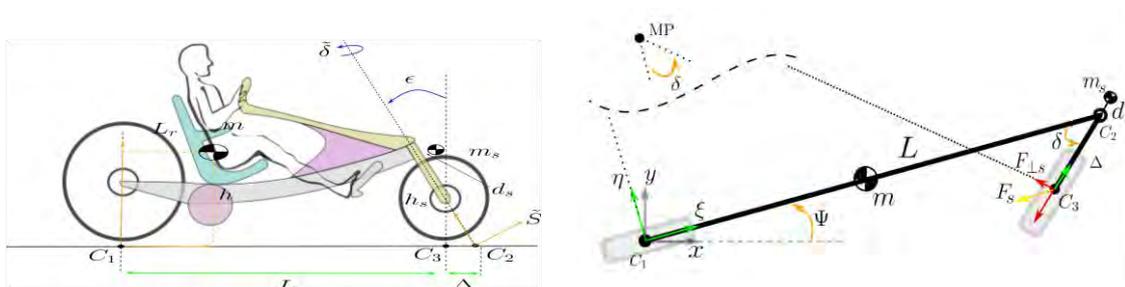


Abbildung 1: Schematik eines Zweiradfahrzeugs, Seitenansicht und Draufsicht

kann deshalb ohne weiteres für Trajektorieplanung und Optimierung verwendet werden. Außerdem wird eine strukturerhaltende Vereinfachung des nichtlinearen Modells vorgeschlagen, die ein einfacheres und für den Reglerentwurf geeignetes Modell ergibt, ohne den Gültigkeitsbereich bedeutsam zu beeinflussen.

Neben Simulationen und Plausibilitätsüberprüfung werden zur Validierung des Modells die Trajektorien mit Daten verglichen, die durch einen Gazebo<sup>1</sup>-Simulator generiert werden. Außerdem wurde ein Kinderfahrrad mit Sensoren ausgestattet (s. Abbildung 2), mit dem Fahrexperimente auf einem Laufband durchgeführt werden<sup>2</sup>. Für eine weitere Verifizierung wurde das Modelverhalten mit dem aus der Literatur ([4]) bekannten linearen Modell verglichen. Die Modellparameter wurden angepasst und eine Initialgeschwindigkeit wurde so gewählt, dass sich das System innerhalb des Gültigkeitsbereichs des linearen Modells befindet. Dabei wurden, basieren auf einer Eingangsstörung in der Form eines Drehmoments auf dem Lenker, ähnliche Eigenbewegungen beobachtet. Die wichtigen Eigenschaften eines solchen Modells, beispielsweise die Selbststabilisierung und das nichtminimalphasige Ein-Ausgangsverhalten, wurde ebenfalls vom vereinfachten nichtlinearen Modell wiedergegeben. Eine weitere Besonderheit des vorgestellten Modells ist die systematische Erweiterbarkeit. So kann das Modell beispielsweise um einen passiven Fahrer, die



Abbildung 2: Das Experimentalfahrrad und der Gazebo-Simulator

Reifenmodelle oder weitere mögliche Aktuatoren erweitert werden. Das Modell als MATLAB-Code und ein SIMULINK-Modell inklusive eines Skripts zur Durchführung einiger Simulationsexperimente wird zur Überprüfung und Weiterverwendung auf der Homepage des Lehrstuhls zur Verfügung gestellt.

### Literatur:

- [1] Schwab, A.L. and Meijaard, J.P. (2013). A review on bicycle dynamics and rider control A.L. Vehicle System Dynamics: International Journal of Vehicle Mechanics and Mobility, (June 2013).
- [2] A. van der Schaft and D. Jeltsema. Port-Hamiltonian Systems Theory: An Introductory Overview . Foundations and Trends® in Systems and Control, vol. 1, o. 2-3, pp. 173–378, 2014.
- [3] K. Fujimoto et.al. (2004). Trajectory Tracking Control of Nonholonomic Hamiltonian Systems via Generalized Canonical Transformations. European Journal of Control. doi:10.3166/ejc.10.421-431.
- [4] J. Meijaard, et.al. (2007). Linearized dynamics equations for the balance and steer of a bicycle: a benchmark and review. Proceedings of the Royal Society. doi:10.1098/rspa.2007.1857.

<sup>1</sup> [www.gazebosim.org](http://www.gazebosim.org)

<sup>2</sup> Entsprechende Videos unter: [youtu.be/5HrwGGrh1kQ](https://youtu.be/5HrwGGrh1kQ) und [youtu.be/PQ3tNALyrA8](https://youtu.be/PQ3tNALyrA8)

# Identifikation in Differentialspielen basierend auf inverser Optimalsteuerung

Jairo Inga  
Institut für Regelungs- und  
Steuerungssysteme (IRS)  
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)  
Kaiserstraße 12, 76131 Karlsruhe  
jairo.inga@kit.edu

Sören Hohmann  
Institut für Regelungs- und  
Steuerungssysteme (IRS)  
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)  
Kaiserstraße 12, 76131 Karlsruhe  
soeren.hohmann@kit.edu

**Schlüsselwörter:** Differentialspiele, Identifikation, Spieltheorie

Die Spieltheorie ist ein mathematisches Werkzeug, um Konflikte und Interaktion zwischen mehreren Spielern oder Agenten zu modellieren. Sie hängt somit stark mit regelungstechnischen Problemen im Bereich der Multiagentensysteme zusammen [1]. Hierbei relevant sind insbesondere nicht-kooperative Differentialspiele, bei denen die Strategie jedes Spielers das Ergebnis des Spiels durch Differentialgleichungen beeinflusst. Solche Spiele können als Verallgemeinerung optimaler Steuerungsprobleme betrachtet werden. In dieser Problemklasse versuchen die Spieler, ihre eigenen Ziele zu erreichen –ihre Kostenfunktion zu minimieren– unter der Nebenbedingung der Dynamik eines Systems.

In letzter Zeit lag der Fokus vor allem auf der Lösung von den entstehenden gekoppelten Optimierungsproblemen, aus denen sich die Steuerstrategien der Spieler und somit die Zustandstrajektorien des Systems ergeben; die Ermittlung des sogenannten Nash-Gleichgewichts. Das inverse Problem in Differentialspielen wird allerdings bisher selten betrachtet. Dieses inverse Problem besteht in der Identifikation der Kostenfunktionen, die die einzelnen Spieler minimiert haben, wobei gemessene Steuer- und Zustandstrajektorien zugrunde gelegt werden.

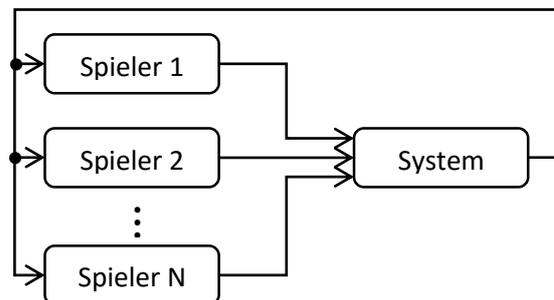


Abbildung 1: Differentialspiel mit N-Spielern

In der Literatur wurde bisher nur der 1-Spieler-Fall betrachtet. Hierzu wurden direkte Methoden [2] -in der Robotik sehr verbreitet- und indirekte Methoden (z.B. [3]) entwickelt. Erstere könnten für die Lösung des N-Spieler-Falls verwendet werden. Allerdings erfordern diese die Lösung von mehreren gekoppelten Optimierungsproblemen und sind aufgrund der sehr hohen Rechenzeiten nicht praktikabel. Indirekte Methoden sind vielversprechend, da diese keine Lösung eines Differentialspiels benötigen. Ein Beispiel hierfür ist das Verfahren nach Johnson et al. [4], das auf dem Minimum Prinzip von Pontryagin beruht.

In diesem Vortrag wird nun ein Verfahren für die Identifikation der Kostenfunktionen in einem N-Spieler Differentialspiel vorgestellt, welches die Ergebnisse von [4] für den Einspielerfall verallgemeinert. Die Methode reduziert die Identifikationsaufgabe dazu auf ein quadratisches statisches Optimierungsproblem. Es wird gezeigt, dass unter der Annahme einer *open-loop* Informationsstruktur –im Gegensatz zu den betrachteten Zweispielerfall in [5]–, die Parameter aller Kostenfunktionen identifiziert werden

können. Hierbei werden außerdem notwendige und hinreichende Bedingungen aufgezeigt, unter denen eine Parameteridentifikation ist. Schließlich wird das Verfahren anhand eines Beispiels demonstriert.

### **Literatur:**

- [1] Ocampo-Martinez & Quijano: "*Game-Theoretical Methods in Control of Engineering Systems: An Introduction to the Special Issue*", IEEE Control Systems, 37(1), S. 30-32, 2017
- [2] Priess, M.C.; Conway, R.; Choi, J.; Popovich, J.M.; Radcliffe, C. : "*Solutions to the inverse LQR problem with application to biological systems analysis*", IEEE Transactions on Control Systems Technology, 23(2), S. 770-777, 2015
- [3] Mombaur, K.; Truong, A.; Laumond, J.: "*From human to humanoid locomotion--an inverse optimal control approach*". Auton. Robots 28(3), S. 369-383, 2010
- [4] Johnson, M.; Aghasadeghi, N.; Bretl, T.: "*Inverse Optimal Control for Deterministic Continuous Time Systems*", IEEE Conference on Decision and Control, S. 2906-2913, 2013
- [5] Rothfuß, S.; Inga, J.; Köpf, F.; Flad, M.; Hohmann, S.: "*Inverse Optimal Control for Identification in Non-Cooperative Differential Games*", IFAC-PapersOnLine, 50(1), S. 14909-14915, 2017

# Nutzenpropagation zur verteilten Lösung partiell beobachtbarer Markow- Entscheidungsprobleme

Julius Pfrommer <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Lehrstuhl für Interaktive Echtzeitsysteme IES  
Karlsruher Institut für Technologie  
Adenauerring 4, 76131 Karlsruhe  
Telefon: +49 721 6091-286  
julius.pfrommer@kit.edu

Jürgen Beyerer <sup>1,2</sup>

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

**Schlüsselwörter:** Partiiell beobachtbare Markow-Entscheidungsprobleme (POMDP), Monte-Carlo Baumsuche, Agentensysteme, Belief Propagation

Partiell beobachtbare Markow-Entscheidungsprobleme (POMDP) bilden Situationen der sequentiellen Entscheidungsfindung ab, wobei die Zustandsübergänge stochastisch sind und der aktuelle Systemzustand nur indirekt über Beobachtungen geschätzt wird. POMDP können als eine diskrete Variante optimaler Regelung angesehen werden. In den letzten Jahren wurde Monte-Carlo Baumsuche als Verfahren zur Lösung von POMDP etabliert [1]. Eine Möglichkeit zur Skalierung auf größere Szenarien ist die Aufteilung des zugrundeliegenden POMDP in gekoppelte Teilprobleme und deren verteilte Lösung. Zur Konsensbildung zwischen den Lösungen der Teilprobleme verwenden Amato und Oliehoek [2] Variablenelimination. Dieser Beitrag setzt auf die Propagation von Nutzen [3], angelehnt an Belief-Propagation in Probabilistischen Graphischen Modellen.

Dazu wird angenommen, dass in jeder Periode mehreren Entscheidungsvariablen  $A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$  ein Wert zugeordnet wird. Für die Dekomposition des Markow-Entscheidungsproblems werden die Agenten  $i \in I$  eingeführt, welche jeweils eine Untermenge der Entscheidungsvariablen  $A_i \subseteq A$ , betrachten. Die Agenten können aber durchaus in den betrachteten Entscheidungsvariablen überlappen. Die Koordination der Baumsuche zwischen den Teilproblemen findet über eine Propagation des erwarteten Nutzens statt. Dafür kommt eine verallgemeinerte Variante des Belief-Propagation Algorithmus zum Einsatz [4]. Die zwischen zwei Agenten  $i$  und  $j$  ausgetauschten Teillösungen beschreiben jeweils den erwarteten Nutzen, bedingt auf eine Wertzuweisung für die gemeinsam betrachteten Entscheidungsvariablen  $A_i \cap A_j$ . Die verbleibenden Entscheidungsvariablen werden marginalisiert.

Es wird gezeigt, wie sich durch Dekomposition des betrachteten Szenarios und die verteilte Lösung mittels Nutzenpropagation die Laufzeitkomplexität reduziert. Weiterhin wird aufgezeigt, welche Annahmen gelten müssen um trotz der Dekomposition und verteilten Lösung zu einem global optimalen Ergebnis zu konvergieren. Ein weiterer Anknüpfungspunkt ist die Übertragung des Ansatzes auf die sogenannte Optimistische Planung, der Verwendung stochastischer Baumsuche für die Optimierung nicht-konvexer kontinuierlicher Funktionen [5]. Ein Anwendungsgebiet der Optimistischen Planung ist die (nichtlineare) modellprädiktive Regelung [6].

## Literatur:

- [1] Silver, D., & Veness, J. (2010). Monte-Carlo planning in large POMDPs. In *Advances in neural information processing systems* (pp. 2164-2172).
- [2] Amato, C., & Oliehoek, F. A. (2015). Scalable Planning and Learning for Multiagent POMDPs. In *AAAI* (pp. 1995-2002).
- [3] Pfrommer, J. (2016). Graphical Partially Observable Monte-Carlo Planning. In *NIPS Workshop on Learning, Inference and Control of Multi-Agent Systems* (pp. 1-8).
- [4] Aji, S. M., & McEliece, R. J. (2000). The generalized distributive law. *IEEE transactions on Information Theory*, 46(2), 325-343.
- [5] Valko, M., Carpentier, A., & Munos, R. (2013). Stochastic simultaneous optimistic optimization. In *Proceedings of the 30th International Conference on Machine Learning (ICML-13)* (pp. 19-27).
- [6] Buşoniu, L., Páll, E., & Munos, R. (2016). Discounted near-optimal control of general continuous-action nonlinear systems using optimistic planning. In *American Control Conference (ACC), 2016* (pp. 203-208). IEEE.

# Zur Strukturselektion bei dynamischen lokal-affinen Multi-Modellen mittels statistischer Methoden

Matthias Kahl\*

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

Andreas Kroll \*\*

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

**Schlüsselwörter:** nichtlineare Systemidentifikation, Struktur-/Ordnungsselektion, dynamische lokal affine Multi-Modelle

Ein großer Vorteil der datengetriebenen Modellbildung ist eine weitgehende Automatisierbarkeit des Modellierungsprozesses durch die bereitgestellten Methoden. Doch obliegt es meist dem Anwender eine Auswahl derjenigen Regressoren zu treffen, welche die interessierende Ausgangsgröße im Wesentlichen beschreiben. Bei der Modellierung dynamischer Systeme beinhaltet dies sowohl die Auswahl relevanter physikalischer Größen als auch die Festlegung der dynamischen Ordnung, in dem die einzelnen Größen eingehen, resultierend in einer großen Anzahl potentieller Regressoren. Die Selektion relevanter Regressoren aus allen möglichen Kombinationen von potentiellen Regressoren stellt ein kombinatorisches Optimierungsproblem dar, welches NP-schwer zu lösen ist. Doch es ist von großem Interesse möglichst spärlich parametrisierte Modelle zu erhalten, um bspw. einen modellbasierten Reglerentwurf zu ermöglichen oder die Rechenkomplexität insbesondere für eine Echtzeitsimulation gering zu halten.

Im Bereich des Data Mining und maschinellen Lernens wurden bereits zahlreiche Methoden entwickelt, die eine Auswahl relevanter Modellterme meist für Probleme, die linear in den Parametern (LiP) sind, ermöglichen (s. hierzu bspw. [1,2]). Diese Methoden hielten auch bereits bei der nichtlinearen Systemidentifikation Einzug. In diesem Bereich kommt allerdings der „Fluch der Dimensionalität“ der betrachteten Modellansätze zum Tragen, weshalb eine vollständige Enumeration nicht mehr möglich ist. Stattdessen werden meist greedy- oder meta-heuristische Ansätze verwendet, die nur approximative und ggf. suboptimale Lösungen in annehmbarer Zeit finden (s. bspw. [3]). Alternativ wird teilweise eine konvexe Relaxation des ursprünglichen kombinatorischen Optimierungsproblems auf Basis einer Regularisierung vorgenommen, um eine gemeinsame Modellselektion und Schätzung der Modellparameter in einer rechnerisch effizienten und statistisch robusten Art und Weise vorzunehmen.

Dieser Vortrag behandelt ausgewählte modellbasierte Verfahren aus der angewandten Statistik, welche für LiP-Probleme formuliert wurden – bspw. schrittweise Selektionsmethoden [4] oder eine Form der Regularisierung im Least Squares Support Vector Machine Framework [5] (vgl. Abbildung 1 für die

verschiedenen Prinzipien) – und analysiert ihre Eignung für die Klasse dynamischer lokal affiner Multi-Modelle. Die Eignung und Potentiale der Methoden für die genannte Modellklasse werden in verschiedenen Fallstudien untersucht.

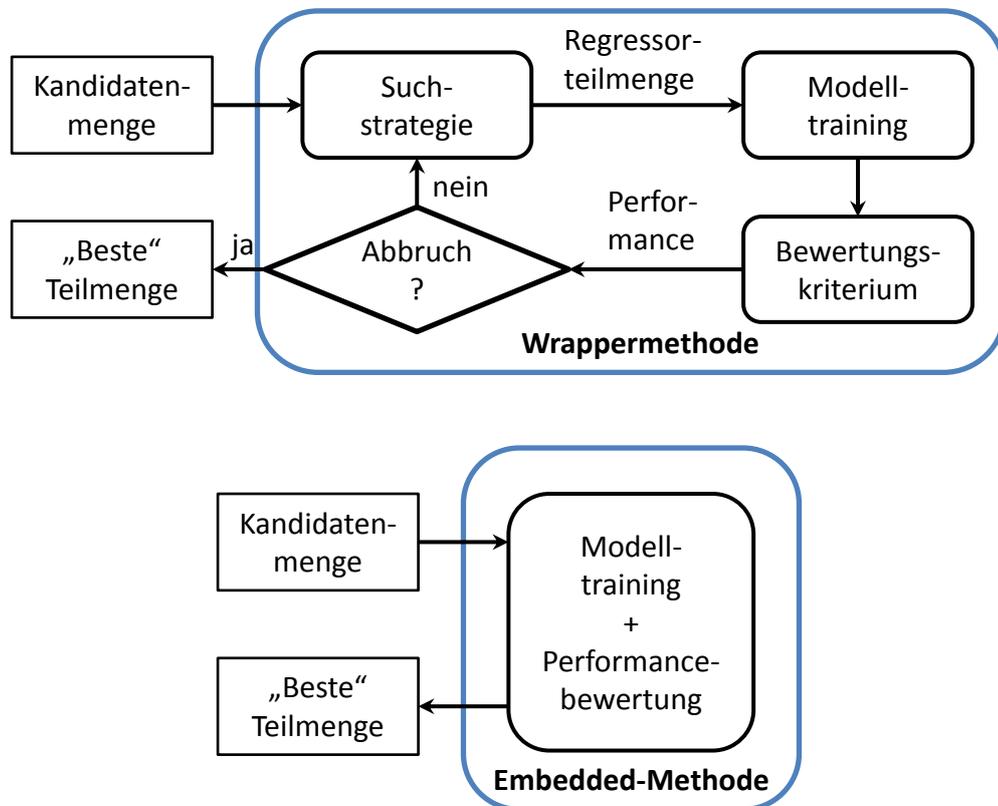


Abbildung 1: Prinzipien der betrachteten modellbasierten Selektionsverfahren

## Literatur:

- [1] T. Hastie, R. Tibshirani, J. Friedmann. *The elements of statistical learning: Data mining, inference, and prediction*, New York: Springer, 2009.
- [2] R. May, G. Dandy, H. Maier, „Review of input variable selection methods for artificial neural networks,” *The Artificial Neural Networks – Methodological Advances and Biomedical Applications*, InTech, 2011.
- [3] M. Kahl, A. Kroll, R. Kästner, M. Sofsky, „Application of model selection methods for the identification of a dynamic boost pressure model,” *IFAC-PapersOnLine*, 48(28), S. 829-834, 2015.
- [4] S. A. Billings, *Nonlinear system identification: NARMAX methods in the time, frequency, and spatio-temporal domains*, John Wiley & Sons, 2013.
- [5] D. Piga, R. Tóth, „LPV model order selection in an LS-SVM setting,” In: *2013 IEEE 52<sup>nd</sup> Annual Conference on Decision and Control (CDC)*, S. 4128-4133, 2013.

# Compositional Abstractions of Interconnected Stochastic Hybrid Systems

Asad Ullah Awan \*

Majid Zamani \*\*

\* Professur für Hybride Regelungssysteme  
Technische Universität München  
Arcisstr. 21, 80333, München  
E-Mail: [asad.awan@tum.de](mailto:asad.awan@tum.de)

\*\* Professur für Hybride Regelungssysteme  
Technische Universität München  
Arcisstr. 21, 80333, München  
E-Mail: [zamani@tum.de](mailto:zamani@tum.de)

**Schlüsselwörter:** Interconnected systems, stochastic hybrid systems, compositional abstraction, dissipativity properties

For large-scale interconnected systems, controller design to achieve some complex specifications in a reliable and cost-effective way is a challenging task. One direction which has been explored to overcome this challenge is to use simpler (e.g. lower dimension) *(in)finite* approximate abstractions of the given systems as replacements in the controller design process. This allows for a design of a controller for the abstraction to satisfy some complex specifications, which then can be refined to a controller for the original system. The error between the output behavior of the concrete system and the one of its abstraction can be quantified a-priori in this detour controller synthesis approach, thus ensuring that the concrete system also satisfies the complex specifications within a known error margin (Figure 1).

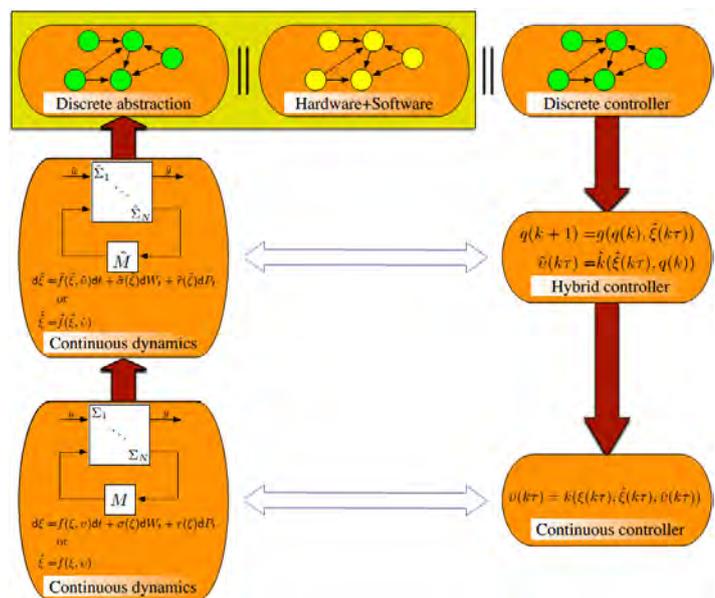


Figure 1: Abstraction based controller synthesis of interconnected stochastic hybrid systems

Rather than treating the concrete network in a monolithic manner, an approach which severely restricts the capability of existing techniques to deal with many number of subsystems, compositional schemes provide network-level certifications from main structural properties of the subsystems and their interconnections. In this talk, we propose compositional schemes that provide abstraction of the concrete network using the abstractions of subsystems and the interconnection topology.

Recently, a compositional framework for the construction of infinite abstractions of networks of deterministic control systems was proposed in [1] using dissipativity theory. In this result, a notion of storage function is proposed which describes joint dissipativity properties of control subsystems and their abstractions. This notion is used to derive compositional conditions under which a network of abstractions

approximates a network of the concrete subsystems. Those conditions can be independent of the number or gains of the subsystems under some properties on the joint dissipativity properties of subsystems and their abstractions and interconnection topologies. As reported in [2], we derive conditions under which compositional abstractions of networks of *stochastic hybrid systems* can be constructed using the interconnection topology and joint dissipativity properties of subsystems and their abstractions. Particularly, we deal with a class of stochastic hybrid systems in which continuous dynamics are modeled by stochastic differential equations and the switches are modeled as Poisson processes, also known as jump-diffusion processes [3]. In the proposed framework, the abstraction, itself a stochastic hybrid system (possibly with a lower dimension), can be used as a substitute of the original system in the controller design process. In addition, we also derive conditions to construct compositional abstractions of interconnected systems in which the interconnection topology is dynamic [4].

### **Literatur:**

- [1] M. Zamani and M. Arcak. Compositional abstractions of networks of control systems: a dissipativity approach. *IEEE Transactions on Control of Network Systems*, DOI: 10.1109/TCNS.2017.2670330
- [2] A. U. Awan and M. Zamani. Compositional abstractions of networks of stochastic hybrid systems: A dissipativity approach. *The 20th World Congress of the International Federation of Automatic Control*, pp. 16374-16379, July 2017.
- [3] B.K. Oksendal and A. Sulem. Applied stochastic control of jump diffusions. Vol. 498, *Springer*, 2005.
- [4] A. U. Awan and M. Zamani. Compositional abstraction of interconnected control systems under dynamic interconnection topology. *The 56th IEEE Conference on Decision and Control*, December 2017 (to appear).

# Fehlertolerante Regelung mit einer parameter-abhängigen Zustandsrückführung am Beispiel eines Hexacopters

Felix Goßmann, Ferdinand Svaricek

Institut für Steuer- und Regelungstechnik  
Universität der Bundeswehr München  
Werner-Heisenberg-Weg 39  
85577 Neubiberg  
felix.gossmann@unibw.de, ferdinand.svaricek@unibw.de

**Schlüsselwörter:** Fehlertolerante Regelung, LPV-Regelung, Multicopter

Fehlertoleranz ist eine elementare Eigenschaft für den Entwurf von robusten Regelungen. Jedes technische System unterliegt potenziellen Fehlern oder Schäden, die die Performance des Systems erheblich beeinflussen oder sogar zu einem Verlust der Stabilität führen können. Einer dieser Fehler ist die Degradation der Leistung der Aktuatoren im System, bei der selbige, beispielsweise durch eine Beschädigung, deutlich an Effektivität verlieren.

In der Praxis ist es oft nicht möglich, eine Degradation der Aktuatoren zu identifizieren oder zu messen. Der Regelkreis muss dann so entworfen werden, dass er gegenüber solchen Fehlern robust ist. In diesem Beitrag wird hierzu ein LPV-Ansatz verwendet. Die Degradation wird als eine zusätzliche parametrische Abhängigkeit des Systems angesehen. Da diese als nicht messbar angenommen wird, ist es erforderlich, einen LPV-Regler zu entwerfen, der nicht von allen LPV-Parametern abhängig ist. Ausgangspunkt ist somit ein LPV-System mit nur teilweise messbaren Parametern [1].

Der Reglerentwurf wird exemplarisch am Beispiel eines Hexacopters gezeigt. Dafür wird aus einem nichtlinearen Modell des Hexacopters ein quasi-LPV-Modell erzeugt [2], welches um die Degradation als parametrische Abhängigkeit erweitert wird. Für dieses Modell wird dann eine PI-Zustandsrückführung entworfen, die die Lagewinkel des Hexacopters regelt und nur von den messbaren LPV-Parametern abhängt. Die Robustheit des Regelkreises gegenüber einer Degradation der Aktuatoren wird anhand von Simulationen mit einem detaillierten nichtlinearen Modell gezeigt.

## Literatur:

- [1] F. Goßmann, G.P. Falconí, F. Svaricek: *Fault Tolerant Control Approach for Passive Handling of Actuator Degradation using an LPV State-Feedback Controller with Partly-Measured Parameters*, 25th Mediterranean Conference on Control and Automation (MED), Valletta (Malta), 3.-6. Juli, 2017
- [2] J.R. Rugh, J.S. Shamma: *Research on Gain Scheduling*, Automatica, Vol. 36, No. 10, pp. 1401 – 1425, 2000

# Statistische Verfahren zur Vorhersage der Produktqualität auf Basis industrieller Prozessdaten

Iris Weiß, M.Sc.

Lehrstuhl für Automatisierung und  
Informationssysteme  
Technische Universität München  
Boltzmannstr. 15, 85748 Garching bei München  
Telefon 089 289 16449  
iris.weiss@tum.de

Prof. Dr.-Ing. Birgit Vogel-Heuser

Lehrstuhl für Automatisierung und  
Informationssysteme  
Technische Universität München  
Boltzmannstr. 15, 85748 Garching bei München  
Telefon 089 289 16400  
vogel-heuser@tum.de

**Schlüsselwörter:** Data Mining, automatisierte Produktionssysteme

Automatisierte Produktionssysteme generieren eine Vielzahl an Daten, die ein annähernd zeitkontinuierliches Abbild des Prozesses und angegliederter Vorgänge darstellen. Die Analyse dieser Daten ist bereits seit einigen Jahren ein Fokus von Forschungs- und Entwicklungsarbeiten zur Verbesserung der Gesamtanlageneffektivität [1]. Die Überwachung des Anlagenzustands zur Steigerung der Verfügbarkeit ist nur eins von vielen Beispielen. Der hier vorgestellte Use Case untersucht die Anlagendaten eines kontinuierlichen Produktionsprozesses zur Vorhersage von Parametern der Produktqualität, welche bisher nicht kosteneffizient inline gemessen werden können. Mit der Vorhersage der Produktqualität können somit frühzeitig Maßnahmen ergriffen werden, die eine hohe Qualität sicherstellt und folglich die Gesamtanlageneffektivität steigert. Die Validität solcher datengetriebenen Vorhersagemodelle ist dabei stark vom Informationsgehalt der Daten abhängig [2]. Ist die Varianz in den Daten gering oder die Verteilung stark ungleichmäßig (cf. Abbildung 1), ist die Übertragungsfähigkeit von Modellen auf das generelle Verhalten der Anlage stark eingeschränkt. Entwickelte Modelle können dann lediglich Aussagen über den dargestellten Bereich treffen, da die komplexen, häufig nichtlinearen Prozesse eine Extrapolation in weitere Wertebereiche nicht zulassen. Dies stellt ein Aspekt der Qualität von Daten dar [3]. Zur Beurteilung der Varianz und Verteilung einzelner Variablen werden Methoden wie Histogramm oder Boxplot [4] eingesetzt. Sie geben Auskunft über die Häufigkeit und Lage der Beobachtungen des gesamten Wertebereichs einer Variablen. Für die Darstellung der Häufigkeit und Lage von mehreren Variablen sowie deren Zusammenspiel hat sich bisher keine mehrdimensionale Darstellung etabliert. Die vorgestellte Forschungsarbeit beschäftigt sich deshalb mit der Beschreibung des Einflusses von Varianz und Verteilung mehrerer

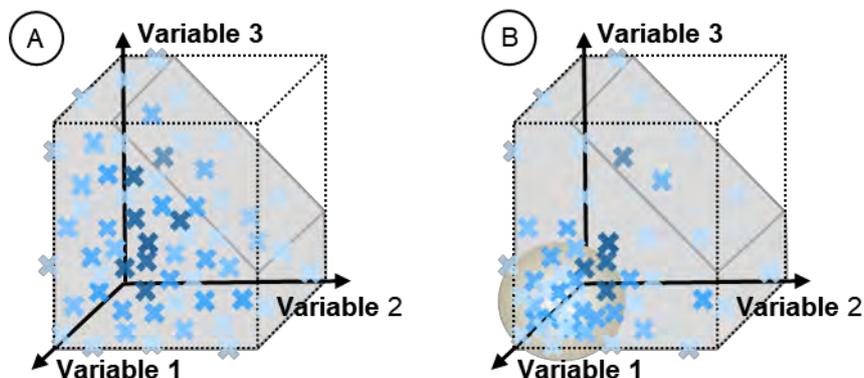


Abbildung 1 Darstellung von Varianz und Verteilung von drei Variablen; A) Variablen zeigen hohe Varianz, jedoch ist der Möglichkeitsraum nicht ausgeschöpft; B) Ungleiche Verteilung

Variablen in Kombination auf die Ergebnisse statistischer Verfahren zur Vorhersage der Produktqualität (Abbildung 1 zeigt Darstellung für 3 Variablen auf).

Anhand des Vergleichs zweier Vorhersagemodelle basierend auf zwei unterschiedlichen industriellen Datensätzen kann der Einfluss von Varianz und Verteilung verdeutlicht werden. Der erste Datensatz wurde während regulärem Betrieb einer Produktionsanlage von Folie aufgezeichnet. Die Daten zeigen dementsprechend die standardmäßigen Kombinationen an Prozessparametern, die sich in der Erfahrung der Anlagenführer für dieses Produkt herausentwickelt haben. Der zweite Datensatz dagegen wurde innerhalb von Testläufen an einer 1:1 Laboranlage erzeugt. Durch das bewusste Verlassen der standardmäßigen Parameterkombinationen kann eine größere Varianz erreicht und somit ein Modell auf Basis eines breiteren Wertebereichs trainiert werden. Anhand der hier angewendeten linearen Regression als Vorhersagemodell können die negativen Effekte der Defizite in Varianz und Verteilung aufgezeigt werden. Um in Zukunft diesen Aspekt der Datenqualität an einem Datensatz mit unbekannter Herkunft und Hintergrund untersuchen zu können, müssen Techniken entwickelt werden, die eine Beurteilung von Varianz und Verteilung im mehrdimensionalen Raum zulassen. Hierzu wird eine Visualisierung vorgestellt und Richtlinien zur Interpretation basierend auf den Erfahrungen der oben genannten Datensätze entwickelt. Zur Visualisierung wird eine Abwandlung des Spinnendiagramm vorgeschlagen, welches erlaubt mehr als 3 Variablen darzustellen. Da auch dieser Darstellung platztechnische Grenzen auferlegt sind, muss die Betrachtung auf die wesentlichen Variablen zur Beschreibung des Problems beschränkt werden. Das entstehende Netz an Linien bildet die Parameterkombinationen des Datensatzes ab und ermöglicht eine Analyse: Gibt es Bereiche, die von den Daten nicht abgedeckt sind? Gibt es Parameterkombinationen die vermehrt vorkommen und damit ein Ungleichgewicht in der Verteilung des Datensatzes verursachen?

Neben der reinen Beurteilung der Datenqualität muss in zukünftiger Forschungsarbeit Methoden entwickelt werden, die einen Nutzen von Daten trotz Defizite in der Datenqualität ermöglichen.

## Literatur

- [1] B. Vogel-Heuser and D. Hess, "Guest Editorial: Industry 4.0—Prerequisites and Visions," *IEEE Trans. Automat. Sci. Eng.*, 2016, pp. 411–413, 2016.
- [2] J. Liu, J. Li, W. Li, and J. Wu, "Rethinking big data: A review on the data quality and usage issues," *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 115, pp. 134–142, 2016.
- [3] I. Kirchen (jetzt Weiß), D. Schütz, J. Folmer, and B. Vogel-Heuser, "Metrics for the Evaluation of Data Quality of Signal Data in Industrial Processes," in *15th IEEE International Conference on Industrial Informatics (INDIN)*, 2017.
- [4] R. L. Nuzzo, "The Box Plots Alternative for Visualizing Quantitative Data," (eng), *PM & R : the journal of injury, function, and rehabilitation*, vol. 8, no. 3, pp. 268–272, 2016.

# Verschlüsselte prädiktive Regelung für lineare Systeme mit Beschränkungen

Moritz Schulze Darup und Daniel Quevedo

Lehrstuhl für Regelungs- und Automatisierungstechnik  
Institut für Elektrotechnik und Informationstechnik  
Universität Paderborn

Warburger Straße 100, 33098 Paderborn

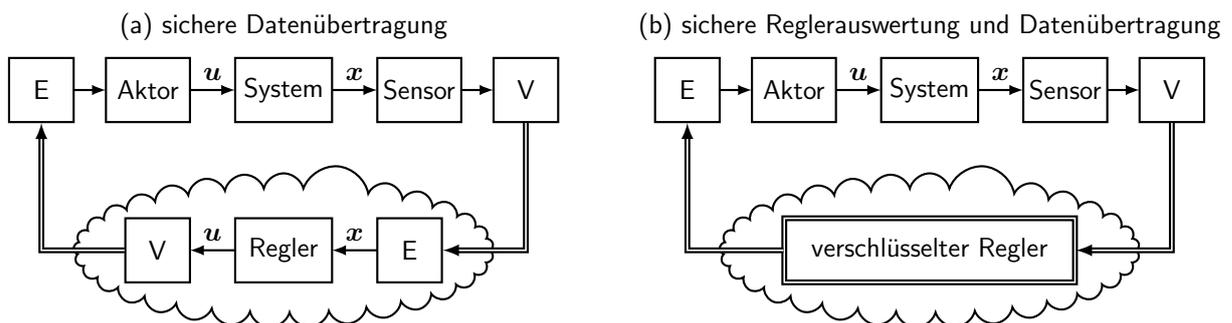
Telefon: +49 5251 60 3006 / +49 5251 60 1692

Fax: +49 5251 60 1964

E-Mail: moritz.schulze.darup@upb.de / daniel.quevedo@upb.de

**Schlüsselwörter:** Modellprädiktive Regelung, multiparametrische quadratische Optimierung, homomorphe Verschlüsselung, Paillier Kryptosystem

**Kurzfassung:** Bedingt durch komplexere Systemstrukturen werden zukünftige Regelungskonzepte verstärkt auf Cloud-Computing und verteiltes Rechnen setzen. Die damit einhergehende Kommunikation von sensiblen Prozessdaten über öffentliche Netzwerke und Auswertung von Prozessdaten auf Hardwareplattformen Dritter, erfordert neue Sicherheitskonzepte für die Reglerauswertung. Ideal wäre eine durchgehende Verschlüsselung der Prozessdaten ausgehend vom Sensor, über den Regler in der Cloud bis hin zum Aktor (siehe Abb. 1.(b) im Gegensatz zum naheliegenden aber unvollständigen Verschlüsselungsansatz im Abb. 1.(a)). Die Realisierung dieses Konzeptes erfordert die verschlüsselte Auswertung der Regleralgorithmen basierend auf verschlüsselten Prozessdaten (z.B. Systemzuständen). Bemerkenswert ist in diesem Zusammenhang, dass die verschlüsselte Auswertung von Algorithmen im Prinzip über homomorphe Verschlüsselungsverfahren (wie etwa dem Paillier Kryptosystem [1]) realisiert werden kann. In der Realität funktioniert dies allerdings nur für sehr einfache Algorithmen, da lediglich verschlüsselte Additionen und Multiplikationen (mit akzeptablem Aufwand) umsetzbar sind. Diese Operationen erlauben aber bereits die verschlüsselte Auswertung einfacher Regelungskonzepte, wie etwa linearen Zustandsregelungen [2,3].



**Abbildung 1:** Illustration (a) eines unvollständigen und (b) eines durchgehenden Verschlüsselungskonzeptes. In (a) werden sensible Prozessdaten unverschlüsselt in der Cloud verarbeitet. In (b) wird diese Sicherheitslücke durch eine verschlüsselte Regelung geschlossen. Die Blöcke V und E stehen jeweils für Verschlüsselung und Entschlüsselung. Doppelpfeile und Doppelumrandungen garantieren Datensicherheit.

Der Vortrag zielt auf die Verschlüsselung leistungsfähigerer Regelungskonzepte ab. Der Schwerpunkt liegt dabei auf der Realisierung verschlüsselter modellprädiktiver Regelungen (MPR), die

zur Laufzeit die wiederkehrende Lösung einer Optimalsteuerungsaufgabe (OSA) erfordern. Es stellt sich die Frage, wie sich dieses Ziel basierend auf dem begrenzten Sortiment verschlüsselter Operationen umsetzen lässt. Der Vortrag zeigt auf, dass eine verschlüsselte MPR für lineare Systeme realisierbar ist [4], sofern das durch die OSA implizit festgelegte, stückweise affine Regelgesetz explizit berechnet werden kann [5] und sofern eine suboptimale Reglerarchitektur in Kauf genommen wird. Abschließend werden Strategien zur Aufhebung dieser Einschränkungen diskutiert.

## Literatur

- [1] P. Paillier. Public-key cryptosystems based on composite degree residuosity classes. *Proceedings of the International Conference on the Theory and Application of Cryptographic Techniques (Eurocrypt '99)*, 223–238, 1999.
- [2] K. Kogiso und T. Fujita. Cyber-security enhancement of networked control systems using homomorphic encryption. *Proceedings of the 54th Conference on Decision and Control*, 6836–6843, 2015.
- [3] F. Farokhi, I. Shames und N. Batterham. Secure and private control using semi-homomorphic encryption. *Control Engineering Practice*, 67: 13–20, 2017.
- [4] M. Schulze Darup, A. Redder, I. Shames, F. Farokhi und D. Quevedo. Towards encrypted MPC for linear constrained systems. *IEEE Control Systems Letters*, Im Druck, 2018. (DOI: 10.1109/LCSYS.2017.2779473)
- [5] A. Bemporad, M. Morari, V. Dua und E. N. Pistikopoulos. The explicit linear quadratic regulator for constrained systems. *Automatica*, 38(1): 3–20, 2002.

# Adaptives Model Recovery Anti-Windup

Manus Thiel \*

\* Lehrstuhl Regelungstechnik / Institut für  
Automatisierungstechnik  
Universität Rostock  
Richard-Wagner Str. 31, Haus 8 Warnemünde,  
D-18051 Rostock  
Telefon: +49 (0) 381 / 498 7709  
Fax: +49 (0) 381 / 498 7702  
E-Mail: manus.thiel@uni-rostock.de

Torsten Jeinsch \*\*

\*\* Lehrstuhl Regelungstechnik / Institut für  
Automatisierungstechnik  
Universität Rostock  
Richard-Wagner Str. 31, Haus 8 Warnemünde,  
D-18051 Rostock  
Telefon: +49 (0) 381 / 498 7704  
Fax: +49 (0) 381 / 498 7702  
E-Mail: torsten.jeinsch@uni-rostock.de

**Schlüsselwörter:** Adaptive Regelung, Stellgrößenbegrenzung,  
Parameterunsicherheiten

Eine Regelung verfolgt die Aufgabe, die Ausgangsgröße einer Regelstrecke an den gewünschten Sollverlauf anzugleichen. Für die Auslegung von entsprechenden Regelungen wird häufig das Wissen über ein nominelles Verhalten der Regelstrecke mit bekannten Unsicherheiten vorausgesetzt. Diese Voraussetzung ist jedoch bei vielen industriellen Anwendungen nicht erfüllt. Ein Grund dafür ist die fehlende Möglichkeit, Systemunsicherheiten ausreichend zu analysieren bzw. zu identifizieren. Hinzu kommen zeitliche Parameterveränderungen, die über die Lebenszeit eines Systems schwierig vorhersehbar sind und das Streckenverhalten erheblich verändern können. Wenn ein Regler mit konstanten Parametern für ein solches System keine ausreichende Regelgüte ermöglicht, können die Regelparameter dem aktuellen Verhalten der Regelstrecke angepasst werden. In diesen Fällen spricht man von adaptiver Regelung.

Trotz der genannten Herausforderungen werden von der Industrie hohe Anforderungen an die Performance der jeweiligen Anwendungen gestellt. Diese betreffen häufig die benötigte Zeit zum Erreichen eines stationären Betriebspunktes, maximales Über- und Unterschwingen beim Wechsel der Betriebspunkte und die maximale Regelabweichung im stationären Betrieb. Die Methoden der adaptiven Regelung ermöglichen die Einhaltung einer vorher definierten Performance bei gleichzeitiger Berücksichtigung von Parameterunsicherheiten. Im wohl bekanntesten adaptiven Verfahren, Model Reference Adaptive Control (MRAC), erfolgt die Berücksichtigung der Unsicherheiten über eine Anpassung der Reglerparameter während des Betriebs, mit dem Ziel, die Abweichung zwischen dem gemessenen Ausgang des geschlossenen Regelkreises und dem Ausgang eines vorgegebenen Referenzmodells zu minimieren [1].

Eine weitere Herausforderung bei der Regelung von technischen Systemen ist die angemessene Berücksichtigung von Stellgrößenbegrenzungen. Diese limitieren nicht nur die maximal erreichbare Performance, sondern setzen zudem die üblichen Stabilitätsnachweise für adaptive Regelungsmethoden außer Kraft. Es existieren einige Erweiterungen für adaptive Verfahren, die Stellgrößenbegrenzungen berücksichtigen, um weiterhin die Stabilität des geschlossenen Regelkreises zu gewährleisten. Allerdings blieb die erreichbare Performance des geschlossenen Regelkreises bei diesen Verfahren bisher unberücksichtigt.

Dieser Beitrag gibt einen Einblick in ein neues adaptives Regelungsverfahren, das eine Berücksichtigung von Stellgrößenbegrenzungen ermöglicht und für den Fall einer saturierten Stellgröße die Anpassung der Performance ermöglicht. Dazu findet eine Kombination von MRAC mit der Methode Model Recovery Anti-Windup (MRAW)

statt, das für bekannte Streckenparameter einen effizienten Umgang mit limitierten Stellgrößen ermöglicht [2]. Die Grundstruktur von MRAW wird in eine Form gebracht, die eine Kombination mit MRAC und ebenfalls die Anwendungen von dessen Grundkonzepten auf das neue adaptive Verfahren erlaubt. Somit kann sowohl Stabilität nachgewiesen werden als auch eine Anpassung der Performance für den Fall einer tatsächlichen Begrenzung der Stellgröße erfolgen [3,4,5]. Die Regelgüte für den Fall einer unbegrenzten Stellgröße bleibt im Vergleich zu MRAC unverändert. Nach der Herleitung der grundsätzlichen Struktur des Verfahrens anhand eines linearen Systems mit Zustandsrückführung wird an einem Beispielsystem gezeigt, welche Vorteile das neue Verfahren gegenüber der bisher üblicherweise verwendeten Verfahren aus [6,7] hat.

An Experimenten mit Zustandsrückführung als auch mit Ausgangsrückführung werden diese Vorteile bestätigt und zudem die grundsätzlichen Möglichkeiten der adaptiven Regelung präsentiert.

## Literatur:

- [1] S. Tarbouriech and M. Turner. Anti-windup design: an overview of some recent advances and open problems. *IET Control Theory and Application*, 3(1):1–19, 2009.
- [2] M. Thiel, D. Schwarzmann, M. Schultalbers and T. Jeinsch. Indirect adaptive pole placement control with performance orientated anti-windup for electronic throttle plates. In *24th Mediterranean Conference on Control and Automation*, Athens, Greece, June 2016 .
- [3] M. Thiel, D. Schwarzmann, A. M. Annaswamy, M. Schultalbers and T. Jeinsch. Improved performance for adaptive control of systems with input saturation. In *American Control Conference*, Boston, 2016.
- [4] M. Thiel, D. Schwarzmann, M. Schultalbers and T. Jeinsch. Adaptive model recovery anti-windup for output-feedback plants. In *20th IFAC World Congress*. Toulouse, France, July 2017.
- [5] E. N. Johnson and A. J. Calise. Pseudo-control hedging: a new method for adaptive control. In *Advances in navigation guidance and control technology workshop*, 2000.
- [6] S. P. Karason and A. M. Annaswamy. Adaptive control in the presence of input constraints. In *American Control Conference*, June 1993.

# Real-Time Power Balancing in Photovoltaic-Integrated Smart Micro-grid

Daud Mustafa Minhas \*

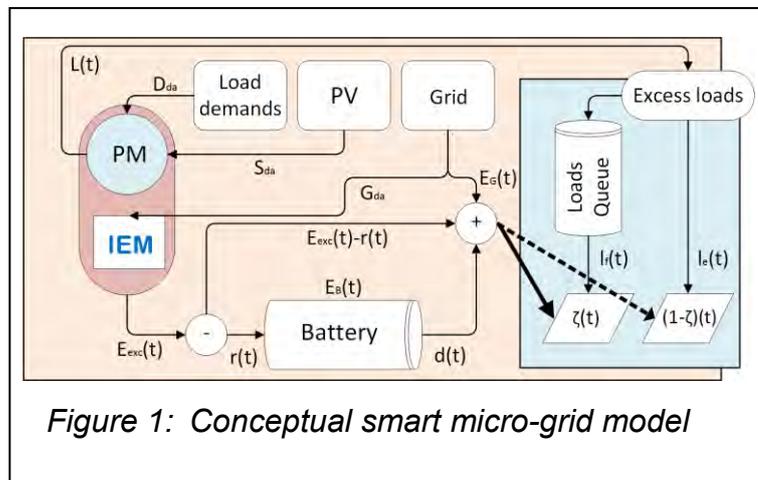
\* Chair of Automation and Energy Systems  
Saarland University  
Saarbrücken, Germany  
+49 681 302 -57593  
+49 681 302 -57599  
[daud.minhas@aut.uni-saarland.de](mailto:daud.minhas@aut.uni-saarland.de)

Georg Frey \*

\* Chair of Automation and Energy Systems  
Saarland University  
Saarbrücken, Germany  
+49 681 302 -57590  
+49 681 302 -57599  
[georg.frey@aut.uni-saarland.de](mailto:georg.frey@aut.uni-saarland.de)

**Keywords:** Smart micro-grid, Energy management, Lyapunov optimization, Flexible loads, Battery storage

The conceptual framework of future smart power grid incorporates self-automated power flow components. It handles high penetration of intermittent renewable energy and variable users' load demands. To establish an efficient real-time power flow mechanism, control of the exact amount of energy generation and consumption is necessary.



To this end, we propose a novel framework of a smart micro-grid (SMG) that keeps balance among generation and consumption. It empowers day-ahead supply and demand prediction mechanisms along with a real-time intelligent energy management (IEM) system. Practically, day-ahead predictions are attained with a certain level of errors. These errors are due to the difference in predicted and measured data, also known as uncertainties. Lyapunov optimization under various IEM strategies using flexible loads and battery storage is considered to exploit these uncertainties. The proposed scheme comprises of four subsequent steps

- 1) day-ahead prediction of solar power and user load demands
- 2) day-ahead procurement of grid power to balance the overall load demands
- 3) differentiation of real-time uncertainties into user's unused excess power and unserved load demands
- 4) real-time balancing of supply and demands by scheduling flexible loads and battery storage, considering the cost effective SMG operations.

Our IEM system effectively demonstrates the results of the proposed framework by balancing the user demand arrivals with various energy supplies.

<b>Var:</b>		$E_G(t)$	Energy purchased from grid on real time
$G_{da}$	Day ahead grid supplied energy	$E_{exc}(t)$	User unused excess energy
$S_{da}$	Day ahead PV supplied energy	$E_B(t)$	Battery storage level
$D_{da}$	Day ahead registered load demands	$L(t)$	Total load demands
$d(t)$	Battery discharging rate	$l_e(t)$	Essential load demands
$r(t)$	Battery recharging rate	$l_f(t)$	Flexible load demands

*Table 2: Variables description*

### Literature:

- [1] Y. Huang, S. Mao, and R. M. Nelms, "Adaptive electricity scheduling in microgrids," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 5, no. 1, pp. 270–281, Jan 2014.
- [2] T. Sadamoto, T. Ishizaki, M. Koike, Y. Ueda, and J. i. Imura, "Spatiotemporally multiresolutional optimization toward supply-demand-storage balancing under PV prediction uncertainty," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 6, no. 2, pp. 853–865, March 2015.
- [3] Z. Zhang, J. Wang, T. Ding, and X. Wang, "A two-layer model for microgrid real-time dispatch based on energy storage system charging/discharging hidden costs," *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 8, no. 1, pp. 33–42, Jan 2017.
- [4] W. Shi, N. Li, C. C. Chu, and R. Gadh, "Real-time energy management in microgrids," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 8, no. 1, pp. 228–238, Jan 2017.
- [5] S. Sun, M. Dong, and B. Liang, "Distributed real-time power balancing in renewable-integrated power grids with storage and flexible loads," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 7, no. 5, pp. 2337–2349, Sept 2016.
- [6] Y. Zhang, N. Gatsis, and G. B. Giannakis, "Robust energy management for microgrids with high-penetration renewables," *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 4, no. 4, pp. 944–953, Oct 2013.
- [7] R. Yu, W. Zhong, S. Xie, C. Yuen, S. Gjessing, and Y. Zhang, "Balancing power demand through ev mobility in vehicle-to-grid mobile energy networks," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 12, no. 1, pp. 79–90, Feb 2016.
- [8] D. M. Minhas, M. Rashad, S. Hussain, and M. Ashraf, "Optimal control of power cost and consumer satisfaction using smart grid intelligent energy management system," in *Control Conference (ASCC), 2015 10th Asian*, May 2015, pp. 1–6.
- [9] R. Pal, C. Chelmiss, M. Frincu, and V. Prasanna, "Match for the prosumer smart grid the algorithmics of real-time power balance," *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, vol. 27, no. 12, pp. 3532–3546, Dec 2016.
- [10] D. M. Minhas, R. R. Khalid and G. Frey, "Real-time power balancing in Photovoltaic-integrated smart micro-grid," *IECON 2017 – 43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Beijing, 2017, pp. 1-6. (Accepted)

# Regelungstechnik in der Synthetischen Biologie: Konzeptionelle und experimentelle Realisierung von PID Reglern im Inneren von Zellen

Wolfgang Halter \*

Frank Allgöwer \*\*

\* Institut für Systemtheorie und Regelungstechnik \*\* Institut für Systemtheorie und Regelungstechnik

Universität Stuttgart  
Pfaffenwaldring 9, 70569 Stuttgart  
Tel.: +49 711 685 66292  
Fax: +49 711 685 67735

E-Mail: wolfgang.halter@ist.uni-stuttgart.de

Universität Stuttgart  
Pfaffenwaldring 9, 70569 Stuttgart  
Tel.: +49 711 685 66292  
Fax: +49 711 685 67735

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

**Schlüsselwörter:** Synthetische Biologie, Regelung biologischer Systeme

Eines der Hauptziele der synthetischen Biologie ist die Realisierung genau definierter Funktionen, wie zum Beispiel Sensoren oder Aktuatoren, in Form von neuartigen biologischen Systemen. Aus Sicht eines Regelungstechnikers liegt es dabei auf der Hand, den Funktionsumfang auf Regler und Optimierer zu erweitern um somit komplexere Funktionen mit hoher Genauigkeit und gewissen Robustheitseigenschaften realisieren zu können. Im Anbetracht der Komplexität und Größe biologischer Systeme kann dabei die ausgeprägte Systematik bekannter Entwurfsverfahren eine Schlüsselrolle spielen. Während die Regelungstechnik solche Methoden für den Entwurf von Reglern bereitstellt, birgt deren Implementierung in einem biologischen Kontext durch die teilweise unbekanntenen Mechanismen und deren nichtlineare Dynamiken zahlreiche Herausforderungen. Als biologisches System können dabei unterschiedliche Organisationsstrukturen aufgefasst werden, von interzellulären Informationsflüssen in Zellpopulationen bis hin zu Netzwerken aus Genen, Proteinen oder Metaboliten.

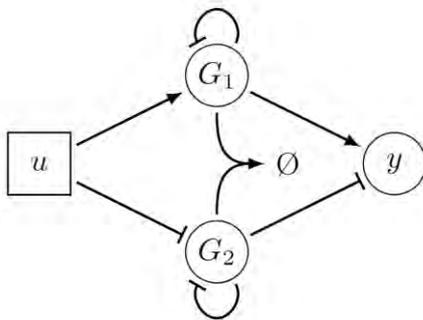


Abbildung 1: Genetischer Differentiator

Im Falle biochemischer Netzwerke mit ausschließlich Reaktionen maximal erster Ordnung können beliebige lineare Ein-/Ausgangssysteme mit Hilfe weniger einfacher Mechanismen realisiert werden [1]. Dieser Vortrag beschäftigt sich damit, wie dieses Prinzip auf allgemeine genregulatorische Netzwerke erweitert werden kann um beispielsweise klassische PID Regler zu implementieren. Da dabei die biologische Realisierung des D-Anteils die größte Herausforderung darstellt, wird dieses angepasste Entwurfsprinzip beispielhaft dazu angewendet ein Gennetzwerk zu entwerfen, dessen Ein-/Ausgangsverhalten näherungsweise dem eines Differentialoperators entspricht. Dieses System wird durch die Kombination einfacher Operatoren wie Verstärker, Integrator und der Differenz zweier Signale synthetisiert, anschließend wird gezeigt, wie diese Operatoren in genetischem Kontext umgesetzt werden

können. Das so hergeleitete Netzwerk (Abbildung 1) besteht aus zwei Genen und realisiert die Übertragungsfunktion eines Differentialoperators mit Tiefpassfilter [2]. Solch ein genetischer Differentiator kann neben der Anwendung in einem PID Regler auch direkt als Sensor zur Erfassung von Änderungen in der Umwelt oder auch für diverse Optimierungsprozesse innerhalb einer Zelle eingesetzt werden. Nach der theoretischen Betrachtung dieses Netzwerks wird schließlich die praktische Implementierung mit Hilfe einer zellfreien Transkriptions- und Translationsplattform [3] besprochen und anhand dieser Betrachtungen die praktischen Herausforderungen beleuchtet.

## **Literatur:**

- [1] Oishi, K., & Klavins, E. (2011). Biomolecular implementation of linear I/O systems. *IET Systems Biology*, 5(4), 252-260.
- [2] Halter, W., & Tuza, Z. A., & Allgöwer, F. (2017). Signal differentiation with genetic networks. *Proc. 20th IFAC World Congress, Toulouse, France*.
- [3] Takahashi, M. K., Hayes, C. A., Chappell, J., Sun, Z. Z., Murray, R. M., Noireaux, V., & Lucks, J. B. (2015). Characterizing and prototyping genetic networks with cell-free transcription–translation reactions. *Methods*, 86, 60-72.

# Verteilte Optimierung und Regelung über gerichtete Graphen: Ein neuer Ansatz mittels Lie Klammern

Simon Michalowsky \*

\* Institut für Systemtheorie und  
Regelungstechnik, Universität Stuttgart  
Pfaffenwaldring 9  
Telefon: 0711 – 685 67657  
Fax: 0711 – 685 67735  
simon.michalowsky@ist.uni-stuttgart.de

Christian Ebenbauer \*\*

\*\* Institut für Systemtheorie und  
Regelungstechnik, Universität Stuttgart  
Pfaffenwaldring 9  
Telefon: 0711 – 685 67730  
Fax: 0711 – 685 67735  
ce@ist.uni-stuttgart.de

**Schlüsselwörter:** Verteilte Optimierung, verteilte Regelung, Extremwertregelung

Durch die immer weiter voranschreitende Vernetzung ist das verteilte Lösen von Optimierungs- und Regelungsproblemen immer mehr in den Fokus gerückt. In diesen Problemstellungen versucht eine Gruppe von Agenten, die über ein Kommunikationsnetz Informationen austauscht, gemeinsam ein Optimierungs- oder ein optimierungsbasiertes Regelungsproblem zu lösen. Typische Anwendungsfälle sind z.B. die Formationssteuerung von Gruppen mobiler Roboter oder auch das verteilte maschinelle Lernen. Die meisten aus der Literatur bekannten Algorithmen zur verteilten Lösung von Optimierungsproblemen setzen einen bidirektionalen Informationsfluss voraus. Viele praktische Probleme erfüllen diese Voraussetzung jedoch nicht, sei es aufgrund fehlender Sensoren oder aus Gründen der Netzwerksicherheit. Zudem werden meist starke Voraussetzungen an die Struktur des zugrundeliegenden Optimierungsproblems und der Netzwerkarchitektur gestellt.

In diesem Vortrag stellen wir einen neuen Ansatz zur Lösung verteilter Probleme über gerichtete Kommunikationsnetze vor, bei dem fehlende Informationen mit Hilfe von Lie Klammer Approximationen erzeugt werden [1]. Am Beispiel von Sattelpunktalgorithmen zeigen wir, wie aus zentralen Algorithmen durch geeignete Approximation verteilte Algorithmen gewonnen werden können. Wir diskutieren sowohl die Anwendung auf Optimierungs- als auch auf Extremwertregelungsprobleme [2]. Wir zeigen außerdem, dass die vorgestellte Methodik im Gegensatz zu existierenden Algorithmen nicht nur geringere Anforderungen an die Netzwerktopologie stellt, sondern auch weniger strukturelle Voraussetzungen an das verteilte Problem von Nöten sind.

## Literatur:

- [1] C. Ebenbauer, S. Michalowsky, V. Grushkovskaya, B. Gharesifard, *Distributed optimization over directed graphs with the help of Lie brackets*, 20<sup>th</sup> IFAC World Congress, Toulouse, 2017.
- [2] S. Michalowsky, B. Gharesifard, C. Ebenbauer, *Distributed extremum seeking over directed graphs*, 56th IEEE CDC, Melbourne, 2017.

# Bewegungsplanung für Zweiarmroboter mit offener und geschlossener Kinematik

Andreas Völz

Institut für Mess-, Regel- und Mikrotechnik  
Universität Ulm  
Albert-Einstein-Allee 41, D-89081 Ulm  
Tel.: +49 (0)731 50-26305  
andreas.voelz@uni-ulm.de

Knut Graichen

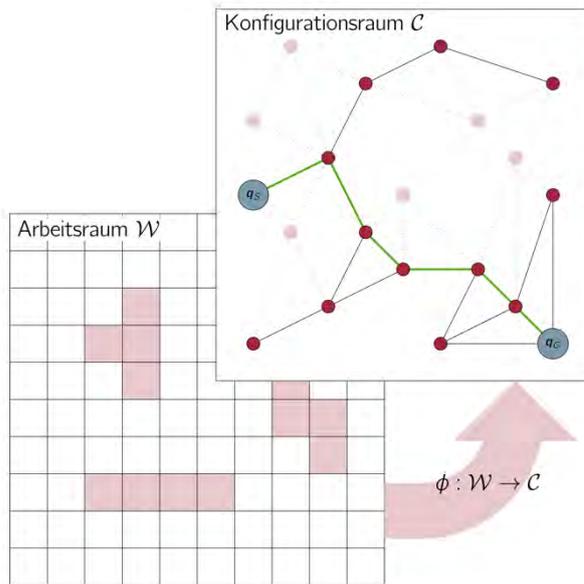
Institut für Mess-, Regel- und Mikrotechnik  
Universität Ulm  
Albert-Einstein-Allee 41, D-89081 Ulm  
Tel.: +49 (0)731 50-26304  
knut.graichen@uni-ulm.de

**Schlüsselwörter:** Zweiarmroboter, kollisionsfreie Bewegungsplanung, Koordination, geschlossene Kinematik, optimierungsbasierte Planung

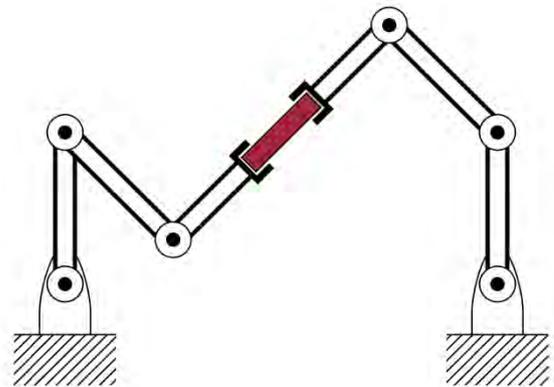
Durch die zunehmende Entwicklung der Industrierobotik hin zur Mensch-Roboter-Kollaboration ist auch neues Interesse an Bauformen mit zwei Armen erwacht. Anders als herkömmliche Einarmroboter ermöglichen sie viele Tätigkeiten ähnlich wie ein Mensch auszuführen. So können zum Beispiel Tätigkeiten parallel ausgeführt werden (offene Kinematik), schwere Objekte beidhändig transportiert werden (geschlossene Kinematik) oder ein Arm kann während der Montage zum Festhalten des Bauteils verwendet werden.

Für die Bewegungsplanung mit offener Kinematik kann der Zweiarmroboter als ein Roboter mit erhöhter Anzahl Freiheitsgrade betrachtet werden, wodurch prinzipiell alle gängigen Verfahren darauf angewendet werden können. Jedoch werden dadurch die besonderen Eigenschaften des Aufbaus nicht ausgenutzt. Im ersten Teil des Vortrags wird deshalb eine Erweiterung des Dynamic Roadmap-Verfahrens [1] vorgestellt, vgl. Abb. 1, welches speziell für die Pfadplanung in veränderlichen Umgebungen entwickelt wurde. Dabei wird zunächst für jeden Arm separat ein Pfad bestimmt und anschließend eine zeitliche Koordination durchgeführt, um Kollisionen zwischen den Armen zu vermeiden. Anhand eines Benchmarks wird gezeigt, dass sich dadurch bei einer vergleichbaren Rechenzeit von circa 100 ms kürzere Pfade erzielen lassen als mit einer gekoppelten Planung [2].

Im Falle einer geschlossenen Kinematik, schematisch in Abb. 2 dargestellt, muss diese als kinematische Zwangsbedingung in der Bewegungsplanung berücksichtigt werden. Bei sogenannten stichprobenbasierten Verfahren ergibt sich das Problem, dass zufällige Konfigurationen diese Beschränkung fast sicher verletzen. Ein verbreiteter Lösungsansatz [3] verwendet deshalb die inverse Kinematik für einen Arm, um zulässige Konfigurationen zu finden. Betrachtet man die Bewegungsplanung hingegen als Optimierungsproblem, wie z.B. in [4] oder [5], so stellt die geschlossene Kinematik verglichen mit der offenen Kinematik nur eine zusätzliche Gleichungsbeschränkung dar. Im zweiten Teil des Vortrags wird ein entsprechendes Optimierungsproblem angegeben und ein Ansatz zur recheneffizienten Lösung vorgestellt.



**Abbildung 1:** Dynamic Roadmaps (DRM) basieren auf einer vorab berechneten Abbildung zwischen dem Arbeitsraum und dem Graph im Konfigurationsraum.



**Abbildung 2:** Zwei Arme greifen gemeinsam ein Objekt und bilden eine geschlossene kinematische Kette.

## Literatur:

- [1] P. Leven und S. Hutchinson. „A framework for real-time path planning in changing environments.“ *International Journal of Robotics Research* 21.12 (2002): 999-1030.
- [2] A. Völz und K. Graichen. „Composition of dynamic roadmaps for dual-arm motion planning.“ In *Proc. IEEE Intern. Conf. on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM)*, 2017, S. 1242-1248.
- [3] L. Han und N. Amato, „A kinematics-based probabilistic roadmap method for closed kinematic chains“, In B. R. Donald, K. M. Lynch, und D. Rus, editors, *Algorithmic and Computational Robotics: New Directions*, S. 233-246. A. K. Peters, Wellesley, MA, 2001.
- [4] M. Zucker, et. al. „CHOMP: Covariant Hamiltonian optimization for motion planning.“ *International Journal of Robotics Research* 32.9-10 (2013): 1164-1193.
- [5] J. Schulman, et. al. „Motion planning with sequential convex optimization and convex collision checking.“ *International Journal of Robotics Research* 33.9 (2014): 1251-1270.

# Nutzsignalformung zur blinden Quellentrennung

Sebastian Bauer

Fernando Puente León

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

Institut für Industrielle Informationstechnik  
Karlsruher Institut für Technologie  
Hertzstraße 16, 76187 Karlsruhe  
Tel. +49 721 608-44520  
Fax +49 721 608-44500  
info@iit.kit.edu

**Schlüsselwörter:** Blinde Quellentrennung, nichtnegative Matrixzerlegung, konvexe Optimierung, hyperspektrale Bildverarbeitung, spektrale Entmischung.

Ausgehend von der spektralen Entmischung von Hyperspektralbildern wird ein auf nichtnegativer Matrixzerlegung basierendes Verfahren zur blinden Quellentrennung vorgestellt. Im gravierenden Unterschied zu bestehenden Verfahren besteht es aus einem konvexen Datenterm und ist gleichzeitig in der Lage, vorhandenes Rauschen zu berücksichtigen und den Nutzsignalanteil vorteilhaft zu formen. Das präsentierte Verfahren kann nicht nur zur spektralen Entmischung eingesetzt werden, sondern – wie die nichtnegative Matrixzerlegung im Allgemeinen – beispielsweise zur Textanalyse [1], Datenregelung [2] und Audiosignaltrennung [3].

Hyperspektralbilder enthalten die spektrale Information der beobachteten Szene in bis zu mehreren hundert Einzelbildern. Während diese spektrale Information zur zuverlässigen Materialunterscheidung genutzt werden kann, besitzen solche Bilder aufnahmebedingt eine nur geringe räumliche Auflösung. Dadurch liegen häufig Pixelspektren vor, die eine Mischung aus verschiedenen Reinspektren darstellen. Um bei einem gemessenen gemischten Pixel auf die Reinspektren und deren Anteile zurückzuschließen, werden Methoden der sogenannten „spektralen Entmischung“ (Englisch: *spectral unmixing*) verwendet. Unter Annahme der linearen Überlagerung der einzelnen Spektralanteile lautet das Mischmodell

$$\mathbf{Y} = \mathbf{M} \cdot \mathbf{A}$$

mit der Bildmatrix  $\mathbf{Y}$ , der Reinstoffmatrix  $\mathbf{M}$  und der Anteilsmatrix  $\mathbf{A}$  [4]. Hierbei ist zu beachten, dass das dreidimensionale Bild so aufgefaltet wurde, dass die Spaltenvektoren der Bildmatrix die einzelnen Pixelspektren darstellen. Die Reinstoffmatrix enthält in ihren Spalten die Spektren der Reinstoffe, während die Anteilsmatrix spaltenweise die Materialanteile dieser Reinstoffe beinhaltet.

Grundidee des neuen Verfahrens ist es, die Reinstoffmatrix  $\mathbf{M}$  in quadratische Untermatrizen aufzuteilen, sodass obiges Mischmodell sich in mehrere Einzelterme aufteilen lässt:

$$\mathbf{N}_i \mathbf{Y}_i = \mathbf{A}.$$

Dabei nummeriert der Index  $i$  die einzelnen Blöcke von  $\mathbf{M}$ , und die Matrizen  $\mathbf{N}_i$  sind die inversen Matrizen der einzelnen Matrizen  $\mathbf{M}_i$ . Während das ursprüngliche, vollständige lineare Mischmodell nicht konvex ist, ergibt sich durch diese blockweise Matrixinversion ein konvexes Minimierungsproblem, das allerdings um einen zusätzlichen Term ergänzt werden muss, damit sich als Lösung nicht die Trivillösung  $\mathbf{N}_i = \mathbf{0}$  ergibt:

$$|\mathbf{N}_i \mathbf{Y}_i - \mathbf{A}|_{\mathbb{F}}^2 - \log(|\det(\mathbf{N}_i)|).$$

Während solche Umformungen in ähnlicher Form in der Literatur bereits verwendet werden, siehe z. B. [5], wird dabei angenommen, dass die Daten rauschfrei sind. Da dies in der Realität quasi nie der Fall ist, ist eine Erweiterung notwendig. Im vorgestellten Verfahren geschieht dies durch die Verknüpfung mit einer orthogonalen Transformation, im konkreten Fall der Kosinustransformation. Im Allgemeinen können solche Transformationen als Multiplikation von Transformationsmatrizen mit den Datenmatrizen formuliert werden. Durch die Transformation besitzt das im ursprünglichen Datenraum (Ortsbereich) als additives weißes Gauß'sches Rauschen angenommene Rauschen in allen Frequenzkoeffizienten die gleiche Varianz. Durch geschickte Anordnung der Daten im Ortsbereich lässt sich der Nutzsignalanteil im Spektrum so verschieben, dass die Auswirkung des Rauschens reduziert wird.

## Literatur:

- [1] M. W. Berry, M. Browne, A. N. Langville, V. P. Pauca, R. J. Plemmons, Algorithms and applications for approximate nonnegative matrix factorization, Computational Statistics & Data Analysis, vol. 52, no. 1, S. 155–173, 2007.
- [2] V. Willert und M. Schnaubelt, Die Regelung von Daten: Eine Idee zur Clusteranalyse von vernetzten Datenbeständen, at – Automatisierungstechnik, vol. 64, no. 8, S. 618–632, 2016.
- [3] A. Ozerov und C. Févotte, Multichannel nonnegative matrix factorization in convolutive mixtures for audio source separation." IEEE Transactions on Audio, Speech, and Language Processing, vol. 18, no. 3, S. 550–563, 2010.
- [4] N. Keshava und J. F. Mustard, Spectral unmixing, IEEE Signal Processing Magazine, vol. 19, no. 1, S. 44–57, 2002.
- [5] G. Begelman, M. Zibulevsky, E. Rivlin und T. Kolatt, Blind decomposition of transmission light microscopic hyperspectral cube using sparse representation, IEEE Transactions on Medical Imaging, vol. 28, no. 8, S. 1317–1324, 2009.